



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Τομέας Δομοστατικής

---

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ  
ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

---

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

ΤΟΥ

**Ιωάννη Π. Σφήκα**

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π., M.Sc.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΤΡΕΖΟΣ**  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.  
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

**ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΒΙΝΤΖΗΛΑΙΟΥ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

**ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Δομοστατικής

---

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

---

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

**Ιωάννη Π. Σφήκα**

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π., M.Sc.

Η Διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου του Διδάκτορος Μηχανικού.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

---

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΤΡΕΖΟΣ**  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.  
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

---

**ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΒΙΝΤΖΗΛΑΙΟΥ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

---

**ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

---

**ΜΙΧΑΗΛ Φ. ΠΕΤΡΟΥ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΝ. ΚΥΠΡΟΥ

---

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΖΕΡΗΣ**  
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

---

**ΚΟΣΜΑΣ Κ. ΣΙΔΕΡΗΣ**  
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Π.Θ.

---

**ΔΙΚΑΤΕΡΙΝΗ (ΚΟΡΙΝΑ) ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ**  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΠΑΝ. ΠΑΤΡΩΝ

Ημερομηνία Εξέτασης: 26 Μαΐου 2014

το τεύχος της Διατριβής που περιλαμβάνει τις υπογραφές των μελών της Εξεταστικής Επιτροπής  
έχει κατατεθεί στη Βιβλιοθήκη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Δομοστατικής

---

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

---

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

**Ιωάννη Π. Σφήκα**

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π., Μ.Sc.

Η Διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου του Διδάκτορος Μηχανικού.

#### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΤΡΕΖΟΣ**  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.  
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

**ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΒΙΝΤΖΗΛΑΙΟΥ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

**ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

#### ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΤΡΕΖΟΣ**  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

**ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΒΙΝΤΖΗΛΑΙΟΥ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

**ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

**ΜΙΧΑΗΛ Φ. ΠΕΤΡΟΥ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΝ. ΚΥΠΡΟΥ

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΖΕΡΗΣ**  
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

**ΚΟΣΜΑΣ Κ. ΣΙΔΕΡΗΣ**  
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Π.Θ.

**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ (ΚΟΡΙΝΑ) ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ**  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΠΑΝ. ΠΑΤΡΩΝ

Αθήνα, Μάιος 2014





**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING**

Department of Structural Engineering

---

**INVESTIGATION OF  
SELF-COMPACTING CONCRETE PROPERTIES**

---

**DOCTORAL THESIS**

of

**Ioannis P. Sfikas**

Civil Engineer N.T.U.A., M.Sc.

This Thesis has been submitted to the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

ADVISORY COMMITTEE

**KONSTANTINOS G. TREZOS**  
ASST. PROFESSOR N.T.U.A.  
(SUPERVISOR)

**ELISAVET VINTZILAIU**  
PROFESSOR N.T.U.A.

**MICHAIL D. KOTSOVOS**  
PROFESSOR N.T.U.A.

EXAMINATION COMMITTEE

**KONSTANTINOS G. TREZOS**  
ASST. PROFESSOR N.T.U.A.

**ELISAVET VINTZILAIU**  
PROFESSOR N.T.U.A.

**MICHAIL D. KOTSOVOS**  
PROFESSOR N.T.U.A.

**MICHAIL F. PETROU**  
PROFESSOR UNIV. OF CYPRUS

**CHRISTOS ZERIS**  
ASSC. PROFESSOR N.T.U.A.

**KOSMAS K. SIDERIS**  
ASSC. PROFESSOR D.U.TH.

**AIKATERINI (KORINA) PAPANICOLAOU**  
ASSC. PROFESSOR UNIV. OF PATRAS

Athens, May 2014







Ιωάννης Π. Σφήκας  
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. M.Sc.

Copyright © Ιωάννης Π. Σφήκας, 2014.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Σε όσους με στήριξαν*

## Ευχαριστίες

Η διεξαγωγή και επιτυχής ολοκλήρωση της παρούσας Διατριβής δε θα ήταν δυνατή χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση, πρακτική βοήθεια και ουσιαστική υποστήριξη και καθοδήγηση ανθρώπων, οι οποίοι στάθηκαν στο πλευρό μου σε κάθε βήμα προς την επίτευξη του πλέον σημαντικού ακαδημαϊκού μου στόχου.

Αρχικά, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. **Κωνσταντίνο Τρέζο**, ο οποίος ήταν πάντοτε δίπλα μου, αρωγός στην πολυετή πορεία ολοκλήρωσης όλων των βαθμίδων των σπουδών μου, από το προπτυχιακό, κιάλας, επίπεδο. Με τις πλούσιες γνώσεις και την πολυετή εμπειρία του, την αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου παρείχε, το πάντοτε φιλικό περιβάλλον συνεργασίας που διασφάλιζε και τον διαρκώς καλό του λόγο, με βοήθησε να πιστεύω στις δυνάμεις και τις ικανότητές μου, να καταβάλω πάντα το μέγιστο της προσπάθειας και να ξεπερνάω επιτυχώς κάθε δύσκολο σταυροδρόμι της μακράς και επίπονης αυτής πορείας. Είμαι πεπεισμένος, ότι στα μεγαλύτερα κέρδη της Διατριβής συγκαταλέγεται η γνωριμία μου με αυτόν τον σπουδαίο Άνθρωπο, Δάσκαλο και Συνεργάτη (σκοπίμως κεφαλαία).

Ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου, Καθηγητές κ. **Ελισάβετ Βιντζηλαίου** και κ. **Μιχαήλ Κωτσοβό**. Με τις άρτιες επιστημονικές τους γνώσεις, τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις τους, αλλά και την εμπιστοσύνη και ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν ως συνεργάτη του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτέλεσαν καταλυτική δύναμη πίσω από κάθε προσπάθειά μου.

Για την εγκάρδια αποδοχή της πρόσκλησης συμμετοχής στην επταμελή επιτροπή εξέτασης της Διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Κύπρου κ. **Μιχαήλ Πέτρου**, τον Αναπ. Καθηγητή ΕΜΠ κ. **Χρήστο Ζέρη**, τον Αναπ. Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης κ. **Κοσμά Σίδερη** και την Επίκ. Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Πατρών κ. **Κορίνα Παπανικολάου**. Η συνεργασία μου με καθέναν ξεχωριστά, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διατριβής αποτέλεσε ουσιαστική βάση για τον εμπλουτισμό των επιστημονικών μου γνώσεων και την καλλιέργεια των ικανοτήτων μου.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω την δύναμη που αντλούσα από τις αδιαμφισβήτητα χρήσιμες συμβουλές, τα πάντοτε θετικά σχόλια και την αμέριστη συμπαράσταση του Ομότιμου Καθηγητή, κ. **Θεοδόσιου Τάσιου**. Είναι πραγματικά τεράστια η τιμή που νιώθω, έχοντας μαθήτευσει δίπλα σε αυτόν τον σπουδαίο Δάσκαλο και Φιλόσοφο, έστω και για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Πολλά είναι επίσης τα μέλη ΔΕΠ που βρίσκονταν στο πλάι μου σε όλη αυτή την προσπάθεια και αξίζουν πολλές ευχαριστίες. Ιδιαίτερα θα ήθελα ευχαριστήσω τον Λέκτορα ΧΜ κ. **Ευστράτιο Μπαδογιάννη** για την αξιόλογη και ιδιαίτερα παραγωγική επιστημονική συνεργασία που είχαμε τα τελευταία τρία χρόνια. Δε θα πρέπει να παραλείψω, επίσης, να αναφέρω τον τέως Αναπλ. Καθηγητή ΠΜ κ. **Στυλιανό Κόλλια**, τον Καθηγητή ΧΜ κ. **Γεώργιο Μπατή** και τον Λέκτορα ΠΜ κ. **Εμμανουήλ Βουγιούκα**.

Πολλές ευχαριστίες αξίζει να αποδοθούν στον συνάδελφο και φίλο **Αντώνιο Κανελλόπουλο**, πρώην Λέκτορα του Πανεπιστημίου Frederick της Κύπρου και νυν Ερευνητικό Συνεργάτη του Πανεπιστημίου του Cambridge. Η τύχη και η τιμή της γνωριμίας μου μαζί του δεν μπορεί να αποδοθεί σε μία μόνο παράγραφο. Η ανεκτίμητη βοήθειά του, μέσω απεριόριστων επιστημονικών συζητήσεων και μέσω

της ηθικής εμφύχωσης που συχνά μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διατριβής, συνέβαλλαν τα μέγιστα για το τελικό αποτέλεσμα.

Για την επιστημονική αλλά και έμπρακτη στήριξή τους, δε θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους Μηχανικούς (αλφαβητικά): κ.κ. **Νικόλαο Ζυγούρη, Χρήστο Καραγιάννη, Νικόλαο Μαρσέλλο, Ιωάννη Μπούσιο, Αντώνιο Σακελλαρίου και Μιλτιάδη Χρονόπουλο**, αλλά και τους εκπροσώπους της βιομηχανίας (επίσης αλφαβητικά): κ.κ. **Χρήστο Βογιατζή (Χάλυψ), Γεώργιο Γαραντζιώτη (BASF), Βασίλειο Καλοϊδά (Lafarge/ ΕΤΕΠ), Εμμανουήλ Κοντεκάκη (Interbeton), Χρήστο Λεπτοκαρύδη (Titan) και Νικόλαο Νικολαΐδη (Μάρμαρα Διονύσου).**

Ευχαριστίες οφείλονται στους συν-υποψήφιους (ή νυν) Διδάκτορες του ΕΩΣ/ΕΜΠ: **Χρυσή-Ελπίδα Αδάμη (ΠΜ), Βασιλική Αναγνωστοπούλου (ΠΜ), Κατιάνα Μανωλεδάκη (ΠΜ), Άννα Μηνά (ΠΜ), Βασιλική Παλιεράκη (ΠΜ), Κωνσταντίνο Χριστίδη (ΠΜ), Πέτρο Χρονόπουλο (ΠΜ)**, αλλά και άλλων Εργαστηρίων του ΕΜΠ: **Άρη Ασπρογέρακα (ΧΜ), Ερμιόνη Πάσιου (ΠΜ) και Αλέξανδρο Τσιτούρα (ΧΜ)**, αλλά και στους τέως προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές και νυν αξιόλογους συναδέλφους Μηχανικούς, χωρίς την προσωπική προσπάθεια και προθυμία των οποίων η διεξαγωγή των πειραμάτων θα ήταν αδύνατη (με χρονολογική σειρά): **Δημοσθένη Παύλου (ΠΜ), Μύρωνα Πάλμο (ΠΜ), Ελλάδα Σωτηροπούλου (ΠΜ), Σοφία Μπαγλατζή (ΠΜ), Αλέξανδρο Στύλο (ΠΜ), Χρήστο Πάσιο (ΠΜ), Κωνσταντίνο Ορφανόπουλο (ΠΜ), Κωνσταντίνο Μακρή (ΠΜ), Διαμάντω Σμαργιανάκη (ΠΜ) και Δήμητρα Βούκια (ΠΜ).**

Για την πολύτιμη βοήθειά τους στη διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος οφείλω να ευχαριστήσω τους τεχνικούς κ.κ. **Δημήτριο Πατσέλη, Παναγιώτη Παπανδρέου και Πάρη Μαρμαρά**, ενώ για την οργανωτική και γραμματειακή υποστήριξη σε κάθε μου βήμα και πίσω από κάθε ανάγκη και την εμπυχωτική της δράση την κ. **Λίντα Χρονοπούλου**.

Δε θα μπορούσα παρά να αφιερώσω μία ξεχωριστή παράγραφο για τη σύντροφό μου, κ. **Μάρθα Γιαννακάκη**, η οποία στάθηκε στο πλάι μου από την πρώτη στιγμή της επιλογής της έναρξης της Διατριβής, σε κάθε εύκολο ή δύσκολο στάδιο και μέχρι την ολοκλήρωσή της. Χωρίς την ανιδιοτελή και απεριόριστη υποστήριξή της δε θα ήταν δυνατή η επίτευξη του μακρόχρονου και απαιτητικού αυτού στόχου. Και χωρίς μία σπουδαία γυναίκα στο πλάι του, κανείς δεν μπορεί να είναι σπουδαίος.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και το κουράγιο που μου έδιναν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, σε μία αναμφίβολα δύσκολη περίοδο για όλους. Με την αγάπη, την υπομονή τους και την διαρκή υποστήριξή τους μου έδιναν τη δύναμη να συνεχίζω για την εκπλήρωση των υψηλών ακαδημαϊκών στόχων μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, **Πέτρο και Ηρώ**, για όλες τις θυσίες που έκαναν προκειμένου να μου δώσουν τη δυνατότητα να κάνω τα όνειρά μου πραγματικότητα. Επίσης, την αδερφή μου και το σύζυγό της, **Ελίνα και Γιώργο**, και τα αγαπημένα μου ανήψια, **Λίλα και Χρήστο**, γιατί απλά βρίσκονται διαρκώς στο πλάι μου και με στηρίζουν με την αγάπη και την υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

Κλείνοντας, θα ήθελα να τονίσω ότι όσοι συνάδελφοι φοιτητές ενδεχομένως αναζητήσουν πληροφορίες μέσα στο κείμενο της Διατριβής και αντιμετωπίσουν οποιαδήποτε δυσκολία είναι πάντοτε ευπρόσδεκτοι να επικοινωνήσουν μαζί μου.

Ιωάννης Π. Σφήκας



---

## Περιεχόμενα

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### Εισαγωγή

Σύντομη Περιγραφή - Σκοπός .....	2
Δομή Κεφαλαίων .....	2
Περιγραφή Πειραμάτων.....	3
Δημοσιεύσεις & Ενεργός Επιστημονική Συνεισφορά .....	7

### Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σύνοψη Κεφαλαίου .....	11
<b>1.1. Εισαγωγή .....</b>	<b>12</b>
1.1.1. Ορισμός.....	13
1.1.2. Σύντομη ιστορική αναδρομή .....	14
1.1.3. Σκοπός της χρήσης.....	16
1.1.4. Πλεονεκτήματα .....	16
1.1.5. Νέες απαιτήσεις .....	19
1.1.6. Διεθνή Συνέδρια.....	19
1.1.7. Κανονιστικά κείμενα – Οδηγίες .....	20
1.1.8. Παραδείγματα εφαρμογών.....	21
<b>1.2. Γενικά στοιχεία για το νωπό ΑΣΣ .....</b>	<b>23</b>
1.2.1. Ρεολογικές ιδιότητες .....	23
1.2.1.1. Ρεολογικό μοντέλο.....	23
1.2.1.2. Κύριες ιδιότητες.....	24
1.2.1.3. Ειδικές ρεολογικές δοκιμές.....	24
1.2.2. Συστατικά υλικά .....	36
1.2.2.1. Τσιμέντο.....	36
1.2.2.2. Πρόσμικτα.....	36
1.2.2.3. Αδρανή.....	43
1.2.2.4. Νερό αναμίξεως .....	44
1.2.2.5. Χημικά πρόσθετα.....	44
<b>1.3. Γενικά στοιχεία για το σκληρυμένο ΑΣΣ.....</b>	<b>45</b>
1.3.1. Μηχανικά Χαρακτηριστικά .....	45
1.3.1.1. Θλιπτική αντοχή .....	46
1.3.1.2. Εφελκυστική αντοχή.....	48
1.3.1.3. Καμπτική αντοχή .....	51
1.3.1.4. Αντοχή σε συνάφεια .....	51
1.3.1.5. Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες .....	71
1.3.2. Θέματα Ανθεκτικότητας .....	74
1.3.2.1. Γενικά.....	74
1.3.2.2. Διαπερατότητα .....	79
1.3.2.3. Χλωρίοντα.....	81
1.3.2.4. Αναλυτική παρουσίαση της βιβλιογραφίας.....	88
<b>1.4. Γενικά στοιχεία για επαναληψιμότητα - αναπαραγωγισιμότητα .....</b>	<b>98</b>

### Κεφάλαιο 2: Υλικά, Συνθέσεις & Δοκιμές – Ρεολογικές Ιδιότητες & Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Σύνοψη Κεφαλαίου .....	101
<b>2.1. Εισαγωγή .....</b>	<b>102</b>



<b>2.2. Περιγραφή Υλικών &amp; Συνθέσεων .....</b>	<b>104</b>
2.2.1. Υλικά παρασκευής μιγμάτων.....	104
2.2.1.1. Τσιμέντο.....	104
2.2.1.2. Πρόσμικτα.....	105
2.2.1.3. Αδρανή.....	107
2.2.1.4. Νερό αναμίξεως .....	109
2.2.1.5. Χημικά πρόσθετα.....	109
2.2.1.6. Χάλυβας σπλισμών .....	110
2.2.2. Συνθέσεις .....	111
2.2.2.1. Γενικές πληροφορίες.....	111
2.2.2.2. Περιγραφή συνθέσεων .....	112
2.2.2.3. Αναλυτικοί πίνακες συνθέσεων .....	113
2.2.2.4. Υπο-ομάδες συνθέσεων .....	117
2.2.2.5. Παρασκευή, Δειγματοληψία & Συντήρηση.....	121
<b>2.3. Περιγραφή Δοκιμών – Αποτελέσματα &amp; Σχολιασμός.....</b>	<b>122</b>
2.3.1. Δοκιμές νωπού σκυροδέματος.....	122
2.3.1.1. Συνοπτική παρουσίαση .....	122
2.3.1.2. Δοκιμές ρεολογίας .....	123
2.3.1.3. Συντελεστής μοναδιαίου βάρους .....	131
2.3.1.4. Χρόνος πήξης.....	132
2.3.1.5. Διεργαστηριακή αναπαραγωγιμότητα παρεμφερών μιγμάτων .....	135
2.3.2. Μηχανικές δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος.....	137
2.3.2.1. Συνοπτική παρουσίαση .....	137
2.3.2.2. Θλιπτική αντοχή .....	138
2.3.2.3. Εφελκυστική αντοχή.....	148
2.3.2.4. Καμπτική αντοχή .....	150
2.3.2.5. Συσχέτιση μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής.....	151
2.3.2.6. Αντοχή σε συνάφεια .....	156
2.3.2.7. Θερμική συμπεριφορά .....	157
2.3.3. Δοκιμές ανθεκτικότητας σκληρυμένου σκυροδέματος .....	165

### **Κεφάλαιο 3: Συμπεριφορά σε Συνάφεια**

<b>Σύνοψη Κεφαλαίου .....</b>	<b>167</b>
<b>3.1. Εισαγωγή .....</b>	<b>168</b>
3.1.1. Σκοπός κεφαλαίου .....	168
3.1.2. Περιγραφή μιγμάτων και δοκιμών.....	168
<b>3.2. Περιγραφή πειραματικών δοκιμών.....</b>	<b>170</b>
3.2.1. Περιγραφή δοκιμών .....	170
3.2.2. Πρότυπη δοκιμή εξόλκευσης.....	173
3.2.3. Καμπύλες τάσεων συνάφειας - ολισθήσεων.....	174
3.2.4. Αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας.....	176
<b>3.3. Αποτελέσματα &amp; Σχολιασμός .....</b>	<b>179</b>
3.3.1. Χαρακτηριστικά συνάφειας μέσω πρότυπων δοκιμών εξόλκευσης σε κυβικά δοκίμια .....	179
3.3.1.1. Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό .....	179
3.3.1.2. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	184
3.3.1.3. Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ....	194
3.3.1.4. Επιρροή τύπου σκυροδέματος (ΑΣΣ & ΣΣ) .....	197

3.3.2.	Επιρροή θέσης ράβδου καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών) .....	202
3.3.2.1.	Διάφορες συνθέσεις .....	204
3.3.2.2.	Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ....	217
3.3.2.3.	Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό .....	220
3.3.2.4.	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	226
3.3.3.	Επιρροή θέσης ράβδου κατά μήκος (απόσταση από σημείο έγχυσης). .....	238
3.3.3.1.	Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ....	239
3.3.3.2.	Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό .....	242
3.3.3.3.	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	249
3.3.4.	Επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος ...	255
3.3.4.1.	Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό .....	256
3.3.4.2.	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	258
3.3.5.	Επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος.....	259
3.3.5.1.	Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ....	261
3.3.5.2.	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	263
3.3.6.	Επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια .....	268
3.3.6.1.	Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ....	269
3.3.6.2.	Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό .....	270
3.3.6.3.	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	278
3.3.7.	Διεργαστηριακή Αναπαραγωγισιμότητα .....	286
3.3.7.1.	Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων .....	287
3.3.7.2.	Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις).....	290
3.3.7.3.	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου .....	291
3.3.7.4.	Συγκριτική αξιολόγηση χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ εργαστηρίων.....	293

## Κεφάλαιο 4: Θέματα Ανθεκτικότητας

<b>Σύνοψη Κεφαλαίου .....</b>	<b>295</b>
<b>4.1. Εισαγωγή .....</b>	<b>296</b>
4.1.1. Σκοπός κεφαλαίου .....	296
4.1.2. Συνοπτική περιγραφή δοκιμών & διερευνηθέντα μίγματα.....	297
<b>4.2. Περιγραφή πειραματικών δοκιμών και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....</b>	<b>298</b>
4.2.1. Διαπερατότητα σε νερό.....	298
4.2.1.1. Ανοιχτό πορώδες.....	299
4.2.1.2. Απορροφητικότητα .....	313
4.2.1.3. Υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη πίεση.....	330
4.2.1.4. Υδατοπερατότητα υπό σταθερή πίεση.....	357
4.2.2. Διαπερατότητα σε χλωριόντα .....	360
4.2.2.1. Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων (πρότυπη μέθοδος).....	361
4.2.2.2. Ειδική αντίσταση σκυροδέματος .....	377
4.2.2.3. Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων (μη πρότυπη μέθοδος).....	387
4.2.2.4. Ηλεκτρικό φορτίο .....	391

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

<b>Σύνοψη Κεφαλαίου</b> .....	<b>397</b>
<b>5.1. Σκοπός &amp; Σύντομη Περιγραφή Διατριβής</b> .....	<b>398</b>
<b>5.2. Πρωτοτυπία – Συμβολή</b> .....	<b>398</b>
<b>5.3. Σύνοψη συμπερασμάτων</b> .....	<b>399</b>
<b>5.4. Ρεολογία</b> .....	<b>401</b>
5.4.1. Δοκιμές νωπού σκυροδέματος.....	401
5.4.2. Χρόνος πήξης.....	402
5.4.3. Αναπαραγωγισιμότητα.....	402
<b>5.5. Μηχανικές αντοχές</b> .....	<b>402</b>
5.5.1. Θλιπτική αντοχή .....	402
5.5.2. Εφελκυστική αντοχή.....	403
5.5.3. Καμπτική αντοχή .....	403
5.5.4. Εφελκυστική αντοχή εν σχέσει προς τη θλιπτική αντοχή .....	403
5.5.5. Θερμική συμπεριφορά σκυροδέματος .....	404
5.5.6. Συμπεριφορά σε συνάφεια .....	404
5.5.6.1. Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων .....	404
5.5.6.2. Αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας.....	405
5.5.6.3. Μεταβολή συνάφειας καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών).....	406
5.5.6.4. Μεταβολή συνάφειας κατά μήκος (συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έγχυσης) .....	407
5.5.6.5. Επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος .....	407
5.5.6.6. Επιρροή σχετικών μετακινήσεων σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού κατά την πήξη του σκυροδέματος .....	408
5.5.6.7. Επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια .....	409
5.5.6.8. Διεργαστηριακή αναπαραγωγισιμότητα .....	409
<b>5.6. Ανθεκτικότητα</b> .....	<b>410</b>
5.6.1. Διαπερατότητα σε νερό.....	410
5.6.1.1. Ανοιχτό πορώδες.....	410
5.6.1.2. Απορροφητικότητα .....	412
5.6.1.3. Υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση .....	413
5.6.2. Διαπερατότητα σε χλωριόντα .....	414
5.6.2.1. Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων .....	414
5.6.2.2. Ειδική αντίσταση σκυροδέματος .....	415

## Βιβλιογραφία

Πρότυπα & Κανονισμοί.....	418
Οδηγίες.....	420
Βιβλία.....	420
Άρθρα σε Επιστημονικά Περιοδικά.....	421
Ανακοινώσεις σε Συνέδρια & Ημερίδες .....	426
Διάφορες Εργασίες .....	429

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίν. 1	Κατηγορίες κάθισης, εύρη τιμών και ανοχές για το ΣΣ.....	25
Πίν. 2	Συνοπτική παρουσίαση κυριότερων δοκιμών νωπού ΑΣΣ.....	25
Πίν. 3	Κατηγορίες εξάπλωσης.....	26
Πίν. 4	Κατηγορίες ιξώδους – $t_{500}$ .....	27
Πίν. 5	Οπτικός Δείκτης Σταθερότητας – Ερμηνεία & Κριτήρια.....	28
Πίν. 6	Κατηγορίες ιξώδους – Χοάνη V.....	29
Πίν. 7	Κατηγορίες διελυσιμότητας – Δοχείο L.....	30
Πίν. 8	Κατηγορίες αντίστασης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης.....	33
Πίν. 9	Κατηγορίες διελυσιμότητας – Δακτύλιος J.....	34
Πίν. 10	Βαθμός αντίστασης σε στατική απόμιξη.....	35
Πίν. 11	Τύποι πρόσμικτων ανάλογα με τη δράση τους.....	36
Πίν. 12	Προτεινόμενη περιεκτικότητα πυριτικής παιπάλης, ανάλογα με τον τύπο σκυροδέματος...38	
Πίν. 13	Εμπειρικές σχέσεις έμμεσου υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής.....	49
Πίν. 14	Εμπειρικές σχέσεις έμμεσου υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής, ανάλογα με τύπο σκυροδέματος και συστατικά υλικά.....	50
Πίν. 15	Περίπτωση διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων.....	75
Πίν. 16	Παράγοντες που επηρεάζουν τη χημική προσβολή του σκυροδέματος.....	78
Πίν. 17	Αντιστοίχιση τύπου τσιμέντου με πραγματοποιηθείσες συνθέσεις.....	104
Πίν. 18	Φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση (% w/w) ασβεστολιθικού φίλερ.....	105
Πίν. 19	Σύγκριση φυσικών ιδιοτήτων και χημικής σύστασης ασβεστολιθικού φίλερ που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του ΕΔΥ/ΠΚ.....	105
Πίν. 20	Αντιστοίχιση τύπου πυριτικής παιπάλης με παρασκευασθείσα σύνθεση.....	106
Πίν. 21	Φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση πυριτικής παιπάλης.....	106
Πίν. 22	Σύγκριση φυσικών ιδιοτήτων και χημικής σύστασης πυριτικής παιπάλης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του ΕΔΥ/ΠΚ.....	106
Πίν. 23	Χημική ανάλυση (% w/w) καολίνη ( $k$ ) και φυσικές ιδιότητες μετακαολίνη ( $mk$ ).....	106
Πίν. 24	Φυσικές ιδιότητες αδρανών.....	107
Πίν. 25	Διάμετρος, διατομή και μάζα ράβδων οπλισμού (ονομαστικής διαμέτρου $d_{nom} = 16mm$ ).....	111
Πίν. 26	Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα ράβδων οπλισμού (κατηγορίας B500C).....	111
Πίν. 27	Γεωμετρία επιφανειακών και εγκάρσιων νευρώσεων ράβδων οπλισμού ( $d_{nom} = 16mm$ ).....	111
Πίν. 28	Συνοπτική παρουσίαση πραγματοποιηθέντων μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC).....	113
Πίν. 29	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΑΣΣ (SCC-01 έως 08).....	114
Πίν. 30	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΑΣΣ (SCC-09 έως 19).....	114
Πίν. 31	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΑΣΣ (SCC-20 έως 30).....	115
Πίν. 32	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΑΣΣ (SCC-31 έως 42).....	115
Πίν. 33	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΑΣΣ (SCC-43 έως 54).....	116
Πίν. 34	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΣΣ (NVC-01 έως 10).....	116
Πίν. 35	Συστατικά, λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό, αντοχές, συντελεστές μοναδιαίου βάρους και κόστος συνθέσεων ΣΣ (NVC-11 έως 16).....	117
Πίν. 36	Συνοπτική περιγραφή υπο-ομάδων συνθέσεων.....	117
Πίν. 37	Υπο-ομάδα συνθέσεων Α: επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό σε μίγματα ΑΣΣ.....	118
Πίν. 38	Υπο-ομάδα συνθέσεων Β1: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε μίγματα ΑΣΣ.....	118
Πίν. 39	Υπο-ομάδα συνθέσεων Β2: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε μίγματα ΑΣΣ & μίγμα αναφοράς ΣΣ.....	118
Πίν. 40	Υπο-ομάδα συνθέσεων Γ: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη σε μίγματα ΑΣΣ.....	118

Πίν. 41	Υπο-ομάδα συνθέσεων Δ: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη σε μίγματα ΑΣΣ.....	119
Πίν. 42	Υπο-ομάδα συνθέσεων Ε: επιρροή ποσοστού υπερρευστοποιητή κ.β συνδετικού υλικού σε μίγματα ΣΣ.....	119
Πίν. 43	Υπο-ομάδα συνθέσεων Ζ1: μίγματα ΑΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή .....	119
Πίν. 44	Υπο-ομάδα συνθέσεων Ζ2: μίγματα ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή .....	119
Πίν. 45	Υπο-ομάδα συνθέσεων Η1: μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρασκευασθέντα στο ΕΩΣ/ΕΜΠ.....	120
Πίν. 46	Υπο-ομάδα συνθέσεων Η2: μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρασκευασθέντα στο ΕΔΥ/ΠΚ .....	120
Πίν. 47	Πλήθος μετρήσεων, μετρούμενη κύρια ιδιότητα και πρότυπη μέθοδος ανά πραγματοποιηθείσα δοκιμή νωπού σκυροδέματος.....	122
Πίν. 48	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC (2005) για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-01 έως SCC-07).....	124
Πίν. 49	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC (2005) για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-08 έως SCC-17).....	125
Πίν. 50	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC (2005) για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-18 έως SCC-31) .....	125
Πίν. 51	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC (2005) για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-32 έως SCC-46).....	126
Πίν. 52	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC (2005) για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-47 έως SCC-54).....	126
Πίν. 53	Αποτελέσματα δοκιμών κάθισης και κατάταξη σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1 (2000) για τα μίγματα ΣΣ (NVC-01 έως NVC-09).....	127
Πίν. 54	Αποτελέσματα δοκιμών κάθισης και κατάταξη σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1 (2000) για τα μίγματα ΣΣ (NVC-10 έως NVC-16).....	127
Πίν. 55	Συντελεστές καμπυλών δυνάμεως, αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης και χρόνοι πήξης.....	134
Πίν. 56	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη υπο-ομάδας συνθέσεων Η1, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο διεργαστηριακών συγκρίσεων μεταξύ ΕΩΣ/ΕΜΠ και ΕΔΥ/ΠΚ .....	135
Πίν. 57	Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη υπο-ομάδας συνθέσεων Η2, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο διεργαστηριακών συγκρίσεων μεταξύ ΕΩΣ/ΕΜΠ και ΕΔΥ/ΠΚ .....	135
Πίν. 58	Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών .....	138
Πίν. 59	Καμπύλες της βιβλιογραφίας της γραμμικής παλινδρόμησης που αφορούν στην επιρροή του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή .....	144
Πίν. 60	Καμπύλες της βιβλιογραφίας που αφορούν στην επιρροή του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή – Σύγκριση με καμπύλες κανονισμών .....	156
Πίν. 61	Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών που αφορούν σε θέματα συνάφειας .....	156
Πίν. 62	Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών ιδιοτήτων ανθεκτικότητας.....	166
Πίν. 63	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων που ελέγχθηκαν ως προς τη συνάφεια με τον χάλυβα..	169
Πίν. 64	Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (υπο-ομάδα συνθέσεων Α, συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ ).....	169
Πίν. 65	Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (υπο-ομάδα συνθέσεων Β1, συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ ).....	169
Πίν. 66	Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (υπο-ομάδα συνθέσεων Β2, συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ ).....	170
Πίν. 67	Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (υπο-ομάδα συνθέσεων Ε, συνθέσεις ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ ) .....	170
Πίν. 68	Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (επιλεγμένα μίγματα από υπο-ομάδες συνθέσεων Β1 και Η2).....	170
Πίν. 69	Τύπος αστοχίας και διαρροή χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόγκευσης κυβικών δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	182
Πίν. 70	Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές, $m$ , και τυπικές αποκλίσεις, $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμών) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .	182
Πίν. 71	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόγκευσης κυβικών δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ .....	184

Πίν. 72	Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές, $m$ , και τυπικές αποκλίσεις, $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμών) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ .	190
Πίν. 73	Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές, $m$ , και τυπικές αποκλίσεις, $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμών) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ .	191
Πίν. 74	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμών, ανά σύνθεση ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ και μίγματος αναφοράς NVCSF.....	196
Πίν. 75	Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές, $m$ , και τυπικές αποκλίσεις, $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμών) μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .	197
Πίν. 76	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κατακόρυφων δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	219
Πίν. 77	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (πρωτογενείς τιμές) και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ και μίγματος αναφοράς NVCSF, για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο.....	220
Πίν. 78	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (εκτιμώμενες τιμές) μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο .....	220
Πίν. 79	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κατακόρυφων δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	223
Πίν. 80	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (πρωτογενείς τιμές) και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο .....	224
Πίν. 81	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (εκτιμώμενες τιμές) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο .....	224
Πίν. 82	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κατακόρυφων δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ .....	232
Πίν. 83	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (πρωτογενείς τιμές) και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο .....	234
Πίν. 84	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (εκτιμώμενες τιμές) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο .....	234
Πίν. 85	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμών, ανά σύνθεση ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	241
Πίν. 86	Χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	241
Πίν. 87	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης οριζόντιων δοκιμών, ανα σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	242
Πίν. 88	Χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	245
Πίν. 89	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο.....	249
Πίν. 90	Χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ .....	252
Πίν. 91	Τύπος αστοχίας και διαρροή χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	261
Πίν. 92	Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμών, ανα σύνθεση ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	262
Πίν. 93	Τιμές πίεσης διείδυσης και χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	262
Πίν. 94	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο.....	263
Πίν. 95	Τιμές πίεσης διείδυσης και χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ .....	264
Πίν. 96	Μέγιστη θερμοκρασία-στόχος κατά τη θερμική καταπόνηση και τύπος αστοχίας κατά της δοκιμή εξόλκευσης, ανά σύνθεση.....	269
Πίν. 97	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , για τα δοκίμια C4 και C5, τα οποία καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες.....	270
Πίν. 98	Μέγιστη θερμοκρασία-στόχος κατά τη θερμική καταπόνηση και τύπος αστοχίας κατά της δοκιμή εξόλκευσης, ανά σύνθεση.....	270

Πίν. 99	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ , για τα δοκίμια C4 και C5, τα οποία καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες.....	274
Πίν. 100	Μέγιστη θερμοκρασία-στόχος κατά τη θερμική καταπόνηση και τύπος αστοχίας κατά της δοκιμή εξόλκευσης, ανά σύνθεση.....	279
Πίν. 101	Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ , για τα δοκίμια C4 και C5, τα οποία καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες.....	282
Πίν. 102	Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (επιμέρους τιμές δύο ή τριών δοκιμών, 1 έως 3, αντίστοιχες μέσες τιμές, $m$ , και συντελεστές διακύμανσης, $con$ ) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που παρασκευάστηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ (NTUA) και στο ΕΔΥ/ΠΚ (UCY) .....	290
Πίν. 103	Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών ιδιοτήτων ανθεκτικότητας.....	297
Πίν. 104	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς το ανοιχτό πορώδες, $p$ (%) .....	301
Πίν. 105	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ανοιχτού πορώδους, $p_{calc}$ (%), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών.....	302
Πίν. 106	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ανοιχτού πορώδους, $p_{calc}$ (%), συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης .....	303
Πίν. 107	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ανοιχτού πορώδους, $p_{calc}$ (%), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών.....	309
Πίν. 108	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την υδαταπορροφητικότητα τους μέσω της μεθόδου της τριχοειδούς απορρόφησης.....	316
Πίν. 109	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού απορροφητικότητας, $S_{calc}$ ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$ και $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$ και $\beta_j^*$ ) .....	320
Πίν. 110	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού απορροφητικότητας, $S_{calc}$ ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών.....	327
Πίν. 111	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την υδαταπορροφητικότητά τους μέσω της μεθόδου διείσδυσης ύδατος υπό πίεση (GWT-4000). .....	334
Πίν. 112	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού χρόνου εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm,calc}$ ( $T_{atm}$ σε s), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$ και $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$ και $\beta_j^*$ ) .....	340
Πίν. 113	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού του συντελεστή υδατοπερατότητας, $c_{calc}$ ( $\times 10^{-3}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$ και $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$ και $\beta_j^*$ ) .....	341
Πίν. 114	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού χρόνου εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm,calc}$ ( $T_{atm}$ σε s), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών.....	353
Πίν. 115	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας, $c_{calc}$ ( $\times 10^{-3}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών .....	353
Πίν. 116	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την υδατοπερατότητά τους υπό σταθερή πίεση. ....	358
Πίν. 117	Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων κατά Stanish (1997) .....	360
Πίν. 118	Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής .....	362
Πίν. 119	Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων για διάφορους τύπου σκυροδέματος βάσει της διάχυσης χλωριόντων 28 ημερών .....	365
Πίν. 120	Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων για διάφορους τύπου σκυροδέματος βάσει της διάχυσης χλωριόντων 28 ημερών .....	365
Πίν. 121	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων μέσω της επιταχυνόμενης μεθόδου NordTest Build 492 (1999). .....	366
Πίν. 122	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm,calc}$ ( $\times 10^{-12}$ $\text{m}^2/\text{s}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$ και $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$ και $\beta_j^*$ ).....	371

Πίν. 123	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm,calc}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών.....	375
Πίν. 124	Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της ειδικής αντίστασης.....	378
Πίν. 125	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ειδικής αντίστασης, $\rho_{calc}$ (kΩ-cm), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$ και $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$ και $\beta_j^*$ ).....	382
Πίν. 126	Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ειδικής αντίστασης, $\rho_{calc}$ (kΩ-cm), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών.....	385
Πίν. 127	Συγκριτική παράθεση παραμέτρων δοκιμών διαπερατότητας σε χλωριόντα.....	388
Πίν. 128	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν συγκριτικά ως προς την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων μέσω των επιταχυνόμενων δοκιμών: (α) RCTP [ASTM C 1202 (2009)] και (β) NordTest Build 492 (1999) (πρότυπη και παραλλαγμένη μέθοδος).....	388
Πίν. 129	Ικανότητα διείσδυσης χλωριόντων συναρτήσει διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου.....	392

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 1	Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων.....	3
Σχ. 2	Βασικοί άξονες Διδακτορικής Διατριβής.....	4
Σχ. 3	Εναέρια πεζογέφυρα (I-4), Ορλάντο, Φλόριντα, ΗΠΑ.....	21
Σχ. 4	Εθνικό Μουσείο Ινδο-Αμερικανών, Ουάσινγκτον, Κολούμπια, ΗΠΑ.....	21
Σχ. 5	Παραγωγή διπλών Τ, Εμπορικά Προϊόντα Σκυροδέματος, Chambersburg, Πενσυλβανία, ΗΠΑ.....	21
Σχ. 6	Κέντρο Σύγχρονης Τέχνης Ρόζενταλ, Σινσινάτι, Οχάιο.....	22
Σχ. 7	Εργαστηριακά τοιχία, Πανεπιστήμιο Σέρμπρουκ, Κεμπέκ, Καναδάς.....	22
Σχ. 8	Βάσεις αγκύρωσης γέφυρας Akashi-Kaikyo, Ιαπωνία.....	22
Σχ. 9	Γέφυρα Ritto (τμήμα αυτοκινητόδρομου διπλής κατευθύνσεως).....	22
Σχ. 10	Ομόκεντρα κυκλικά τοιχία στο Κέντρο Τέχνης Meudon.....	22
Σχ. 11	(α) Τοιχίο στη Χάγη, (β) Στάδιο στο Άμστερνταμ, (γ) Τόξα.....	23
Σχ. 12	Ρεολογικό μοντέλο Bingham.....	23
Σχ. 13	Εξοπλισμός δοκιμής εξάπλωσης.....	26
Σχ. 14	Ενδεικτικές περιπτώσεις απόδοσης ΟΔΣ σε μίγματα ΑΣΣ.....	28
Σχ. 15	Εξοπλισμός δοκιμής χοάνης V.....	29
Σχ. 16	Εξοπλισμός δοκιμής δοχείου L.....	30
Σχ. 17	Εξοπλισμός δοκιμής δοχείου U.....	31
Σχ. 18	(α) Εξοπλισμός δοκιμής απόμιξης στήλης σκυροδέματος, (β) Εξοπλισμός δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης.....	32
Σχ. 19	Εξοπλισμός δοκιμής δακτυλίου J.....	34
Σχ. 20	Εξοπλισμός δοκιμής διείσδυσης.....	35
Σχ. 21	Σύγκριση σωματιδίων πυριτικής παιπάλης με σωματίδια τσιμέντου στον ίδιο βαθμό μεγέθυνσης.....	39
Σχ. 22	Σωματίδια μετακαολίνη.....	41
Σχ. 23	Επίδραση διαφορετικών ποσοστών ιπτάμενης τέφρας στη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ με περιεκτικότητα τσιμέντου (α) 550 kg/m <sup>3</sup> και (β) 450 kg/m <sup>3</sup> .....	47
Σχ. 24	Επίδραση διαφορετικών ποσοστών πυριτικής παιπάλης στη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ με περιεκτικότητα τσιμέντου (α) 550 kg/m <sup>3</sup> και (β) 450 kg/m <sup>3</sup> .....	47
Σχ. 25	Σύγκριση αποτελεσμάτων βιβλιογραφίας συσχέτισης εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και θλιπτικής αντοχής με κανονιστικές καμπύλες του Ευρωκώδικα 2.....	48
Σχ. 26	Σύγκριση πειραματικών καμπυλών συσχέτισης εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και θλιπτικής αντοχής με καμπύλες κανονισμών και προγενέστερων εργασιών.....	49
Σχ. 27	Εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με ενσωματωμένο ασβεστολιθικό φίλερ, σε ηλικία (α) 7 ημερών και (β) 28 και 90 ημερών.....	50
Σχ. 28	Επίδραση στην μέση αντοχή σε συνάφεια (α) της θλιπτικής αντοχής, (β) της διαμέτρου της ράβδου οπλισμού, (γ) της επικάλυψης σκυροδέματος της ράβδου οπλισμού, του ποσοστού οπλισμού κορμού.....	57
Σχ. 29	Ανηγμένη αντοχή σε συνάφεια για διάφορους χρόνους δόνησης (α) σε ΣΣ, (β) σε ΑΣΣ, (γ) σε Σκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητας (δ) συγκριτικά.....	58



Σχ. 30	Διατάξεις για τη διερεύνηση (α) της επιρροής της θέσης ράβδου καθ' ύψος και (β) της διεύθυνσης φόρτισης εν σχέσει προς τη φορά σκυροδέτησης.....	59
Σχ. 31	Ανηγμένη αντοχή σε συνάφεια για δύο διαφορετικές διαμέτρους ράβδων οπλισμού για διάφορους τύπου και κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος.....	60
Σχ. 32	Μέγιστη τάση συνάφειας συναρτήσει του υποκείμενου πάχους σκυροδέματος (α) πρωτογενή δεδομένα, (β) γενική τάση.....	62
Σχ. 33	Αντοχή σε συνάφεια συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής: σύγκριση δεδομένων από τη βιβλιογραφία.....	62
Σχ. 34	Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης σε χαμηλό υποστύλωμα για τη διερεύνηση του φαινομένου άνω οπλισμών .....	63
Σχ. 35	Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης σε χαμηλό υποστύλωμα για τη διερεύνηση της φοράς σκυροδέτησης και του φαινομένου άνω οπλισμών .....	64
Σχ. 36	Ανηγμένη (α) μέση και (β) μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος .....	65
Σχ. 37	Ανηγμένη (α) μέση και (β) μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με τον τύπο του σκυροδέματος και τη διάμετρο της ράβδου οπλισμού.....	66
Σχ. 38	(α) Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης σε οριζόντιο δοκίμιο με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο και (β) μεταβολή ανηγμένης τάσης συνάφειας κατά μήκος του δοκιμίου για τα διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ.....	67
Σχ. 39	(α) Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης και (β) μεταβολή ανηγμένης τάσης συνάφειας συναρτήσει της ηλικίας και της θέσης του οπλισμού καθ' ύψος για τα διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ.....	68
Σχ. 40	Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας για διάφορες διαμέτρους ράβδων οπλισμού και για διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ.....	68
Σχ. 41	Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας για διάφορες διαμέτρους ράβδων οπλισμού, ενεργά μήκη συνάφειας και για διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ.....	70
Σχ. 42	Μοντέλο έναρξης-διασποράς διάβρωσης του Tuutti (Initiation-Propagation Model) .....	85
Σχ. 43	Διαδικασία διάβρωσης: ρηγμάτωση και αποφλοίωση σκυροδέματος .....	86
Σχ. 44	Όγκος προϊόντων διάβρωσης.....	86
Σχ. 45	Σύγκριση απορροφητικότητας μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ (α) κατηγορίας αντοχής C40 .....	88
Σχ. 46	Διαπερατότητα σε χλωριόντα μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετικά πρόσμικτα σε δύο ηλικίες, 28 και 90 ημέρες.....	89
Σχ. 47	(α) Πειραματική διάταξη κύκλων εμφάνισης σε διάλυμα χλωριόντων, (β) τυπικό προφίλ βάθους διείσδυσης χλωριόντων σε δοκίμιο.....	90
Σχ. 48	(α) Αθροιστική υδαταπορρόφηση, (β) απορροφητικότητα συναρτήσει της ηλικίας για μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα διαφορετικών τύπων .....	91
Σχ. 49	(α) Απορροφητικότητα και (β) συντελεστής διάχυσης χλωριόντων συναρτήσει της κατηγορίας αντοχής μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ.....	92
Σχ. 50	Ηλεκτρικό φορτίο, ως δείκτης ικανότητας αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από διάφορα πρόσμικτα .....	93
Σχ. 51	Συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών δεικτών .....	94
Σχ. 52	Επιρροή διαφορετικών ποσοστών αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη για διαφορετικούς λόγους νερού προς συνδετικό υλικό και για διαφορετικές μεθόδους συντήρησης στον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων .....	96
Σχ. 53	Συσχετίσεις ηλεκτρικής αντίστασης και απορροφητικότητας με τη θλιπτική αντοχή .....	98
Σχ. 54	Κοκκομετρικές καμπύλες λεπτόκοκκων υλικών (τσιμέντο, πυριτική παιπάλη, μετακαολίνης, ασβεστολιθικό φίλερ) .....	104
Σχ. 55	Μέσες κοκκομετρικές καμπύλες κλασμάτων αδρανών .....	108
Σχ. 56	Πραγματικές κοκκομετρικές καμπύλες κλασμάτων αδρανών.....	108
Σχ. 57	Σύγκριση αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του ΕΔΥ/ΠΚ.....	109
Σχ. 58	Τυπικό σκαρίφημα ράβδου και συμβολισμοί .....	110
Σχ. 59	Τυπική ράβδος οπλισμού B500C, ονομαστικής διαμέτρου $d_{nom} = 16$ mm .....	110
Σχ. 60	Σύγκριση μιγμάτων αδρανών που εφαρμόστηκαν κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων σκυροδέματος μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του Πανεπιστημίου της Κύπρου .....	120
Σχ. 61	Συσχέτιση μεταξύ εξαπλώσεων υπό εμποδιζόμενη και ανεμπόδιστη ροή (30 μίγματα ΑΣΣ) .....	128
Σχ. 62	Συσχέτιση μεταξύ χρόνου εκροής $t_v$ και χρόνου ροής $t_{500}$ (50 μίγματα ΑΣΣ).....	129

Σχ. 63	Συσχέτιση μεταξύ χρόνου εκροής $t_v$ 5 min και χρόνου ροής $t_{500}$ (50 μίγματα ΑΣΣ).....	130
Σχ. 64	Συσχέτιση μεταξύ χρόνων εκροής $t_v$ και $t_v$ 5 min (51 μίγματα ΑΣΣ).....	130
Σχ. 65	Αντίσταση διείσδυσης βελόνας σε σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου από την έναρξη της ενυδάτωσης.....	133
Σχ. 66	Χρόνοι έναρξης και λήξης πήξης συναρτήσει της περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή ( <i>pce</i> ).....	134
Σχ. 67	Θλιπτική αντοχή, $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> ), συναρτήσει του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό, $w/b$ .....	139
Σχ. 68	Θλιπτική αντοχή, $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> ), συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, $sf/b$ (% κ.β.).....	139
Σχ. 69	Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή.....	140
Σχ. 70	Ποιοτική συνεισφορά τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης στη θλιπτική αντοχή για σταθερή περιεκτικότητα συνδετικού υλικού ( $b = c + sf$ ).....	141
Σχ. 71	Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς νερό στην θλιπτική αντοχή.....	142
Σχ. 72	Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή.....	143
Σχ. 73	Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή (σύγκριση με καμπύλες βιβλιογραφίας).....	144
Σχ. 74	Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή (σύγκριση με καμπύλες βιβλιογραφίας).....	145
Σχ. 75	Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ στην θλιπτική αντοχή 28 ημερών.....	146
Σχ. 76	Προσδιορισμός συντελεστή αναγωγής μέσης θλιπτικής αντοχής μεταξύ δοκιμίων ακμής 150 mm με συντήρηση σε αέρα και δοκιμίων ακμής 100 mm με συντήρηση σε νερό.....	147
Σχ. 77	Διεργαστηριακή σύγκριση μέσης θλιπτικής αντοχής, $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Z1 και Z2) σε ηλικία 28 ημερών.....	147
Σχ. 78	Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως αντικατάσταση τσιμέντου στην εφελκυστική αντοχή 28 ημερών – Σύγκριση με καμπύλες βιβλιογραφίας.....	149
Σχ. 79	Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ στην εφελκυστική αντοχή 28 ημερών.....	149
Σχ. 80	Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως αντικατάσταση τσιμέντου στην καμπτική αντοχή 28 ημερών.....	150
Σχ. 81	Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ στην καμπτική αντοχή 28 ημερών.....	151
Σχ. 82	Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για όλα τα μίγματα ΑΣΣ – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες του Ευρωκώδικα 2.....	152
Σχ. 83	Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ χωρίς πρόσμικτα – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού.....	152
Σχ. 84	Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα τύπου Ι (ασβεστολιθικό φίλερ) – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού.....	153
Σχ. 85	Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα τύπου ΙΙ (πυριτική παιπάλη) – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού.....	154
Σχ. 86	Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με συνδυασμό πρόσμικτων τύπου Ι και ΙΙ (ασβεστολιθικό φίλερ και μετακαολίνης) – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού.....	154
Σχ. 87	Εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα με προσθήκη μετακαολίνης ως αντικατάσταση τσιμέντου ή ασβεστολιθικού φίλερ – Σύγκριση με βιβλιογραφία.....	155
Σχ. 88	Θερμοκρασιακή καμπύλη εφαρμοζόμενων θερμοκρασιών πυριαντηρίου.....	157
Σχ. 89	Πειραματική διάταξη καταγραφής εσωτερικών θερμοκρασιών κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος.....	158
Σχ. 90	Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 35 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (μεταβλητός λόγος $mk/b$ ) ...	159
Σχ. 91	Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 50 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (μεταβλητός λόγος $mk/b$ ) ...	159
Σχ. 92	Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 75 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (μεταβλητός λόγος $mk/b$ ) ...	160

Σχ. 93	Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 35 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (μεταβλητός λόγος $mk/\{mk+lp\}$ ) .....	160
Σχ. 94	Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 50 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (μεταβλητός λόγος $mk/\{mk+lp\}$ ) .....	161
Σχ. 95	Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 75 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (μεταβλητός λόγος $mk/\{mk+lp\}$ ) .....	161
Σχ. 96	Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης $mk/b$ κατά τη χρονική στιγμή Β (επίτευξη θερμοκρασίας-στόχου πυριαντηρίου) .....	162
Σχ. 97	Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης $mk/b$ κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 30 min) .....	163
Σχ. 98	Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης $mk/b$ κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 60 min) .....	163
Σχ. 99	Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης $mk/(mk+lp)$ κατά τη χρονική στιγμή Β (επίτευξη θερμοκρασίας-στόχου πυριαντηρίου) .....	164
Σχ. 100	Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης $mk/(mk+lp)$ κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 30 min) .....	164
Σχ. 101	Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης $mk/(mk+lp)$ κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 60 min) .....	165
Σχ. 102	Ξυλότυποι (α) κυβικών δοκιμίων, (β) οριζόντιου δοκιμίου, (γ) κατακόρυφου δοκιμίου μεγάλου ύψους και (δ) κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους .....	171
Σχ. 103	Διαστάσεις και διατάξεις δοκιμίων συνάφειας .....	172
Σχ. 104	Διάταξη και περιγραφή εξαρτημάτων δοκιμής εξόλκευσης .....	173
Σχ. 105	Διάταξη δοκιμής εξόλκευσης: (α) εφελκόμενο άκρο ράβδου (β) άτονο άκρο ράβδου .....	173
Σχ. 106	Τυπικές καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλους τους τύπους δοκιμίων .....	174
Σχ. 107	Τυπικές καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλους τους τύπους δοκιμίων (κυβικά, οριζόντια, κατακόρυφα) .....	175
Σχ. 108	Ανάλυτική σχέση τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων υπό μονοτονική φόρτιση .....	175
Σχ. 109	Ορισμός αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας .....	177
Σχ. 110	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB1 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	179
Σχ. 111	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB2 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	180
Σχ. 112	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB3 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	180
Σχ. 113	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB4 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	181
Σχ. 114	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB5 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	181
Σχ. 115	Επιρροή λόγου $w/b$ στις ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας, $t/f_{cc}$ .....	183
Σχ. 116	Επιρροή λόγου $w/b$ στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας .....	183
Σχ. 117	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF1 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	185
Σχ. 118	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF2 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	185
Σχ. 119	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF3 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	186
Σχ. 120	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF4 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	186

Σχ. 121	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF5 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	187
Σχ. 122	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF6 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	187
Σχ. 123	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF7 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	188
Σχ. 124	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF8 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	188
Σχ. 125	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF9 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	189
Σχ. 126	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF10 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	189
Σχ. 127	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF11 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	190
Σχ. 128	Επιρροή λόγου $sf/b$ (υπο-ομάδα συνθέσεων B1) στις ανηγμένες τάσεις συνάφειας, $\tau/f_{cc}$ ..	192
Σχ. 129	Επιρροή λόγου $sf/b$ (υπο-ομάδα συνθέσεων B2) στις ανηγμένες τάσεις συνάφειας, $\tau/f_{cc}$ ..	192
Σχ. 130	Επιρροή λόγου $sf/b$ στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας, $s_{tmax}$ ..	193
Σχ. 131	Επιρροή λόγου $sf/b$ στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας, $s_{tmax}$ ..	193
Σχ. 132	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC000 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	194
Σχ. 133	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC013 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	194
Σχ. 134	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC025 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	195
Σχ. 135	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC050 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	195
Σχ. 136	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVCSF – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	196
Σχ. 137	Επιρροή λόγου $pce/b$ στην ανηγμένη κρίσιμη τάση συνάφειας, $\tau_{0,25}/f_{cc}^{0.5}$ ..	198
Σχ. 138	Επιρροή λόγου $pce/b$ στην ανηγμένη μέση τάση συνάφειας, $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$ ..	198
Σχ. 139	Επιρροή λόγου $pce/b$ στην ανηγμένη μέση τάση συνάφειας με ολοκλήρωση, $\tau_{m,int}/f_{cc}^{0.5}$ ..	199
Σχ. 140	Επιρροή λόγου $pce/b$ στην ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας, $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ ..	199
Σχ. 141	Σύγκριση αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας και ολισθήσεων μεταξύ μγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ ίδιου λόγου $w/b$ (0.51) ή ίδιας μέσης θλιπτικής αντοχής $f_{cc}$ (~ 50 N/mm <sup>2</sup> ) ....	201
Σχ. 142	Σύγκριση αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας και ολισθήσεων μεταξύ μγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ με μίγμα αναφοράς ΣΣ ίδιου λόγου $w/b$ (0.62) .....	202
Σχ. 143	Γραφική απεικόνιση διαδικασίας ανάλυσης κατακόρυφων δοκιμίων .....	203
Σχ. 144	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC05.....	204
Σχ. 145	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC06.....	205
Σχ. 146	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC07.....	205
Σχ. 147	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC08.....	206

Σχ. 148	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC10.....	206
Σχ. 149	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC11.....	207
Σχ. 150	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC12.....	207
Σχ. 151	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC13.....	208
Σχ. 152	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μεγάλου ύψους της σύνθεσης NVC02.....	209
Σχ. 153	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μεγάλου ύψους της σύνθεσης NVC04.....	209
Σχ. 154	Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) κρίσιμων και (β) μέσων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μεγάλου ύψους για διάφορες συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ.....	210
Σχ. 155	Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μεγάλου ύψους για διάφορες συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ.....	211
Σχ. 156	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B2 (σε απόσταση 0.30 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω ράβδου – Σύγκριση με ΣΣ.....	212
Σχ. 157	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B3 (σε απόσταση 0.50 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	213
Σχ. 158	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B4 (σε απόσταση 0.70 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	213
Σχ. 159	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B5 (σε απόσταση 0.90 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	214
Σχ. 160	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B6 (σε απόσταση 1.10 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	214
Σχ. 161	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B7 (σε απόσταση 1.30 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	215
Σχ. 162	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B8 (σε απόσταση 1.50 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	215
Σχ. 163	Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B9 (σε απόσταση 1.70 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ.....	216
Σχ. 164	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης NVC000– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	217
Σχ. 165	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης NVC013– Σύγκριση με καμπύλες MC2010 και βιβλιογραφίας.....	217
Σχ. 166	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης NVC050– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	218
Σχ. 167	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης NVCSF– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	218
Σχ. 168	Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	219
Σχ. 169	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	221

Σχ. 170	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	221
Σχ. 171	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	222
Σχ. 172	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	222
Σχ. 173	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	223
Σχ. 174	Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ .....	224
Σχ. 175	Επιρροή λόγου $w/b$ σε μίγματα ΑΣΣ και $pce/b$ σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου, $\tau_{top}/\tau_{bot}$ .....	225
Σχ. 176	Επιρροή λόγου $w/b$ σε μίγματα ΑΣΣ και $pce/b$ σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων μεσαίας προς κάτω ράβδου, $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ .....	226
Σχ. 177	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	227
Σχ. 178	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	227
Σχ. 179	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	228
Σχ. 180	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	228
Σχ. 181	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	229
Σχ. 182	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF6– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	229
Σχ. 183	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF7– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	230
Σχ. 184	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF8– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	230
Σχ. 185	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF9– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	231
Σχ. 186	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF10– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	231
Σχ. 187	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF11– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	232
Σχ. 188	Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ (υπο-ομάδα συνθέσεων Β1) .....	233
Σχ. 189	Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ (υπο-ομάδα συνθέσεων Β2) .....	233
Σχ. 190	Επιρροή λόγου $sf/b$ σε μίγματα ΑΣΣ και $pce/b$ σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου, $\tau_{top}/\tau_{bot}$ .....	235

Σχ. 191	Επιρροή λόγου $sf/b$ σε μίγματα ΑΣΣ και $pce/b$ σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων μεσαίας προς κάτω ράβδου, $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ .....	235
Σχ. 192	Επιρροή λόγου $sf/b$ σε μίγματα ΑΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου, $\tau_{top}/\tau_{bot}$ – Σύγκριση με μίγμα αναφοράς ΣΣ.....	237
Σχ. 193	Επιρροή λόγου $sf/b$ σε μίγματα ΑΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου, $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ – Σύγκριση με μίγμα αναφοράς ΣΣ.....	237
Σχ. 194	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC000– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	239
Σχ. 195	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC013– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	240
Σχ. 196	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC050– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	240
Σχ. 197	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	243
Σχ. 198	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	243
Σχ. 199	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	244
Σχ. 200	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	244
Σχ. 201	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	245
Σχ. 202	Ανηγμένη μέση τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης στο άκρο του οριζόντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	247
Σχ. 203	Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης στο άκρο του οριζόντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	247
Σχ. 204	Συγκριτική αξιολόγηση μέσω τιμών ανηγμένων τάσεων συνάφειας $N$ ράβδων οριζόντιου δοκιμίου και μέσω τιμών ανηγμένων τάσεων συνάφειας τριών κυβικών δοκιμίων για μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , για την περίπτωση (α) της μέσης τάσης συνάφειας και (β) της μέγιστης τάσης συνάφειας .....	248
Σχ. 205	Επιρροή λόγου $w/b$ σε μίγματα ΑΣΣ και $pce/b$ σε μίγματα ΣΣ στη μέση ανηγμένη τιμή τάσεων συνάφειας $N$ ράβδων του οριζόντιου δοκιμίου, $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$ .....	249
Σχ. 206	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF1 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	250
Σχ. 207	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF2 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	250
Σχ. 208	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	251
Σχ. 209	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF7– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	251
Σχ. 210	Ανηγμένη μέση τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το άκρο του οριζόντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	253

Σχ. 211	Ανηγγμένη μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το άκρο του οριζόντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	253
Σχ. 212	Συγκριτική αξιολόγηση μέσων τιμών τάσεων συνάφειας $N$ ράβδων οριζόντιου δοκιμίου και μέσων τιμών τάσεων συνάφειας τριών κυβικών δοκιμίων για μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	254
Σχ. 213	Επιρροή λόγου $sf/b$ σε μίγματα ΑΣΣ και $pce/b$ σε μίγματα ΣΣ στη μέση ανηγμένη τιμή τάσεων συνάφειας $N$ ράβδων του οριζόντιου δοκιμίου, $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$ .....	255
Σχ. 214	Επιρροή υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm), σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων άνω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή $N$ ράβδων οριζόντιου δοκιμίου .....	256
Σχ. 215	Επιρροή υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm) σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $w/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων κάτω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή $N$ ράβδων οριζόντιου δοκιμίου .....	257
Σχ. 216	Επιρροή υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm) σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων άνω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή $N$ ράβδων οριζόντιου δοκιμίου .....	258
Σχ. 217	Επιρροή υπερκείμενου στρώματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm) σκυροδέματος σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων κάτω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή $N$ ράβδων οριζόντιου δοκιμίου .....	259
Σχ. 218	Γραφική απεικόνιση επιβολής σχετικής μετατόπισης ράβδου - σκυροδέματος .....	260
Σχ. 219	Χρονικές στιγμές επιβολής μετακινήσεων στις ράβδους ζυγής αρίθμησης των οριζόντιων δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ κατά την πήξη του σκυροδέματος .....	260
Σχ. 220	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινήσεις ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC013 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	262
Σχ. 221	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινήσεις ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC050 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	263
Σχ. 222	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινήσεις ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF2 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	264
Σχ. 223	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινήσεις ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF5 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	265
Σχ. 224	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινήσεις ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF7 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	265
Σχ. 225	Επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος στην μέση τάση συνάφειας σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	266
Σχ. 226	Επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος στην μέγιστη τάση συνάφειας σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	267
Σχ. 227	Θερμική καταπόνηση δοκιμίων εντός πυριαντηρίου υψηλών θερμοκρασιών .....	268
Σχ. 228	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC000 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας .....	271





Σχ. 244	Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF7 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμών που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας.....	281
Σχ. 245	Σύγκριση ανηγμένης μέσης τάσης συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των ανηγμένων μέσων τάσεων συνάφειας τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) .....	282
Σχ. 246	Σύγκριση ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των ανηγμένων μέγιστων τάσεων συνάφειας τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) .....	283
Σχ. 247	Σύγκριση ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ και ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων ολισθήσεων τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) .....	284
Σχ. 248	Λόγος χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) – Σύγκριση με ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	285
Σχ. 249	Λόγος χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 900 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) – Σύγκριση με ΣΣ μεταβλητού λόγου $pce/b$ .....	285
Σχ. 250	Διάταξη δοκιμής εξόλκευσης (α) ΕΩΣ/ΕΜΠ και (β) ΕΔΥ/ΠΚ.....	286
Σχ. 251	Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών των συνθέσεων NTUA-SCCSF1 και UCY-SCCSF1 .....	288
Σχ. 252	Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών των συνθέσεων NTUA-SCCSF2 και UCY-SCCSF2 .....	288
Σχ. 253	Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών των συνθέσεων NTUA-SCCSF3 και UCY-SCCSF3 .....	289
Σχ. 254	Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών των συνθέσεων NTUA-SCCSF4 και UCY-SCCSF4 .....	289
Σχ. 255	Ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη για τα δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ .....	291
Σχ. 256	Ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη για τα δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΔΥ/ΠΚ .....	292
Σχ. 257	Σύγκριση επιρροής λόγου $sf/b$ στην ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας μεταξύ των δοκιμών που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ .....	292
Σχ. 258	Σύγκριση ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας μεταξύ δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ .....	293
Σχ. 259	Σύγκριση ολισθήσεων που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας μεταξύ δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου $sf/b$ που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ.....	293
Σχ. 260	Υπολογισμός ανοιχτού πορώδους σε πρότυπα κυβικά δοκίμια (100 × 100 × 100 mm) μέσω προσδιορισμού μαζών (α) σε νερό υπό άνοση και (β) σε αέρα.....	300
Σχ. 261	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμών όλων των συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών.....	301
Σχ. 262	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ανοιχτού πορώδους, $p_{calc}$ (%), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $p_{exp}$ (%) .....	302
Σχ. 263	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ανοιχτού πορώδους, $p_{calc}$ (%), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές, $p_{exp}$ (%) .....	303
Σχ. 264	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών .....	304
Σχ. 265	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών .....	305

Σχ. 266	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών.....	306
Σχ. 267	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών.....	306
Σχ. 268	Σύγκριση ανοιχτού πορώδους, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών .....	307
Σχ. 269	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών .....	307
Σχ. 270	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών .....	308
Σχ. 271	Σύγκριση ανοιχτού πορώδους, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών .....	308
Σχ. 272	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ανοιχτού πορώδους, $p_{exp}$ (%), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $p_{calc}$ (%).....	309
Σχ. 273	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ε σε ηλικία 28 ημερών.....	310
Σχ. 274	Ανοιχτό πορώδες, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ζ (Ζ1 και Ζ2) σε ηλικία 28 ημερών.....	311
Σχ. 275	Διεργαστηριακή σύγκριση ανοιχτού πορώδους, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό, $w/b$ , σε ηλικία 28 ημερών.....	312
Σχ. 276	Διεργαστηριακή σύγκριση ανοιχτού πορώδους, $p$ (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό λόγο πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό, $sf/b$ , σε ηλικία 28 ημερών.....	312
Σχ. 277	Διεργαστηριακή σύγκριση ανοιχτού πορώδους δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) σε ηλικία 28 ημερών .....	313
Σχ. 278	(α) Πειραματική διάταξη δοκιμής απορροφητικότητας και (β) εκτέλεση δοκιμής σε πρότυπα κυβικά δοκίμια (100×100×100mm) με πλευρική στεγάνωση με μονωτική ταινία. ....	314
Σχ. 279	Τυπικό διάγραμμα πρωτογενών μετρήσεων τριχοειδούς απορρόφησης – Γραφικός ορισμός απορροφητικότητας .....	314
Σχ. 280	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 7 ημερών και (β) 28 ημερών .....	317
Σχ. 281	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 56 ημερών .....	317
Σχ. 282	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων συνθέσεων ΑΣΣ που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών.....	318
Σχ. 283	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων συνθέσεων ΣΣ που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών.....	318
Σχ. 284	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών συναρτήσει του λόγου τσιμέντου προς πάστα, $c/p$ .....	319
Σχ. 285	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών απορροφητικότητας, $S_{calc}$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $S_{exp}$ .....	320
Σχ. 286	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών απορροφητικότητας, $S_{calc}$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές, $S_{exp}$ .....	320
Σχ. 287	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών .....	321
Σχ. 288	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών .....	322
Σχ. 289	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών .....	323
Σχ. 290	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών .....	323
Σχ. 291	Σύγκριση απορροφητικότητας, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών .....	324
Σχ. 292	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών .....	325
Σχ. 293	Απορροφητικότητα, $S$ (mm/min <sup>0.5</sup> ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών .....	325

Σχ. 294	Σύγκριση απορροφητικότητας, $S$ ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών.....	326
Σχ. 295	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών απορροφητικότητας, $S_{\text{exp}}$ ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $S_{\text{calc}}$ .....	326
Σχ. 296	Απορροφητικότητα, $S$ ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ε σε ηλικία 28 ημερών.....	327
Σχ. 297	Απορροφητικότητα, $S$ ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η σε ηλικία 28 ημερών.....	328
Σχ. 298	Διεργαστηριακή σύγκριση απορροφητικότητας υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό λόγο νερού προς τσιμέντο σε ηλικία 28 ημερών.....	329
Σχ. 299	Διεργαστηριακή σύγκριση απορροφητικότητας υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε ηλικία 28 ημερών.....	329
Σχ. 300	Διεργαστηριακή σύγκριση απορροφητικότητας δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) σε ηλικία 28 ημερών.....	330
Σχ. 301	Συσκευή υδατοαπορροφητικότητας: (α) σκαρίφημα (β) φωτογραφία από έλεγχο δοκιμίου (γ) λεπτομέρεια συσκευής GWT-4000.....	330
Σχ. 302	Τυπικό διάγραμμα πρωτογενών καταγραφών πίεσης κατά τη δοκιμή υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση.....	331
Σχ. 303	Ορισμός χρόνου εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T$ σε $s$ ), με την ατμοσφαιρική πίεση.....	333
Σχ. 304	Ορισμός εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας $c$ .....	333
Σχ. 305	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 7 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	335
Σχ. 306	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	335
Σχ. 307	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 56 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	336
Σχ. 308	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών.....	336
Σχ. 309	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας $c$ δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 7 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	337
Σχ. 310	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας $c$ δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	337
Σχ. 311	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας $c$ δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 56 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	338
Σχ. 312	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας $c$ δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών.....	338
Σχ. 313	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών χρόνου εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm,calc}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $\ln T_{\text{atm,exp}}$ .....	340
Σχ. 314	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών χρόνου εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm,calc}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές, $\ln T_{\text{atm,exp}}$ .....	340
Σχ. 315	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή υδατοπερατότητας, $c_{\text{calc}}$ ( $\times 10^{-3}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $c_{\text{exp}}$ .....	341
Σχ. 316	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή υδατοπερατότητας, $c_{\text{calc}}$ ( $\times 10^{-3}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές, $c_{\text{exp}}$ .....	341
Σχ. 317	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών.....	342
Σχ. 318	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c$ ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών.....	343
Σχ. 319	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{\text{atm}}$ ( $T_{\text{atm}}$ σε $s$ ), υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών.....	343

Σχ. 320	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών .....	344
Σχ. 321	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών.....	345
Σχ. 322	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών.....	345
Σχ. 323	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών.....	346
Σχ. 324	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών.....	346
Σχ. 325	Σύγκριση χρόνων εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών.....	347
Σχ. 326	Σύγκριση εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ, μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών.....	347
Σχ. 327	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών.....	349
Σχ. 328	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών.....	349
Σχ. 329	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών.....	350
Σχ. 330	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών.....	350
Σχ. 331	Σύγκριση χρόνων εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών.....	351
Σχ. 332	Σύγκριση εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ε, μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών.....	351
Σχ. 333	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών χρόνου εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm,calc} (T_{atm} \text{ σε s})$ , μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $\ln T_{atm,exp}$ .....	353
Σχ. 334	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας, $c_{calc} (\times 10^{-3})$ , μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $c_{exp}$ .....	353
Σχ. 335	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ε σε ηλικία 28 ημερών.....	355
Σχ. 336	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ε σε ηλικία 28 ημερών.....	355
Σχ. 337	Χρόνος εξίσωσης πίεσης, $\ln T_{atm} (T_{atm} \text{ σε s})$ , υπο-ομάδας συνθέσεων Ζ σε ηλικία 28 ημερών.....	356
Σχ. 338	Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, $c (\times 10^{-3})$ , δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Ζ σε ηλικία 28 ημερών.....	356
Σχ. 339	Πειραματική διάταξη δοκιμής υδατοπερατότητας υπό σταθερή πίεση .....	357
Σχ. 340	Μέγιστο βάθος διείσδυσης δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 360 ημερών .....	358
Σχ. 341	Βάθος διείσδυσης νερού υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών .....	359
Σχ. 342	Βάθος διείσδυσης νερού υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών.....	359
Σχ. 343	Περιγραφή πειραματικής διάταξης NordTest Build 492 (1999).....	361
Σχ. 344	Πειραματική διάταξη δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα κατά NordTest Build 492 (1999) .....	362
Σχ. 345	Μεθοδολογία καταγραφής βάθους διείσδυσης χλωριόντων από προφίλ δοκιμίου κατόπιν ψεκασμού με νιτρικό άργυρο.....	363
Σχ. 346	Τυπικό προφίλ δοκιμίου σκυροδέματος κατόπιν δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα, σύμφωνα με το πρότυπο NordTest Build 492 (1999) και ψεκασμού με νιτρικό άργυρο ...	363
Σχ. 347	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) .....	366
Σχ. 348	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 90 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) .....	367

Σχ. 349	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 180 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) .....	367
Σχ. 350	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	368
Σχ. 351	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 90 ημερών συναρτήσει του λόγου συνδετικού υλικού προς συνολικό βάρος μίγματος, $b/w_{tot}$ .....	369
Σχ. 352	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 180 ημερών συναρτήσει του λόγου συνδετικού υλικού προς συνολικό βάρος μίγματος, $b/w_{tot}$ .....	369
Σχ. 353	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm,calc} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ , μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $D_{nssm,exp}$ .....	370
Σχ. 354	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm,calc} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ , μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές, $D_{nssm,exp}$ .....	371
Σχ. 355	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών .....	372
Σχ. 356	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών .....	372
Σχ. 357	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών .....	373
Σχ. 358	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ , δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών .....	374
Σχ. 359	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης, $D_{nssm,calc} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ , μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $D_{nssm,exp}$ .....	375
Σχ. 360	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Ε σε ηλικία 28 ημερών.....	376
Σχ. 361	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Ζ σε ηλικία 28 ημερών.....	377
Σχ. 362	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	379
Σχ. 363	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 90 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	379
Σχ. 364	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 180 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ).....	380
Σχ. 365	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών.....	380
Σχ. 366	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ειδικής αντίστασης, $\rho_{calc}$ (kΩ-cm), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $\rho_{exp}$ .....	381
Σχ. 367	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ειδικής αντίστασης, $\rho_{calc}$ (kΩ-cm), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές, $\rho_{exp}$ .....	381
Σχ. 368	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών	382
Σχ. 369	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών	383
Σχ. 370	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών.	383
Σχ. 371	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών	384
Σχ. 372	Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ειδικής αντίστασης, $\rho_{calc}$ (kΩ-cm), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές, $\rho_{exp}$ .....	385
Σχ. 373	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Ε σε ηλικία 28 ημερών.	386
Σχ. 374	Ειδική αντίσταση, $\rho$ (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Ζ σε ηλικία 28 ημερών.	386

Σχ. 375	Επιρροή εφαρμογής επίσημης και παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 στη μεταβολή του διερχόμενου ρεύματος, κατά τη διάρκεια της δοκιμής.....	389
Σχ. 376	Επιρροή εφαρμογής επίσημης και παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 στη μεταβολή της θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια της δοκιμής.....	389
Σχ. 377	Σύγκριση συντελεστών μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492.....	390
Σχ. 378	Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό στο συντελεστή μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 .....	390
Σχ. 379	Επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη στο συντελεστή μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 .....	391
Σχ. 380	Περιγραφή πειραματικής διάταξης AASHTO T 277 (2007) / ASTM C 1202 (2009) .....	392
Σχ. 381	Πειραματική διάταξη δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα κατά ASTM C 1202 (2009) ....	392
Σχ. 382	Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό στο ηλεκτρικό φορτίο κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ).....	394
Σχ. 383	Επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη στο ηλεκτρικό φορτίο κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ) .....	394
Σχ. 384	Συσχέτιση ηλεκτρικού φορτίου κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ) .....	395
Σχ. 385	Συσχέτιση ηλεκτρικού φορτίου και συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της πρότυπης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ), αντίστοιχα.....	395

## Περίληψη

Η παρούσα Διατριβή αφορά στο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ) και αποσκοπεί στη θεωρητική και πειραματική διερεύνηση θεμάτων που αφορούν στο σχεδιασμό των μιγμάτων, στην παρασκευή και στον έλεγχο του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Η πρωτοτυπία της παρούσας Διατριβής συνοψίζεται στη διερεύνηση και αξιολόγηση ιδιοτήτων νωπού και σκληρυμένου ΑΣΣ, σε συνάρτηση με την προέλευση και τις αναλογίες των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επιρροή στις ιδιότητες του ΑΣΣ: (i) της περιεκτικότητας σε νερό, (ii) της προσθήκης πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου και (iii) της προσθήκης μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου και του ασβεστολιθικού φίλερ. Τα ευρήματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από συνθέσεις Συμβατικού Σκυροδέματος (ΣΣ) μεταβλητής περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή. Παράλληλα, δημιουργήθηκε μία σημαντική βάση δεδομένων που συνδέει αναλυτικά στοιχεία σύνθεσης 76 μιγμάτων ΑΣΣ και 22 μιγμάτων ΣΣ, παρασκευασμένων με εγχώρια ή εισαγόμενα υλικά, με λεπτομερείς τιμές από τις αντίστοιχες δοκιμές έμμεσου προσδιορισμού της ρεολογίας (δοκιμές εκτίμησης χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης).

Οι ιδιότητες που μελετήθηκαν σε εργαστηριακώς παρασκευασμένα μίγματα ΑΣΣ περιλαμβάνουν τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά, με έμφαση σε εξειδικευμένα θέματα συνάφειας, και τις ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος. Όσο αφορά **(α)** στα θέματα συνάφειας, διερευνήθηκε η επιρροή στη συνάφεια: ( $\alpha_1$ ) της θέσης των ράβδων καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών), ( $\alpha_2$ ) της απόστασης των ράβδων από το σημείο έγχυσης, ( $\alpha_3$ ) των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα κατά την πήξη του σκυροδέματος και ( $\alpha_4$ ) των υψηλών θερμοκρασιών. Όσο αφορά **(β)** στα θέματα ανθεκτικότητας, διερευνήθηκαν: ( $\beta_1$ ) η διαπερατότητα του σκυροδέματος σε νερό (ανοιχτό πορώδες, απορροφητικότητα, υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση) και ( $\beta_2$ ) η διαπερατότητα σε χλωριόντα (συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων, ειδική αντίσταση, ηλεκτρικό φορτίο). Επιπροσθέτως, διερευνήθηκε η δυνατότητα αναπαραγωγής μιγμάτων ΑΣΣ (αναπαραγωγισιμότητα) μεταξύ δύο εργαστηρίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με υλικά και μεθόδους που συμμορφώνονται στα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα, και αξιολογήθηκαν συγκριτικά τα αποτελέσματα που αφορούν στη ρεολογία, στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στην ανθεκτικότητα.

Από τον έλεγχο των *ρεολογικών ιδιοτήτων* αναδείχτηκε η αξία της δοκιμής εξάπλωσης, ενώ τέθηκε υπό μερική αμφισβήτηση η αποτελεσματικότητα της δοκιμής εμποδιζόμενης εξάπλωσης και της επαναληπτικής δοκιμής χοάνης V. Ο χρόνος έναρξης πήξης είναι μεγαλύτερος στο ΑΣΣ και φάνηκε να επηρεάζεται άμεσα από την περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή. Όσο αφορά στη διεργαστηριακή αναπαραγωγισιμότητα, φαίνεται ότι μέσω κατάλληλης ρύθμισης των αναλογιών των συστατικών του μίγματος μπορεί να επιτευχθούν παρεμφερείς ρεολογικές ιδιότητες. Οποιοσδήποτε διαφορές μπορούν επαρκώς να ερμηνευτούν βάσει των διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων των συστατικών υλικών και, ιδιαιτέρως, της δραστηριότητας των χημικών πρόσθετων και των περιεχόμενων πρόσμικτων τύπου II (π.χ. πυριτική παιπάλη).



Από τον έλεγχο των *μηχανικών χαρακτηριστικών*, αναδείχτηκε η θετική επιρροή των πρόσμικτων τύπου II στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής, αφενός λόγω της φυσικής τους δράσης και αφετέρου λόγω της ποζολανικότητάς τους. Ενώ παρατηρήθηκε αύξηση και των εφελκυστικών αντοχών, η συσχέτιση των δύο αντοχών οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές εν σχέσει προς τις καμπύλες του ευρωπαϊκού κανονισμού για το ΣΣ, οι οποίες φαίνεται να υπερεκτιμούν τις εφελκυστικές αντοχές, ειδικότερα για χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές. Η καμπτική αντοχή χρήζει περαιτέρω εκτεταμένης διερεύνησης για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Όσο αφορά στη *συνάφεια* με το χάλυβα οπλισμού, τα αναλυτικά κανονιστικά μοντέλα και τα μοντέλα της βιβλιογραφίας για το ΣΣ φαίνεται να υποεκτιμούν την αρχική δυσκαμψία και να υπερεκτιμούν τη μέγιστη τάση συνάφειας. Βάσει των ευρημάτων της παρούσας Διατριβής, κρίνεται αναγκαία και προτείνεται η μεταβολή των μοντέλων αυτών. Σημαντική αποδείχτηκε η επιλογή της αντιπροσωπευτικής τάσης, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αντοχής σε συνάφεια. Πάντως, η συνολική συμπεριφορά του ΑΣΣ σε συνάφεια είναι εν γένει καλύτερη ή τουλάχιστον παρεμφερής με την αντίστοιχη συμπεριφορά του ΣΣ, για οποιαδήποτε εκ των αντιπροσωπευτικών τάσεων. Το φαινόμενο άνω οπλισμών φαίνεται να επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της σύνθεσης και είναι γενικώς ηπιότερο στην περίπτωση του ΑΣΣ, εν σχέσει προς το ΣΣ. Μελλοντικά, θα μπορούσε να εξεταστεί μία μεγέθυνση της περιοχής «καλής» συνάφειας στο ΑΣΣ, ειδικά για στοιχεία μεγαλύτερου βάθους. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι γραμμικά στοιχεία έως 3.20 m ή επιφανειακά στοιχεία έως περίπου 10 m<sup>2</sup>, παρασκευασμένα από ΑΣΣ, απαιτούν, υπό συνθήκες, μόνο ένα κεντρικό σημείο έγχυσης, χωρίς να κινδυνεύουν από απώλεια συνάφειας στις πιο απομακρυσμένες ράβδους. Σημειώνεται, πάντως, ότι υψηλά ποσοστά οπλισμών ή περίπλοκη γεωμετρία μπορούν δυνητικά να περιορίσουν αυτή την ικανότητα. Επιπροσθέτως, τυχόν σεισμικά γεγονότα που μπορεί να οδηγήσουν σε μετακινήσεις των τύπων και, συνεπώς, σε σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος, δεν αναμένεται να επηρεάσουν αρνητικά τη συνάφεια του ΑΣΣ. Τέλος, τυχόν αποκλίσεις στη συνάφεια παρεμφερών μιγμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων βρέθηκαν σχετικά χαμηλές.

Όσο αφορά στην *ανθεκτικότητα* του ΑΣΣ, στο πλαίσιο της Διατριβής προτείνονται γραμμικές σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών που εξετάστηκαν, συναρτήσεων των αναλογιών των συστατικών στο μίγμα, των απόλυτων τιμών τους, αλλά και χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών. Οι σχέσεις αυτές μπορούν με ικανοποιητική ακρίβεια και σχετικά περιορισμένη διασπορά να εκτιμήσουν τις πειραματικές τιμές. Επιπλέον, εξετάστηκε η επιρροή στην ανθεκτικότητα των επιμέρους μεταβολών στη σύνθεση. Προτάθηκε η εφαρμογή και περαιτέρω διερεύνηση μιας νέας μεθόδου εκτίμησης της υδατοπερατότητας, η οποία φαίνεται να παρουσιάζει σταθερότητα στα αποτελέσματά της. Τα ευρήματα ενδυναμώνουν την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου, η οποία κρίνεται αναγκαίο να διερευνηθεί συστηματικά και διεξοδικά για την πλήρη ανάπτυξη και εφαρμογή της. Όσο αφορά στην *αναπαραγωγισιμότητα* παρεμφερών μιγμάτων, φαίνεται τα μεγέθη που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα να συσχετίζονται πολύ καλά μεταξύ των δύο εργαστηρίων, με τις τυχόν διαφορές να ερμηνεύονται λογικά.

Από την παρούσα Διατριβή έχουν ήδη προκύψει τέσσερις δημοσιεύσεις σε έγκυρα διεθνή επιστημονικά περιοδικά, τρεις δημοσιεύσεις σε κεφάλαια βιβλίων και εννέα ανακοινώσεις σε διεθνή και εθνικά Συνέδρια, ενώ ένα επιπλέον άρθρο σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό βρίσκεται σε διαδικασία κρίσης.

## Abstract

The present Dissertation concerns Self-Compacting Concrete (SCC) and aims at the theoretical and experimental investigation of subjects relating to the mix design, the casting and the testing of fresh and hardened concrete.

The originality of the present Dissertation is summarized to the investigation and evaluation of fresh and hardened SCC properties, as a function of the origin and level of individual ingredients in the mix. Specifically, the effect on SCC properties of: (i) the water level, (ii) the incorporation of silica fume as a replacement material of cement and (iii) the incorporation of metakaolin as a replacement material of either cement or limestone powder, has been investigated. The findings have been compared to the corresponding results for Normally Vibrated Concrete (NVC) mixes, with varying level of superplasticizer. Additionally, a large database has been developed, which combines analytical composition data for 76 SCC mixtures and 22 NVC mixtures, produced by local or imported materials, with detailed values from the corresponding tests regarding the indirect determination of rheology (tests for the determination of self-compactability characteristics).

The properties that were investigated in laboratory cast SCC mixes include the rheological properties of fresh concrete, the mechanical characteristics, with a focus on specialized bond issues, and the durability properties of hardened concrete. As far as **(a)** bond issues are concerned, the effect on bond of: (a<sub>1</sub>) the rebar position over height (top-bar effect), (a<sub>2</sub>) the rebar distance from the casting point, (a<sub>3</sub>) the relative displacements between concrete and steel during concrete setting and (a<sub>4</sub>) high temperatures have been investigated. As far as **(b)** durability issues are concerned: (b<sub>1</sub>) the water permeability of concrete (open porosity, sorptivity, water permeability under varying or constant pressure) and (b<sub>2</sub>) the chloride permeability of concrete (chloride migration coefficient, specific resistance, electric charge) have been investigated. Furthermore, the ability of reproducing SCC mixes (reproducibility) between two laboratories of the European Union, by using materials and methods that conform to the modern European standards has been investigated. The results regarding the rheology, the mechanical characteristics and durability have been comparatively evaluated.

The testing of the rheological properties demonstrated the importance of the slump-flow test, whereas the effectiveness of the confined flowability test and the repetition test of the V-funnel test has been partially questioned. The concrete setting initiation time is higher for SCC and it appears to be directly affected by the superplasticizer level. Regarding the interlaboratorial reproducibility, it appears that similar rheological properties can be achieved by suitable adjustments in the constituent materials' proportions in the mix. Any differences can be sufficiently explained on the basis of the different physicochemical properties of the constituent materials and, especially, of the effectiveness of the chemical additives and the incorporated type II admixtures (e.g. silica fume).

The testing of the mechanical characteristics demonstrated the positive effect of type II admixtures on the increase of the compressive strength has been exhibited, due to their physical action, as well as to their pozzolanity. While an increase was also

observed in the tensile strengths, the correlation between the two strengths leads to lower values compared to the European code curves for NVC, which appear to overestimate the tensile strength, especially for lower compressive strengths. The flexural strength requires further extensive investigation to reach safe conclusions.

As far as the bond to reinforcement steel is concerned, the analytical code models and the models of the literature for NVC appear to underestimate the initial stiffness and to overestimate the maximum bond stress. Based on the findings of the present Dissertation, a change in these models is considered critical and proposed. The choice of the representative stress, which is used for the estimation of the bond strength, has been proven to be significant. However, the total bond behaviour of SCC is generally better or at least equal to the corresponding behaviour of NVC, for any of the representative stresses. The top-bar effect appears to be affected by the mix proportions and is generally less intense for SCC, compared to NVC. In future, an increase of the 'good' bond condition region could be examined for SCC, especially for deep members. In addition, it has been proven that linear members up to 3.20 m or surface members up to approximately 10 m<sup>2</sup>, cast with SCC, require, under certain conditions, only a single casting point, without running the risk of bond loss of the most remote rebars. It should, however, be noted that high congestion or complicated geometry may potentially limit this ability. Furthermore, possible seismic events that may lead to formwork displacements and, successively, to relative displacement between the rebars and the concrete, are not expected to negatively influence SCC bond. Finally, possible differences in bond of similar mixes between different laboratories have been found to be rather small.

Regarding durability of SCC, in the context of the Dissertation, linear equations for the calculation of the examined variables, as a function of the constituent materials' proportions in the mix, of their absolute values, as well as of characteristic ratios of the constituent materials, are proposed. These equations can estimate the laboratorial values with a satisfactory precision and a rather limited dispersion. In addition, the effect of the individual changes in the mix design on durability has been investigated. The application and further examination of a new water permeability investigation method, which appears to lead to consistent results, has been proposed. The findings enhance the reliability of the proposed method, which is considered critical to be systematically and extensively investigated further, for its full development and application. As far as the reproducibility of similar mixes is concerned, the variables regarding durability appear to correlate well between the two laboratories, with any differences being able to be reasonably explained.

The current Dissertation has already resulted in four publications in significant international scientific journals, three publications in book chapters and nine publications in international and national conferences. Another article in an international scientific journal is currently under peer-review process.



---

# Εισαγωγή

## Σύνοψη Εισαγωγής

*Στην πρώτη παράγραφο της Εισαγωγής γίνεται μία σύντομη περιγραφή του σκοπού της παρούσας Διατριβής.*

*Στις επόμενες δύο παραγράφους αναλύεται η δομή των Κεφαλαίων και περιγράφονται συνοπτικά τα μίγματα που παρασκευάστηκαν και οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Διατριβής.*

*Τέλος, αναφέρονται οι σχετικές δημοσιεύσεις που προέκυψαν: η μεταπτυχιακή εργασία, οι δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και σε βιβλία, καθώς και οι εισηγήσεις σε διεθνή και εθνικά συνέδρια, και η συμμετοχή σε συναφείς επιστημονικές επιτροπές.*

## Σύντομη Περιγραφή - Σκοπός

Η παρούσα Διατριβή αφορά στο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ). Σκοπός της Διατριβής ήταν η θεωρητική και πειραματική προσέγγιση του συγκεκριμένου τύπου, σε θέματα που αφορούν στο σχεδιασμό των μιγμάτων, στην παρασκευή και στον έλεγχο του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Στο πλαίσιο της Διατριβής πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς και εγχώριας βιβλιογραφίας και παρασκευάστηκε εργαστηριακό ΑΣΣ, με σκοπό τον έλεγχο των ιδιοτήτων του. Τα κύρια θέματα που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά, με έμφαση σε εξειδικευμένα θέματα συνάφειας και στις ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, όσο αφορά **(α)** στα θέματα συνάφειας, διερευνήθηκε η επιρροή στη συνάφεια: (α<sub>1</sub>) της θέσης των ράβδων καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών), (α<sub>2</sub>) της απόστασης των ράβδων από το σημείο έγχυσης, (α<sub>3</sub>) των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα κατά την πήξη του σκυροδέματος και (α<sub>4</sub>) των υψηλών θερμοκρασιών. Όσο αφορά **(β)** στα θέματα ανθεκτικότητας, διερευνήθηκαν: (β<sub>1</sub>) η διαπερατότητα του σκυροδέματος σε νερό, μέσω δοκιμών προσδιορισμού (i) του ανοιχτού πορώδους, (ii) της απορροφητικότητας και (iii) της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση, και (β<sub>2</sub>) η διαπερατότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα, μέσω δοκιμών προσδιορισμού (i) του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, (ii) της ειδικής αντίστασης και (iii) του ηλεκτρικού φορτίου. Επιπροσθέτως, διερευνήθηκε η επαναληψιμότητα των δοκιμών στο ίδιο εργαστήριο, καθώς και η δυνατότητα αναπαραγωγής μιγμάτων ΑΣΣ (αναπαραγωγισιμότητα) μεταξύ δύο εργαστηρίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με υλικά και μεθόδους που συμμορφώνονται στα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα και αξιολογήθηκαν συγκριτικά τα αποτελέσματα που αφορούν στη ρεολογία, στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στην ανθεκτικότητα.

Από τη μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν χρήσιμα ευρήματα και συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του ΑΣΣ, μεγάλο μέρος των οποίων έχει ήδη δημοσιευθεί σε έγκυρα επιστημονικά περιοδικά, καθώς και σε διεθνή και σε εθνικά συνέδρια.

## Δομή Κεφαλαίων

Η παρούσα Διατριβή είναι χωρισμένη σε πέντε Κεφάλαια.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για το ΑΣΣ, με έμφαση στα θέματα που άπτονται του πειραματικού μέρους της Διατριβής (θέματα σύνθεσης, μηχανικά χαρακτηριστικά, με έμφαση σε θέματα συνάφειας, ιδιότητες που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα και θέματα αναπαραγωγισιμότητας).

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις ΑΣΣ, οι οποίες παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν εργαστηριακά, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής. Επιπλέον, παρατίθενται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών εκτίμησης των χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης (οι οποίες αποτελούν συνδυαστικά μια έμμεση μεθοδολογία εκτίμησης της ρεολογίας) και αξιολογούνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά, πλην της συνάφειας.

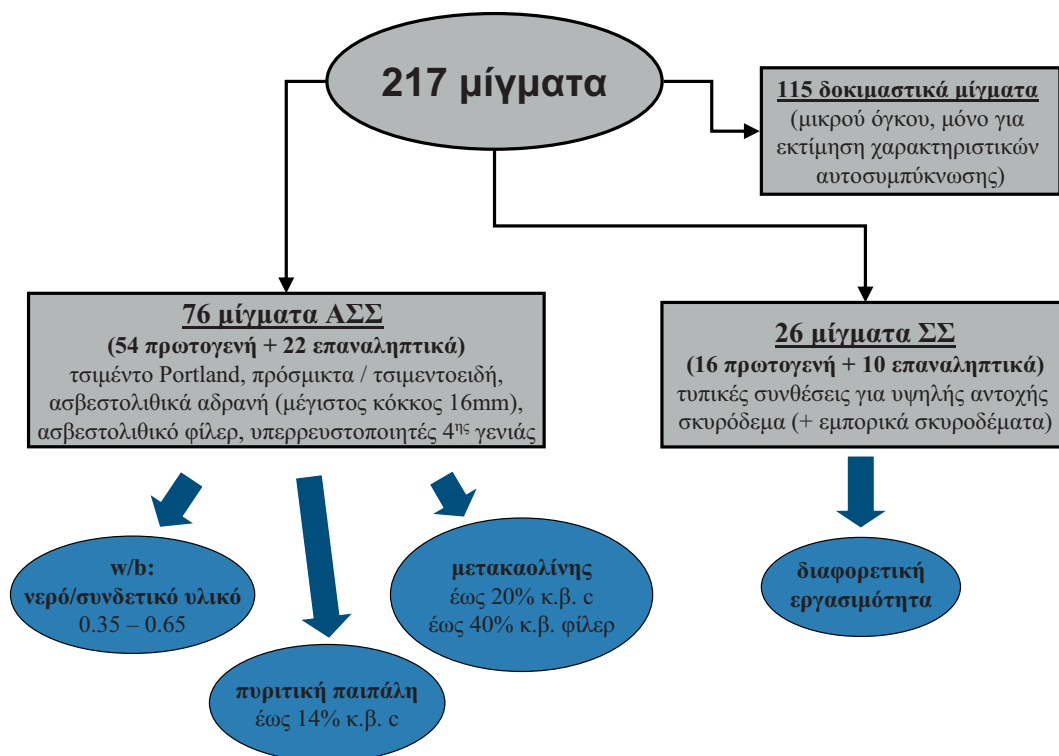
Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφονται αρχικά οι πειραματικές διατάξεις και η μεθοδολογία αξιολόγησης που αφορούν στη συνάφεια ΑΣΣ με το χάλυβα οπλισμού, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των ελέγχων συνάφειας.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις και η μεθοδολογία αξιολόγησης που αφορούν στην ανθεκτικότητα ΑΣΣ. Στη συνέχεια, παρατίθενται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που αφορούν στην ανθεκτικότητα.

Τέλος, στο **πέμπτο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα, όπως αυτά προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια. Παράλληλα με το σχολιασμό και την αξιολόγηση των ευρημάτων, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση από μελλοντικούς ερευνητές.

### Περιγραφή Πειραμάτων

Για τους ερευνητικούς σκοπούς της παρούσας Διατριβής παρασκευάστηκαν εργαστηριακώς συνολικά 217 μίγματα (**Σχήμα 1**). Εξ αυτών, τα 115 μίγματα αποτέλεσαν δοκιμαστικά μίγματα μικρού όγκου (έως 15-20 lt), τα οποία ελέγχθηκαν αποκλειστικώς ως προς τα ρεολογικά τους χαρακτηριστικά. Από τα υπόλοιπα 102 μίγματα, τα 76 αφορούσαν μίγματα ΑΣΣ (54 πρωτογενή και 22 επαναληπτικά) και τα 26 αφορούσαν μίγματα ΣΣ (16 πρωτογενή και 10 επαναληπτικά). Μέρος των μιγμάτων ΑΣΣ χωρίζονται σε υπο-ομάδες με σταθερή σύνθεση και μία, σε κάθε περίπτωση, μοναδική μεταβλητή: (α) τον λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), (β) την περιεκτικότητα σε πυριτική παιπάλη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ ) και (γ) την περιεκτικότητα σε μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης ( $\gamma_1$ ) του τσιμέντου ( $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ ) και ( $\gamma_2$ ) του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ ).



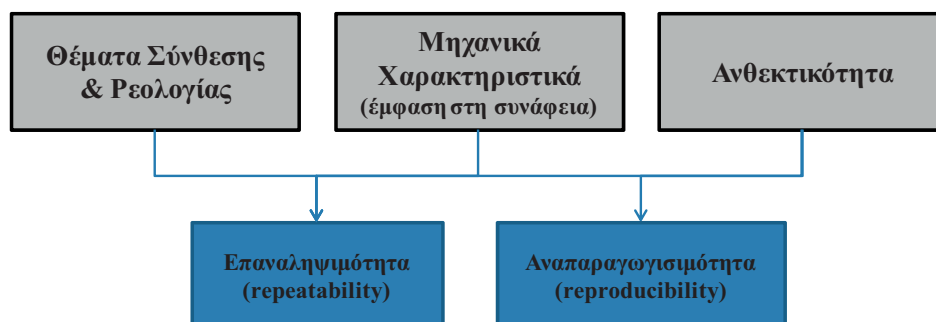
Σχήμα 1 Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων

Οι κύριοι ερευνητικοί άξονες ήταν τρεις (**Σχήμα 2**):

- (α) θέματα σύνθεσης και ρεολογίας,
- (β) μηχανικά χαρακτηριστικά, με έμφαση στη συνάφεια με τον χάλυβα οπλισμού και
- (γ) θέματα ανθεκτικότητας.

Επιπροσθέτως, σε καθέναν από τους άξονες έγινε διερεύνηση της επαναληψιμότητας των δοκιμών (επανάληψη δοκιμών σε δοκίμια που παρασκευάστηκαν από το ίδιο μίγμα) και της δυνατότητας αναπαραγωγής (αναπαραγωγισιμότητας) παρεμφερών μιγμάτων στο ίδιο ή σε άλλο εργαστήριο.

Ειδικότερα, στο πλαίσιο Μνημονίου Επιστημονικής Συνεργασίας του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ) με το Πανεπιστήμιο Κύπρου και, συγκεκριμένα, με το Εργαστήριο Δομικών Υλικών (ΕΔΥ/ΠΚ) του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος, πραγματοποιήθηκε κοινό ερευνητικό έργο με Επιστημονικό Υπεύθυνο τον Καθηγητή κ. **Μιχάλη Πέτρου** και επιστημονικό συνεργάτη τον κ. **Αντώνη Κανελλόπουλο**, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό. Το ερευνητικό έργο συνίστατο στην παρασκευή παρεμφερών μιγμάτων (6 μίγματα ΑΣΣ και 2 μίγματα ΣΣ εκ των ήδη αναφερθέντων) με εγχώρια υλικά των δύο χωρών, στη διεξαγωγή, μεταξύ άλλων, παράλληλων δοκιμών ρεολογίας, μηχανικών χαρακτηριστικών και ανθεκτικότητας με παρεμφερείς μεθόδους και στη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 2** Βασικοί άξονες Διδακτορικής Διατριβής

Τα θέματα που διερευνήθηκαν ανά ερευνητικό άξονα και τα οποία θα αναλυθούν λεπτομερώς στα Κεφάλαια 2 έως 4 συνοψίζονται ως εξής:

## Κεφάλαιο 2: Θέματα Σύνθεσης & Ρεολογίας

- Σχεδιασμός και παρασκευή εργαστηριακών μιγμάτων ΑΣΣ.
- Ρεολογικές ιδιότητες (εργασιμότητα, ικανότητα πλήρωσης, ικανότητα διέλευσης, σταθερότητα, ιξώδες, δυναμική και στατική απόμιξη)
  - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
  - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ



- Χρόνος πήξης
- Επαναληψιμότητα – Αναπαραγωγισιμότητα
  - Επαναληψιμότητα (στο ίδιο μίγμα)
  - Αναπαραγωγισιμότητα (διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων)

Κεφάλαια 2 και 3: Μηχανικά Χαρακτηριστικά
---

- Θλιπτική αντοχή
  - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
  - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Εφελκυστική αντοχή
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Καμπτική αντοχή
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Αντοχή σε συνάφεια
  - σε κυβικά δοκίμια (πρότυπη δοκιμή εξόλκευσης ράβδου)
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - σε κατακόρυφα δοκίμια καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - σε οριζόντια δοκίμια κατά μήκος (με μοναδικό σημείο έγχυσης)
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - σε υψηλές θερμοκρασίες
    - Διάφορες συνθέσεις
- Συσχετίσεις μηχανικών χαρακτηριστικών
  - Εφελκυστική αντοχή συναρτῆσει της θλιπτικής αντοχής
  - Αντοχή σε συνάφεια συναρτῆσει της θλιπτικής αντοχής
- Θερμική αγωγιμότητα: Κατανομή εσωτερικών θερμοκρασιών για θερμική καταπόνηση σε υψηλές θερμοκρασίες
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ

- Επαναληψιμότητα – Αναπαραγωγιμότητα
  - Επαναληψιμότητα (στο ίδιο μίγμα)
  - Αναπαραγωγιμότητα (διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων)

Κεφάλαιο 4: Θέματα Ανθεκτικότητας
-----------------------------------

- Ανοιχτό πορώδες
  - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
  - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Απορροφητικότητα
  - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
  - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Υδατοπερατότητα
  - υπό μεταβαλλόμενη πίεση (GWT-4000) [[Germann Instruments \(1999\)](#)]
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
    - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
    - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
  - υπό σταθερή πίεση [[DIN 1048 \(1991\)](#)]
    - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
    - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Αντίσταση σε χλωριόντα
  - Πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδος [NordTest Build 492 \(1999\)](#)
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
    - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
    - Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
  - Παραλλαγή πρότυπης επιταχυνόμενης μεθόδου [NordTest Build 492 \(1999\)](#)
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
  - Πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδος [ASTM C 1202 \(2009\)](#)
    - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
    - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
- Ειδική (ηλεκτρική) αντίσταση
  - Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό
  - Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου

- Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου
- Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ
- Επαναληψιμότητα – Αναπαραγωγισιμότητα
  - Επαναληψιμότητα (στο ίδιο μίγμα)
  - Αναπαραγωγισιμότητα (διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων)

### **Δημοσιεύσεις & Ενεργός Επιστημονική Συνεισφορά**

Σημαντικό μέρος των πειραματικών αποτελεσμάτων έχει δημοσιευθεί υπό μορφή άρθρων σε έγκριτα διεθνή επιστημονικά περιοδικά, σε κεφάλαια βιβλίων, αλλά και υπό μορφή εισηγήσεων σε διεθνή και σε εθνικά συνέδρια, με έμφαση σε συνέδρια συναφούς αντικειμένου. Ακολουθεί μία απλή παράθεση των δημοσιεύσεων, που προέκυψαν στο πλαίσιο εκπόνησης της Διατριβής, αρχής γενομένης από την κατάθεση της συναφούς αντικειμένου Μεταπτυχιακής Εργασίας στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Μ.Π.Σ.) «Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών» του Ε.Μ.Π. Συμπληρωματικώς, παρατίθενται και τέσσερις δημοσιεύσεις σε ευρύτερη θεματολογία Μηχανικού.

Σημειώνεται ότι δύο εκ των δημοσιεύσεων (Μεταπτυχιακή Εργασία και εισήγηση στο 6<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο RILEM, SCC2010) έχουν βραβευθεί από το Θωμαΐδειο Ίδρυμα, ενώ συμπεριλαμβάνεται ένα επιπλέον άρθρο σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό που βρίσκεται σε διαδικασία κρίσης. Αξίζει, ακόμη, να σημειωθεί ότι ο συντάξας της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής διατελεί μέλος της Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος του Συλλόγου Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας (ΣΠΜΕ) από το Μάιο 2012, στο πλαίσιο της οποίας συμμετείχε στη δημιουργία ειδικής Τεχνικής Οδηγίας για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, η οποία βρίσκεται, επί του παρόντος, υπό δημοσίευση. Τέλος, ο συντάξας της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής έγινε προσφάτως (Φεβρουάριος 2014) δεκτός ως μέλος (αναπληρωματικό μέλος χωρίς δικαίωμα ψήφου) της Επιτροπής ACI 237 για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα και της Επιτροπής ACI 228 για τους Μη Καταστροφικούς Ελέγχους Σκυροδέματος.

### ● **Μεταπτυχιακή & Διπλωματική Εργασία**

1. **Σφήκας Ι.** *Τεχνολογία Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*, Μεταπτυχιακή Εργασία, εκπονηθείσα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο του Δ.Μ.Π.Σ. «Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών», επιβλέπων: Επίκ. Καθ. Κ. Τρέζος, Αθήνα (Βαθμ. 10/10). Βραβείο Θωμαΐδειου Ιδρύματος.
2. **Σφήκας Ι.** *Επεμβάσεις σε Υφιστάμενα Κτήρια*, Διπλωματική Εργασία, εκπονηθείσα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., επιβλέπων: Επίκ. Καθ. Κ. Τρέζος, Αθήνα (Βαθμ. 10/10).

- **Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά (με κρίση)**
  3. **Sfikas I.P.**, Badogiannis E.G., Trezos K.G. Rheology and mechanical characteristics of Self-Compacting Concrete mixtures containing Metakaolin. *Construction & Building Materials*, Vol.64, pp.121-129. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.048
  4. Trezos K.G., **Sfikas I.P.**, Pasion C.G. Influence of water-to-binder ratio on top-bar effect and bond variation across length in Self-Compacting Concrete specimens, *Cement & Concrete Composites*, Vol.48, pp.127-139. 2014. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.012.
  5. **Sfikas I.P.**, Trezos K.G. Effect of composition variations on bond properties of Self-Compacting Concrete specimens, *Construction & Building Materials*, Vol.41, pp.252-262. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.094.
  6. **Sfikas I.P.**, Kanellopoulos A., Trezos K.G., Petrou M.F. Durability of similar Self-Compacting Concrete batches produced in two different EU Laboratories, *Construction & Building Materials*, Vol.40, pp.207-216. 2013. DOI: 0.1016/j.conbuildmat.2012.09.100
- **Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά (υπό διαδικασία κρίσης)**
  7. Trezos K.G., **Sfikas I.P.**, Orfanopoulos C.G. Bond of Self-Compacting Concrete incorporating silica fume: top-bar effect, effects of rebar distance from casting point and of rebar-to-concrete relative displacements during setting. *Construction & Building Materials* (υπό κρίση, κατ' αρχήν δεκτή).
- **Δημοσιεύσεις σε βιβλία (υποκεφάλαια οδηγιών και βιβλίων πρακτικών)**

[περιλαμβάνεται η δημοσίευση (9), η οποία πραγματεύεται ευρύτερη θεματολογία Μηχανικού]

  8. Τεχνική Οδηγία No. 5 (Τ.Ο. 5): *Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα*. Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος. 2014. ISBN: 978-960-99996-5-6 (συλλογικό έργο Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος: Σακελλαρίου Α., Ζέρης Χ., Μαρσέλλος Ν., Βογιατζής Χ., Ζυγούρης Ν., Μπαρδάκης Β., Παπανικολάου Κ., Πιττός Γ., **Σφήκας Ι.**)
  9. Τεχνική Οδηγία No. 4 (Τ.Ο. 4): *Δάπεδα από Σκυρόδεμα (Πλάκες επί Εδάφους)*. Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος. 2013. ISBN: 978-960-99996-4-9 (συλλογικό έργο Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος: Σακελλαρίου Α., Ζέρης Χ., Μαρσέλλος Ν., Βογιατζής Χ., Ζυγούρης Ν., Μπαρδάκης Β., Παπανικολάου Κ., Πιττός Γ., **Σφήκας Ι.**)
  10. Trezos K.G., **Sfikas I.P.** *Residual bond stress of Self-Compacting Concrete specimens after high temperature treatment*, RILEM Publications S.A.R.L. Rilem Proceedings Pro 90. Nicolas Roussel and Hela Bessaies-Bey (eds.). 2013. pp. 163-170. Proceedings of the 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, Paris, France, Sept 2-4 2013. ISBN: 978-2-35158-137-7, eISBN 978-2-35158-138-4

11. Trezos K.G., **Sfikas I.P.**, Palmos M.S., Sotiropoulou E.K. *Top-Bar Effect in Self-Compacting Concrete Elements*, in Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. RILEM Bookseries. K.H. Khayat and D. Feys (eds.), Volume 1, 2010, pp 355-366. Proceedings of the 6th International RILEM Symposium for Self-Consolidating Concrete (SCC2010), Montreal, Canada, DOI: 10.1007/978-90-481-9664-7\_30, 26-29 September 2010. Βραβείο Θωμαΐδειου Ιδρύματος.
- **Εισηγήσεις σε Συνέδρια / Πρακτικά Συνεδρίων**  
[περιλαμβάνονται οι δημοσίευσεις (16), (17) και (23), οι οποίες πραγματεύονται ευρύτερη θεματολογία Μηχανικού]
12. **Sfikas I.P.**, Badogiannis E.G., Trezos K.G. *The effect of silica fume and metakaolin on Self-Compacting Concrete durability*, 7<sup>th</sup> RILEM Conference on Self-Compacting Concrete. Paris, France. Sept 2-4, 2013.
13. Badogiannis E.G., Trezos K.G., **Sfikas I.P.** *Thermal profile of Self-Compacting Concrete mixtures incorporating metakaolin*, 7<sup>th</sup> RILEM Conference on Self-Compacting Concrete. Paris, France. Sept 2-4, 2013.
14. Trezos K.G., Badogiannis E.G., **Sfikas I.P.**, Makris K.E., Smargianaki D.N. *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin*, 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production. Chicago, IL, USA. May 12–15, 2013.
15. **Sfikas I.P.**, Kanellopoulos A., Trezos K.G., Petrou M.F. *Comparison of bond properties of similar Self-Compacting Concrete mixtures cast in two different EU laboratories*, 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production. Chicago, IL, USA. May 12–15, 2013.
16. Trezos K.G., Palieraki V., **Sfikas I.P.** *Effectiveness of GPR on Structural Assessment: Hints for the Potential User. IABSE Symposium: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Rep.99 (30): pp.102-103(2). Rotterdam, Netherlands. May 6-8, 2013. DOI: 10.2749/222137813806474336.
17. Palieraki V., Zeris Ch., Vintzileou E. & **Sfikas I.** *Experimental Investigation of the Behaviour of Interfaces in RC Elements Subjected to Cyclic Actions. Effect of Compressive Stress Normal to the Interface*. 15th World Conference of Earthquake Engineering (WCEE2012). Lisbon, Portugal. September 24-28, 2012.
18. **Sfikas I.P.**, Trezos K.G. *Impact of water to binder ratio and silica fume content on bond properties of self-compacting concrete cube specimens*, 4<sup>th</sup> International Symposium: Bond, Anchorage, Detailing (BIC 2012), fib, RILEM. University of Brescia, Italy. June 17-20, 2012.

19. **Sfikas I.P.**, Kanellopoulos A., Trezos K.G., Petrou M.F. *Reproducibility of Self-Compacting Concrete batches between two different EU laboratories*, fib Symposium: Concrete Structures for Sustainable Community. Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, Sweden. June 11-14, 2012.
20. Trezos K.G, **Sfikas I.P.**, Pavlou D.I. *Water Permeability of Self Compacting Concrete*, 3<sup>rd</sup> fib International Congress & Exhibition: Think Globally, Build locally. Vol.6:5155-5164. Washington, DC. May 29- June 2, 2010.
21. Τρέζος Κ., **Σφήκας Ι.**, Παύλου Δ. *Μελέτη Ιδιοτήτων Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*, 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας. Πάφος, Κύπρος. 2009.
22. Τρέζος Κ., **Σφήκας Ι.** *Διερεύνηση Ιδιοτήτων Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών & Στοιχείων του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας. Αθήνα. 2008.
23. Καρλαύτης Μ., Κεπατσόγλου Κ., **Σφήκας Ι.** *Συστήματα Διαχείρισης Γεφυρών*, Σημειώσεις (χωρίς κρίση) για το Σεμινάριο Γεφυροποιΐας: Σύγχρονες Μέθοδοι Μελέτης – Κατασκευής & Διαχείρισης, Ελληνικό Κέντρο Πληροφόρησης & Επιμόρφωσης (ΕΚΠΕ). 2005.

# 1

---

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### Σύνοψη Κεφαλαίου

Στην πρώτη παράγραφο του Κεφαλαίου πραγματοποιείται μία σύντομη εισαγωγή στο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ). Κατόπιν, γίνεται μία σύντομη αναδρομή σε σημαντικά ιστορικά στοιχεία. Ειδικότερα, τονίζονται οι λόγοι που οδήγησαν στην υλοποίηση του ΑΣΣ, καθώς και τα πλεονεκτήματα και οι νέες απαιτήσεις που ανακύπτουν από τη χρήση του. Στη συνέχεια, παρατίθεται φωτογραφικό υλικό από ενδεικτικές εφαρμογές, καταγράφονται τα σχετικά διεθνή συνέδρια, ενώ καταγράφονται τα κανονιστικά κείμενα και οι οδηγίες που διέπουν την εφαρμογή του.

Στις επόμενες τρεις παραγράφους του Κεφαλαίου, πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες σε θέματα νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, εξετάζονται λεπτομερώς θέματα, όπως η χρήση πρόσμικτων, τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά (θλιπτική, εφελκυστική και καμπτική αντοχή, αντοχή σε συνάφεια) και θέματα ανθεκτικότητας (υδατοπερατότητα, διείσδυση χλωριόντων). Επιπροσθέτως, γίνεται αναφορά στην επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγισιμότητα των μιγμάτων ΑΣΣ, όσο αφορά τις ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

## 1.1. Εισαγωγή

Το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ) αποτελεί αδιαμφισβήτητα μία από τις σπουδαιότερες σύγχρονες πρωτοτυπίες στον τομέα των υλικών και τον κλάδο των κατασκευών σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ικανότητα του ειδικού αυτού σκυροδέματος να πληροί επαρκώς και ομοιογενώς τους κατασκευαστικούς τύπους, χωρίς την ανάγκη πρόσθετης μηχανικής συμπύκνωσης, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα χαρακτηριστικά υψηλής αντοχής και αυξημένης ανθεκτικότητας, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο των ερευνητών όσο και των κατασκευαστών.

Τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξής του, στις αρχές της δεκαετίας του ενενήντα, το νέο υλικό περιοριζόταν για μικρότερης κλίμακας έργα ή σε δευτερεύουσες χρήσεις, όμως σταδιακά κατάφερε να κερδίσει την εμπιστοσύνη του κατασκευαστικού κλάδου και να διεισδύσει σε μεγαλύτερο βαθμό στην κατασκευή, ειδικά σε περιπτώσεις έργων ειδικών απαιτήσεων (περίπλοκης γεωμετρίας, ειδικών προδιαγραφών τελικής επιφάνειας, προκατασκευασμένα στοιχεία κ.λπ.). Αν και στην παρούσα φάση το επίπεδο χρήσης του στην κατασκευή έχει επιστρέψει σε χαμηλά επίπεδα (ανεπίσημα δεδομένα κάνουν λόγο για μερίδιο χρήσης περίπου 1 % στο σύνολο του παραγόμενου σκυροδέματος στον ευρωπαϊκό χώρο και 3 % σε παγκόσμιο επίπεδο), το γεγονός αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί ως συγκυριακό και να αποδοθεί στη διανυόμενη παγκόσμια οικονομική ύφεση, η οποία αποτρέπει τον κατασκευαστικό κλάδο από την αύξηση του εμπροσθοβαρούς κόστους που αφορά στην παρασκευή του ΑΣΣ, παρά τα βραχυπρόθεσμα οφέλη που σχετίζονται με την απλοποίηση της διάστρωσης αλλά και τα μεσο-μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη που ανακύπτουν από τη χρήση του υλικού και σχετίζονται με τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και το μειωμένο κόστος συντήρησης, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στην Παρ. 1.1.4.

Όσο αφορά στην επιστημονική κοινότητα, είναι χαρακτηριστικό ότι, παρά τα περίπου είκοσι πέντε χρόνια από την πρώτη υλοποίησή του το 1989, το ενδιαφέρον των ερευνητών παραμένει εξαιρετικά επίκαιρο. Το γεγονός αυτό αναδεικνύεται από τα συνεχιζόμενα διεθνή συνέδρια με αποκλειστική θεματολογία που αφορά στη χρήση και την εφαρμογή του ΑΣΣ, τα οποία χαίρουν ακόμα και σήμερα σημαντικής συμμετοχής. Τα δύο πλέον πρόσφατα διεθνή συνέδρια με αποκλειστικό αντικείμενο το ΑΣΣ πραγματοποιήθηκαν το 2013, στο Σικάγο (12-15 Μαΐου) και στο Παρίσι (2-4 Σεπτεμβρίου), όπου παρουσιάστηκαν συνολικά 327 σχετικές επιστημονικές εργασίες. Κατά τη συγγραφή της Διατριβής προγραμματίζεται ήδη το επόμενο διεθνές συνέδριο για το ΑΣΣ, στην Χιανμεν της Κίνας (SCC2014).

Στην Ελλάδα, παρά την υφιστάμενη οικονομική κρίση που έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση των έργων από σκυρόδεμα και σε συνεπακόλουθη μείωση των παραγόμενων ποσοτήτων σκυροδέματος γενικότερα, θα μπορούσε ασφαλώς να υποθεθεί ότι οι προοπτικές εξέλιξης του νέου τύπου σκυροδέματος δεν είναι αμελητέες. Συγκεκριμένα, και καθώς σε ελληνικές δημοσιεύσεις έχει ήδη αναφερθεί [Σίδερης κ.ά. (2003), Παπανικολάου και Τριανταφύλλου (2003), Βογιατζής (2008), Γεωργίου (2008), Παπανικολάου (2008), Τελωνιάτη (2008), Τρέζος και Σφήκας (2008), Αναγνωστόπουλος (2009), Τρέζος κ.ά. (2009), Γεωργιάδης (2010)] ότι οι εγχώριες πρώτες ύλες προσφέρονται για την παρασκευή ΑΣΣ, αναμένεται ότι στα επόμενα χρόνια και στο γενικότερο πλαίσιο ανάκαμψης της κατασκευαστικής



δραστηριότητας σε έργα υποδομής το ποσοστό χρήσης του ως προς τη συνολικώς παραγόμενη ποσότητα σκυροδέματος θα διευρυνθεί σε πιο ικανοποιητικά μεγέθη.

Όσο αφορά στους Έλληνες Μηχανικούς, το ενδιαφέρον για την Τεχνολογία του ΑΣΣ αποδεικνύεται από την σημαντική συμμετοχή σε ανοιχτή Ημερίδα που διοργάνωσε το Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας το 2008, το πλήθος των δημοσιεύσεων στο πλέον πρόσφατο 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας στην Πάφο της Κύπρου (Οκτώβριος 2009), αλλά και την πρόσφατη δημοσίευση της Εθνικής Προδιαγραφής για το ΑΣΣ [ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 (2012)] και της Τεχνικής Οδηγίας 5 για το ΑΣΣ από το Σύλλογο Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας<sup>1</sup> [ΣΠΜΕ – Τ.Ο. 5 (2014)].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων του ΑΣΣ θεωρείται ακόμα και σήμερα απαραίτητη για την μεγαλύτερη εξοικείωση με τη συμπεριφορά του στην κατασκευή. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο βάρος έχει μέχρι σήμερα δοθεί σε ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ, που αποτελούν εν γένει το κύριο πλεονέκτημά του εν σχέσει προς το ΣΣ, η παρούσα Διατριβή έρχεται να καλύψει μια ευρεία θεματολογία και να συμπληρώσει την πιο περιορισμένη προγενέστερη βιβλιογραφία σχετικά με τις ιδιότητες του σκληρυμένου ΑΣΣ και, ειδικότερα, σε θέματα μηχανικών χαρακτηριστικών και ανθεκτικότητας.

Στο σημείο αυτό, προτού αναλυθούν πιο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες του ΑΣΣ, και για την καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του ειδικού αυτού σκυροδέματος, θεωρείται χρήσιμος ο ορισμός του ειδικού αυτού σκυροδέματος (Παρ. 1.1.1), μαζί με μία σύντομη αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη του ΑΣΣ από την πρώτη υλοποίησή του έως σήμερα (Παρ. 1.1.2). Στη συνέχεια, τονίζονται οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη και χρήση του ΑΣΣ (Παρ. 1.1.3), ενώ γίνεται μνεία στα πλεονεκτήματά του (Παρ. 1.1.4) και στις νέες απαιτήσεις (Παρ. 1.1.5) που ανακύπτουν από τη χρήση του. Στο τελευταίο τμήμα του υποκεφαλαίου 1.1, καταγράφονται τα προγενέστερα διεθνή συνέδρια με αποκλειστικό αντικείμενο το ΑΣΣ (Παρ. 1.1.6), καθώς και τα κανονιστικά κείμενα – οδηγίες που διέπουν την εφαρμογή του (Παρ. 1.1.7), ενώ παρατίθεται ενδεικτικό φωτογραφικό υλικό από εφαρμογές του νέου τύπου σκυροδέματος ανά τον κόσμο (Παρ. 1.1.8).

### 1.1.1. Ορισμός

Σύμφωνα με τους ορισμούς που δίδονται από τα κυριότερα κείμενα αναφοράς [ACI 237R (2007), EFNARC (2005), ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 (2012), ΣΠΜΕ – Τ.Ο. 5 (2014)], το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ) είναι ένα υπέρρευστο σκυρόδεμα, συχνά υψηλής αντοχής και αυξημένης ανθεκτικότητας, το οποίο έχει τη δυνατότητα να ρέει διαμέσου πυκνά οπλισμένων ή γεωμετρικά σύνθετων δομικών στοιχείων μέσω του ίδιου βάρους του, χωρίς να χάνει την ομοιογένειά του. Συγκεκριμένα, το ΑΣΣ δεν παρουσιάζει απόμιξη και δεν απαιτεί συμπληρωματική συμπύκνωση (μέσω μηχανικής δόνησης) για την ομοιογενή πλήρωση των τύπων. Γενικά, το ΑΣΣ είναι ένα σκυρόδεμα που παράγεται από τα ίδια υλικά με το συμβατικό σκυρόδεμα (ΣΣ) με την προσθήκη μεγαλύτερων ποσοτήτων χημικών πρόσθετων ή/ και πρόσμικτων, τα οποία προσδίδουν στο νωπό μίγμα αυξημένη ρευστότητα και επαρκή σταθερότητα.

<sup>1</sup> Ο συντάξας της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής έχει συνεισφέρει ως μέλος της Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος του ΣΠΜΕ στη συγγραφή, μεταξύ άλλων, και της Τεχνικής Οδηγίας 5 (2014) για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία το ΑΣΣ αναφέρεται συνηθέστερα ως self-compacting concrete (SCC), self-consolidating concrete ή self-levelling concrete (παλαιότερα χρησιμοποιήθηκε και ο όρος high performance concrete, ο οποίος όμως έχει πιο ευρεία και γενική έννοια και δεν συνδέεται κατ' ανάγκη με το ΑΣΣ).

Ακολουθεί μία σύντομη αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη του ΑΣΣ, από την πρώτη ιδέα της χρήσης του έως σήμερα.

### 1.1.2. Σύντομη ιστορική αναδρομή

Είναι γνωστό, ότι ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα των κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος σχετίζεται με την ανθεκτικότητα του υλικού, η οποία επηρεάζεται άμεσα και σημαντικά από την επαρκή συμπίκνωση του υλικού από άρτια εκπαιδευμένο και καταρτισμένο προσωπικό. Η μειωμένη, όμως, κατάρτιση του εμπλεκόμενου τεχνικού προσωπικού οδηγεί στην αδυναμία εφαρμογής της απαραίτητης συμπίκνωσης, με συνεπακόλουθη απώλεια των ευεργετικής και εξαιρετικά σημαντικής αυτής ιδιότητας.

Το γεγονός αυτό, κατ' απαίτηση ουσιαστικά του κατασκευαστικού κλάδου, οδήγησε το 1983 την επιστημονική κοινότητα της Ιαπωνίας στην έναρξη αναζήτησης μίας μόνιμου χαρακτήρα λύσης στο πρόβλημα του διαρκώς μειούμενου πλήθους κατάλληλα εκπαιδευμένου τεχνικού προσωπικού. Μία από τις λύσεις που προτάθηκαν για την αντιμετώπιση της παραπάνω έλλειψης προσωπικού αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός νέου τύπου σκυροδέματος, το οποίο θα απαιτούσε μικρότερο πλήθος τεχνιτών ή τεχνίτες με περιορισμένη ή και καθόλου εμπειρία. Ένα τέτοιο σκυρόδεμα θα έπρεπε να χαρακτηρίζεται από την ικανότητα να ρέει υπό την αποκλειστική επιρροή του ίδιου βάρους του, χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα εμπλοκής αδρανών ή απόμειξης, και να αυτοσυμπυκνώνεται χωρίς την ανάγκη πρόσθετης μηχανικής συμπίκνωσης. Βάσει των παραπάνω, οι ερευνητές υπέθεσαν ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί ένα ομοιογενές και ανθεκτικό σκυρόδεμα, ανεξαρτήτως της ποιότητας της εργασίας.

Η πρόταση για τη χρήση αυτού του τύπου σκυροδέματος, το οποίο αρχικώς παρασκευάστηκε αποκλειστικά με τα ίδια υλικά παρασκευής που παρασκευαζόταν το Συμβατικό Σκυρόδεμα (ΣΣ) και ονομάστηκε Σκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητας (High Performance Concrete), ήλθε τον Φεβρουάριο του 1986 από τον Καθ. Okamura του Πανεπιστημίου του Τόκιο (το οποίο μεταγενέστερα μετονομάστηκε σε Ινστιτούτο Τεχνολογίας Kochi). Καθώς την ίδια εποχή, η ίδια ορολογία χρησιμοποιήθηκε από τον Καθ. Aïtcin [κατά τον [Gagne et al. \(1989\)](#), όπως αναφέρεται στους [Okamura and Ouchi \(2003\)](#)] για τον προσδιορισμό του σκυροδέματος υψηλής ανθεκτικότητας με χαμηλό λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), το υλικό αποφασίστηκε να μετονομαστεί σε Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ).

Ο Καθ. Okamura πέτυχε την παρασκευή και την πρώτη χρήση του ΑΣΣ δύο χρόνια αργότερα, το 1988, οπότε και το νέο σκυρόδεμα ήταν έτοιμο για δοκιμές σε μεγάλη κλίμακα. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν μελέτες εφαρμογής με αντικείμενο την εργασιμότητα του υλικού [[Ozawa et al. \(1989\)](#), [Okamura et al. \(1993\)](#), [Maekawa and Ozawa \(1999\)](#), όπως αναφέρονται από τους [Okamura and Ouchi \(2003\)](#)]. Μέσα στα αμέσως επόμενα χρόνια και βάσει των θετικών αποτελεσμάτων των δοκιμών το ΑΣΣ κατάφερε να κερδίσει την αποδοχή των Ιαπώνων κατασκευαστών. Συγκεκριμένα, το

ΑΣΣ άρχισε να εξετάζεται λεπτομερώς και να εισάγεται σε εφαρμογή στην Ιαπωνία, στην αρχή της δεκαετίας του ενενήντα. Παράλληλα, το 1994, η Ιαπωνική Κοινότητα Πολιτικών Μηχανικών (Japan Society of Civil Engineers, JSCE) προχώρησε στη δημιουργία μιας ερευνητικής επιτροπής για το ΑΣΣ, η οποία εξέδωσε Κανόνες Τέχνης και Τεχνικής για το ΑΣΣ [JSCE (1996)]. Στη συνέχεια, από την ίδια κοινότητα, εκδόθηκαν οι Κανόνες Πρακτικής Εφαρμογής του ΑΣΣ [JSCE (1998)], όπου περιελήφθη η ταξινόμηση των διαφορετικών τύπων σκυροδέματος, καθώς και ο ακριβής ορισμός της ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης.

Στην Ευρώπη και ειδικότερα στις Σκανδιναβικές Χώρες η τεχνολογία του ΑΣΣ μεταφέρθηκε κατά τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του ενενήντα, η χρήση του, όμως, διευρύνθηκε κυρίως προς το τέλος της ίδιας δεκαετίας, ενώ η εφαρμογή του αφορούσε κυρίως έργα προκατασκευής. Τα επόμενα χρόνια, το ΑΣΣ χρησιμοποιήθηκε σε επισκευαστικές εφαρμογές σημαντικών υποδομών (γέφυρες, σήραγγες, κτήρια στάθμευσης αυτοκινήτων, τοίχοι αντιστήριξης κ.λπ.), στις οποίες, μέσω της χρήσης του νέου τύπου σκυροδέματος, διασφαλίστηκαν, αφενός, η επαρκής πλήρωση δύσκολων διατομών και, αφετέρου, η υψηλής ποιότητας και αισθητικής τελική επιφάνεια. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι πρώτες οδηγίες, υπό μορφή Κανόνων Τέχνης και Τεχνικής, για την παρασκευή και την εφαρμογή του ΑΣΣ ήλθαν στη δημοσιότητα το 2002 [EFNARC (2002)]. Από τη σύμπραξη μεγάλων ευρωπαϊκών οργανισμών ήδη από το 1994, προέκυψε το πρώτο πλήρες κείμενο Οδηγιών για το ΑΣΣ, το 2005 [EFNARC (2005)], πάνω και στο οποίο βασίστηκε στη συνέχεια το μέρος 9 του σχετικού Ευρωπαϊκού Προτύπου Σκυροδέματος [EN 206-9 (2010)]. Στην πλέον πρόσφατη έκδοση του Ευρωπαϊκού Προτύπου [EN 206 (2013)], το μέρος 9 ενσωματώθηκε στο κύριο μέρος του προτύπου. Στις ΗΠΑ, οι πρώτες οδηγίες για το ΑΣΣ εκδόθηκαν από το Ινστιτούτο Προκατασκευασμένου/ Προεντεταμένου Σκυροδέματος το 2003 [PCI TR-6-03 (2003)], ενώ ακολούθησαν οι επίσημες οδηγίες από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος το 2007 [ACI 237R (2007)], οι οποίες δεν έχουν έκτοτε επικαιροποιηθεί.

Στον ελληνικό χώρο, οι κυριότερες εγχώριες βιομηχανίες τσιμέντου και έτοιμου σκυροδέματος, σε συνεργασία με σημαντικές διεθνείς και τοπικές βιομηχανίες χημικών πρόσθετων, έχουν τα τελευταία χρόνια εισάγει το ΑΣΣ στην παραγωγική τους αλυσίδα, αν και η ευρεία χρήση του προσανατολίζεται κυρίως σε ειδικές ή δευτερεύουσες κατασκευές. Πάντως, μετά από πλήθος δοκιμών και μικρότερων ή μεγαλύτερων εφαρμογών, έχει διαπιστωθεί ότι οι προοπτικές εξέλιξης του νέου τύπου σκυροδέματος στην Ελλάδα μπορούν να θεωρηθούν τουλάχιστον ικανοποιητικές, καθώς οι εγχώριες πρώτες ύλες προσφέρονται για την παρασκευή του, ενώ έχει ήδη αποκτηθεί σημαντική τεχνογνωσία.

Σταδιακά και μέχρι σήμερα, το ΑΣΣ έχει κερδίσει την ευρεία αποδοχή των κατασκευαστών σε παγκόσμιο επίπεδο και η χρήση του έχει διευρυνθεί σημαντικά. Σημειώνεται, πάντως, ότι το ΑΣΣ εξακολουθεί να θεωρείται ένα σκυρόδεμα πολυτελείας, κυρίως λόγω του αυξημένου πρωτογενούς κόστους του (μη συνυπολογιζομένων, δηλαδή, των πλεονεκτημάτων του εν χρόνω) και της απαιτούμενης εμπειρίας σε επίπεδο επιβλέποντος Μηχανικού. Σύμφωνα με στοιχεία που ανακοινώθηκαν σε πρόσφατο Συνέδριο για το ΑΣΣ το 2010 [Nagataki et al. (2010)], το μερίδιο αγοράς του ΑΣΣ δεν ξεπερνά το 3% της συνολικώς παραγόμενης ποσότητας σκυροδέματος. Πάντως, τονίζεται ότι τοπικά, σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, αλλά και στις ΗΠΑ, το σχετικό ποσοστό είναι μεγαλύτερο. Το ενδιαφέρον

του κατασκευαστικού κλάδου παραμένει ακόμα υψηλό, γεγονός που πιστοποιείται από την συνεχιζόμενη ενασχόληση της επιστημονικής κοινότητας με το ΑΣΣ και την πραγματοποίηση συνεδρίων με αποκλειστικό θέμα τον έλεγχο και την εφαρμογή του σκυροδέματος αυτού, με πλέον πρόσφατα τα Συνέδρια του Σικάγο και του Παρισιού.

### 1.1.3. Σκοπός της χρήσης

Μελετώντας τα ιστορικά δεδομένα της προηγούμενης παραγράφου, είναι σαφές ότι οι λόγοι που οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα να αναζητήσει μια βελτιωμένη μορφή σκυροδέματος, συνοψίζονται σε δύο αλληλεμπλεκόμενους βασικούς άξονες.

Ο *πρώτος άξονας* σχετίζεται με τη συχνή αδυναμία ορθής διάστρωσης του ευρέως χρησιμοποιούμενου Συμβατικού Σκυροδέματος (ΣΣ). Η έλλειψη εξειδίκευσης του τεχνικού προσωπικού συχνά αποτρέπει την ορθή υλοποίηση της απαιτούμενης εκτεταμένης συμπίκνωσης μέσω μηχανικής δόνησης, η οποία αποσκοπεί αφενός στην απομάκρυνση του εγκλωβισμένου αέρα από το εσωτερικό του υλικού και αφετέρου στην ομοιογενή πλήρωση των τύπων. Το συνεπαγόμενο εκτεταμένο δίκτυο πόρων, αλλά και οι πιθανές εμφανείς –και, πολύ χειρότερα, κρυφές, στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος– σπηλαιώσεις, οδηγούν σε μειωμένες αντοχές, περιορισμένη ανθεκτικότητα, μη ορθή συνεργασία του σκυροδέματος και του χάλυβα και έλλειψη ομοιογένειας του τελικού προϊόντος, ενώ σημαντικά είναι και τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην ποιότητα των τελικών επιφανειών.

Ο *δεύτερος άξονας* σχετίζεται με τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των αντισεισμικών κανονισμών, οι οποίες έχουν οδηγήσει στην ανάγκη για πυκνά οπλισμένα μέλη, στα οποία η χρήση των δονητών μάζας είναι άλλοτε δυσχερής και αναποτελεσματική και άλλοτε ακόμα και τελείως αδύνατη, λόγω της αδυναμίας του δονητικού στελέχους να εισέλθει διαμέσου των πυκνών χαλύβδινων οπλισμών στο εσωτερικό των σκυροδετούμενων μελών.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τις δυσχερείς συνθήκες εργασίας λόγω των υψηλών επιπέδων θορύβου, του μεγάλου πλήθους εμπλεκόμενου προσωπικού και του απαιτούμενου εξοπλισμού (δονητές μάζας, καλώδια παροχής ρεύματος, κ.ά.), οδηγούν συχνά σε κακοτεχνίες, πολλές από τις οποίες βρίσκονται συχνά στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος και δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές. Η χρήση του ΑΣΣ έρχεται να αντιμετωπίσει τα παραπάνω προβλήματα και να προσδώσει στο τελικό προϊόν την απαιτούμενη ομοιογένεια και ποιότητα, περιορίζοντας παράλληλα τόσο τον όγκο εργασίας όσο και τυχόν αβεβαιότητες που σχετίζονται με την επιτυχία της διάστρωσης. Πιο αναλυτικά τα πλεονεκτήματα του νέου υλικού καταγράφονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

### 1.1.4. Πλεονεκτήματα<sup>2</sup>

Ένα σωστά διαστρωμένο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα με κατάλληλες αναλογίες συστατικών μπορεί να έχει σημαντικά οικονομικά και τεχνολογικά πλεονεκτήματα για όλους τους εμπλεκόμενους, μηχανικούς, εργολάβους, εργατικό προσωπικό, περιοίκους και ιδιοκτήτες ή χρήστες, αλλά και για το περιβάλλον.

---

<sup>2</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευτεί, στο πλαίσιο της συνεισφοράς του συντάκτη της παρούσας Διατριβής στην Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος του ΣΠΜΕ, στην Τεχνική Οδηγία 5 για το ΑΣΣ [ΣΠΜΕ – Τ.Ο. 5 (2014)].

Ουσιαστικά, το κίνητρο πίσω από τη χρήση του ΑΣΣ είναι η εξοικονόμηση χρηματικών πόρων κατά τη διάστρωση, αλλά και η εξαιρετικά αυξημένη απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, το ΑΣΣ διακρίνεται για τα ακόλουθα πλεονεκτήματά του, τα οποία χωρίζονται σε έξι βασικούς άξονες [ACI 237R (2007), Βογιατζής (2008), Γεωργίου (2008), ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 (2012), Παπανικολάου (2008), Παπανικολάου (2006), Τελωνιάτη (2008), ΣΠΜΕ – Τ.Ο.5 (2014)]:

- Αυξημένη παραγωγικότητα
  - Ικανότητα πλήρωσης διατομών με υψηλό ποσοστό οπλισμού ή/ και περίπλοκης γεωμετρίας (π.χ. κλειστοί τύποι με αρνητικές κλίσεις ή κατασκευές αγκύρωσης καλωδίων σε γέφυρες) ή επίπεδων επιφανειακών στοιχείων (π.χ. δάπεδα μεγάλης επιφάνειας), χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα της κατασκευής. Η ικανότητα αυτή διασφαλίζει καλύτερη παραγωγικότητα, αλλά μειώνει σημαντικά και το εργατικό κόστος.
  - Εξάλειψη ανάγκης για χρήση βοηθητικών μέσων συμπίκνωσης (δονητές) και απαιτούμενων καλωδίων ηλεκτροδότησής τους. Η απουσία ανάγκης συμπίκνωσης αυξάνει την ταχύτητα ολοκλήρωσης της διάστρωσης, μειώνοντας παράλληλα το εργατικό κόστος.
  - Μεγαλύτερη ευελιξία στην κατανομή των σημείων έγχυσης, η οποία μπορεί να μειώσει την ανάγκη για συχνές μετακινήσεις των αναμικτήρων και του δικτύου αντλιών (με συνεπακόλουθη μείωση του πλήθους των αντλιών, των χειριστών τους, κ.λπ.). Αυτή η ευελιξία μπορεί να μειώσει τόσο τη διάρκεια της σκυροδέτησης, όσο και τους απαιτούμενους εργατικούς και οικονομικούς πόρους.
  - Επιτάχυνση ολοκλήρωσης σκυροδέτησης λόγω του υψηλότερου ρυθμού διάστρωσης (ταχύτερη κατασκευή).
  - Μεγαλύτερη ευελιξία στον λεπτομερή σχεδιασμό του οπλισμού, καθώς αποφεύγεται η ανάγκη πρόβλεψης θέσεων για την εφαρμογή της συμπίκνωσης (π.χ. ανεπαρκές δέσιμο οπλισμών, μεγαλύτερες αποστάσεις οπλισμών) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, επιτρέπεται η χρήση πυκνών οπλισμών μικρής διαμέτρου για τον περιορισμό της ρηγμάτωσης.
- Μειωμένο εργατικό και εξοπλιστικό κόστος
  - Απουσία ανάγκης για μηχανική συμπίκνωση (δόννηση) για να διασφαλιστεί η απαιτούμενη ομοιογένεια του υλικού, γεγονός που οδηγεί σε μείωση κόστους αγοράς ή ενοικίασης, αλλά και κόστους συντήρησης και χρήσης, κατάλληλου εξοπλισμού.
  - Μικρότερες απαιτήσεις για διαδικασίες εξομάλυνσης – επιπέδωσης, καθώς η ικανότητα αυτό-επιπέδωσης διασφαλίζει επίπεδες και ομαλές επιφάνειες. Παράλληλα, μειώνονται οι ανάγκες για προμήθεια και τοποθέτηση υλικών, που χρησιμοποιούνται για την επιπέδωση και την προετοιμασία υποστρωμάτων για την εφαρμογή των τελικών επιστρώσεων (γεμίσματα).
  - Ελαχιστοποίηση εργασιών επισκευής λόγω κακοτεχνιών, που συνεπάγεται μείωση εργατοωρών και επισκευαστικών υλικών, αλλά και απουσία αντιαισθητικών επισκευών σε εμφανείς επιφάνειες.
  - Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τύπων λόγω της μειωμένου βαθμού φθοράς τους ανά σκυροδέτηση, λόγω της απουσίας δόννησης.

- Αυξημένη απόδοση υλικού και ανθεκτικότητα
  - Αποσύνδεση επίτευξης επιθυμητών μηχανικών χαρακτηριστικών από την ικανότητα του προσωπικού εφαρμογής της συμπύκνωσης.
  - Μείωση διασποράς μηχανικών ιδιοτήτων υλικού.
  - Βελτίωση ανθεκτικότητας λόγω της πυκνότερης δομής, όπως αυτή προκύπτει από τη χρήση μικρότερου μέγιστου κόκκου αδρανούς (γαρμπιλοσκυρόδεμα), λεπτόκοκκων ποζολανικών ή μη πρόσμικτων. Συνήθη πρόσμικτα αποτελούν οι ασβεστολιθικές πληρωτικές κονίες (στη συνέχεια του κειμένου θα αναφέρονται ως (ασβεστολιθικό) φίλερ), η πυριτική παιπάλη, η ιπτάμενη τέφρα, ο μετακαολίνης, κ.λπ. (ποζολανικά).
- Αναβαθμισμένο περιβάλλον εργασίας:
  - Μείωση εργοταξιακού θορύβου (κρίσιμος παράγοντας ειδικά σε αστικές περιοχές και σε διατομές που απαιτούν υψηλή δονητική συμπύκνωση) σε επίπεδα κοντά ή χαμηλότερα του επιτρεπόμενου ορίου 85 dB (A) , όπως περιγράφεται στην Οδηγία 188 του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου [ECD 188/ECC (1986)]:
    - Μείωση της ανάγκης δόνησης για κατασκευές που τυπικώς απαιτούν την εφαρμογή εκτεταμένης συμπύκνωσης (όπως στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα ή οι εφαρμογές προκατασκευής). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χρήση αθόρυβου σκυροδέματος μπορεί δυναμικά να επεκτείνει τη διάρκεια της διάστρωσης σε αστικές περιοχές, καθιστώντας έτσι δυνατό τον προγραμματισμό μέρους των κατασκευαστικών διαδικασιών σε ώρες που δεν εμποδίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία της περιοχής (π.χ. κυκλοφορία)
    - Μείωση ασφαλιστρών. Εγκαταστάσεις προκατασκευής που παράγουν σημαντική ηχητική ρύπανση υποχρεώνονται στην πληρωμή υψηλών ασφαλιστρών στις ασφαλιστικές εταιρείες, που είναι υπεύθυνες για την θεραπεία των εργατών με προβλήματα ακοής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μερική μείωση του πρόσθετου κόστους του ΑΣΣ, καθιστώντας το ελκυστικό για τις εργασίες προκατασκευής.
  - Ελαχιστοποίηση της φυσικής καταπόνησης από τη χρήση δονητών (π.χ. εξάλειψη αγγειακών δυσλειτουργιών, όπως το σύνδρομο των «λευκών δακτύλων») και πιθανότητας εργατικών ατυχημάτων.
  - Μείωση συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων πλησίον των θέσεων σκυροδέτησης.
  - Μείωση πλήθους εργατικών ατυχημάτων, λόγω του ασφαλέστερου εργασιακού περιβάλλοντος. Η εξάλειψη εντατικών και κοπιαστικών εργασιών, αλλά και η απουσία καλωδίων ηλεκτροδότησης βοηθητικών μέσων συμπύκνωσης μπορούν να μειώσουν σημαντικά τους κινδύνους πτώσης.
- Υψηλή αισθητική
  - Βελτιώνει την τελική επιφάνεια, καθιστώντας την λεία, χωρίς σπηλαιώσεις (φωλιές) και αποτυπώματα εξίδρωσης ή αποχρωματισμού. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτυγχάνονται με κατάλληλα σχεδιασμένα μίγματα ΑΣΣ, υψηλής ποιότητας τύπους με επαρκείς μεθόδους και μέσα αποσύνδεσης και κατάλληλες πρακτικές σταθερής τοποθέτησης. Επιφάνειες υψηλής ποιότητας

είναι κρίσιμες στο αρχιτεκτονικό σκυρόδεμα (π.χ. ανάγλυφες επιφάνειες εμφανών σκυροδεμάτων) και σε άλλες περιπτώσεις προκατασκευής.

- Αειφορία και βιώσιμη ανάπτυξη
  - Κατανάλωση παραπροϊόντων βιομηχανίας (π.χ. πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, λεπτόκοκκα αδρανή λατομείων, κ.λπ.) ως πληρωτικά πρόσμικτα σκυροδέματος, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος:
    - λόγω της μη απόρριψης των εν λόγω παραπροϊόντων ως περιττά υλικά.
    - λόγω της αντικατάστασης μέρους του τσιμέντου, που συνεπάγεται μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που είναι συνδεδεμένες με την παραγωγή του.

### 1.1.5. Νέες απαιτήσεις

Ταυτόχρονα με τα σημαντικά πλεονεκτήματα του νέου υλικού, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, πρέπει να καταστεί σαφές ότι το νέο σκυρόδεμα συνοδεύεται και από νέες απαιτήσεις, που είναι σημαντικές για την επιτελεσματικότητα και την αποτελεσματικότητά του. Αυτές οι απαιτήσεις συνοψίζονται παρακάτω:

- Εφαρμογή Συστήματος Ελέγχου Ποιότητας (Quality Control System) κατά την παρασκευή.
- Ενδεδειγμένη γνώση φυσικοχημικών ιδιοτήτων των συστατικών υλικών. Εξοικείωση με τη χρήση χημικών πρόσθετων και πρόσμικτων.
- Έλεγχος του αναμιγνυόμενου νερού – σύστημα ελέγχου υγρασίας αδρανών.
- Χρήση ποιοτικών τύπων (ξυλότυποι, μεταλλότυποι), ικανών να ανθίστανται στις υψηλότερες υδροστατικές πιέσεις του νωπού σκυροδέματος, αλλά και κατάλληλων λιπαντικών ή τεχνικών μέσων για την εύκολη απομάκρυνσή τους.
- Έμπειρο τεχνικό προσωπικό.

### 1.1.6. Διεθνή Συνέδρια

Από τα τέλη της δεκαετίας του ενενήντα, το ισχυρό ενδιαφέρον των ερευνητών ως αποτέλεσμα της αποδοχής του ΑΣΣ από την αγορά, καθώς και η ευρύτητα του ερευνητικού αντικειμένου, οδήγησαν στη διοργάνωση του πρώτου διεθνούς συνεδρίου από τον διεθνή οργανισμό RILEM το 1999, με αποκλειστικό αντικείμενο το ΑΣΣ. Ακολούθησαν Συνέδρια ΑΣΣ στη βόρειο Αμερική και την Ιαπωνία, ενώ ορισμένα πραγματοποιήθηκαν υπό μορφή συνδιοργάνωσης. Μέχρι σήμερα (2014) έχουν πραγματοποιηθεί συνολικά δώδεκα Διεθνή Συνέδρια σε παγκόσμιο επίπεδο με αποκλειστικό αντικείμενο το ΑΣΣ. Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι σημαντικό μέρος από τα αποτελέσματα της παρούσας Διατριβής έχουν δημοσιευθεί (με διαδικασία κρίσης) στα τρία πιο πρόσφατα Συνέδρια για το ΑΣΣ (Μόντρεαλ 2010, Σικάγο 2013, Παρίσι 2013). Από το πλήθος και τη συχνότητα των Συνεδρίων, μια συνοπτική καταγραφή των οποίων ακολουθεί, μπορεί να διαπιστωθεί το επίκαιρο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας σχετικά με την εφαρμογή του ΑΣΣ. Το επόμενο Συνέδριο για το ΑΣΣ προγραμματίζεται ήδη για το τρέχον έτος (2014) στην Κίνα, υπό την αιγίδα του οργανισμού RILEM.

- 1998** International workshop on SCC, Kochi, Japan.
- 1999** 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden.
- 2001** 2<sup>nd</sup> International fib & RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, Japan.
- 2002** 1<sup>st</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete, Center for Advanced Cement-based Materials, North Western University, Chicago, USA.
- 2003** 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC 2003), Reykjavik, Iceland.
- 2005** 2<sup>nd</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 4<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC2005), Chicago, Illinois, USA.
- 1<sup>st</sup> International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2005), Changsha, China.
- 2007** 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC 2007), Ghent, Belgium.
- 2008** 3<sup>rd</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete 2008 (SCC 2008): Challenges and Barriers to Application, Chicago Illinois, USA.
- 2009** 2<sup>nd</sup> International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2009), Beijing, China.
- 2010** 4<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC 2010), Montreal, Canada.
- 2013** 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2013), Chicago, Illinois, USA.
- 7<sup>th</sup> RILEM Conference on Self-Compacting Concrete (SCC 2013), Paris, France.
- 2014** 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2014), Xiamen, China.

#### **1.1.7. Κανονιστικά κείμενα – Οδηγίες**

Η εφαρμογή του ΑΣΣ διέπεται επισήμως από κανονισμούς και πρότυπες διαδικασίες, αλλά και διεθνώς ή εθνικώς αναγνωρισμένες οδηγίες. Ακολουθεί κατάλογος με τις κυριότερες πηγές, που καλύπτουν όλο το εύρος εφαρμογής και χρήσης του ΑΣΣ, με χρονολογική σειρά δημοσίευσης:

- [RILEM Report 23 TC 174-SCC \(2000\)](#) – State-of-the-Art.
- [EFNARC \(2002\)](#) – Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete.
- [PCI TR-6-03 \(2003\)](#) – Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants.



- [EFNARC \(2005\)](#) – European Guidelines for Self Compacting Concrete.
- [Concrete Society TR No. 62 \(2005\)](#) – Self-compacting Concrete - A Review.
- [RILEM Report 35 TC 188-CSC \(2006\)](#) – Casting of Self Compacting Concrete.
- [RILEM Report 38 TC 205-DSC \(2007\)](#) – Durability of Self-Compacting Concrete.
- [ACI 237R \(2007\)](#) – Self-Consolidating Concrete.
- [EN 206-9 \(2010\)](#) – Additional Rules for Selfcompacting Concrete.
- [ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 \(2012\)](#) – Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα.
- [ΣΠΜΕ – Τεχνική Οδηγία 5 \(2014\)](#) – Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα.
- [RILEM State-of-the-Art Report \(2014\)](#) – Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete.

### 1.1.8. Παραδείγματα εφαρμογών

Από το **Σχήμα 3** έως και το **Σχήμα 11** παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης ΑΣΣ ως υλικού κατασκευής σε διάφορες κατασκευές ανά τον κόσμο.



**Σχήμα 3** Εναέρια πεζογέφυρα (I-4), Ορλάντο, Φλόριντα, ΗΠΑ [πηγή: [ACI 237R \(2007\)](#)]



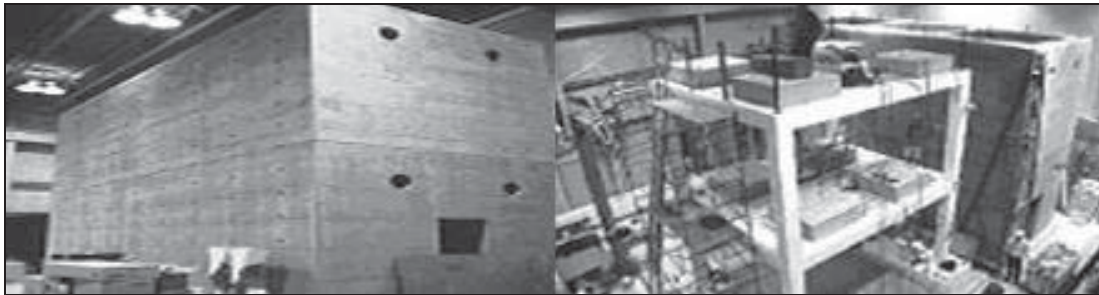
**Σχήμα 4** Εθνικό Μουσείο Ινδο-Αμερικανών, Ουάσιγκτον, Κολούμπια, ΗΠΑ [πηγή: [ACI 237R \(2007\)](#)]



**Σχήμα 5** Παραγωγή διπλών Τ, Εμπορικά Προϊόντα Σκυροδέματος, Chambersburg, Πενσυλβανία, ΗΠΑ [πηγή: [ACI 237R \(2007\)](#)]



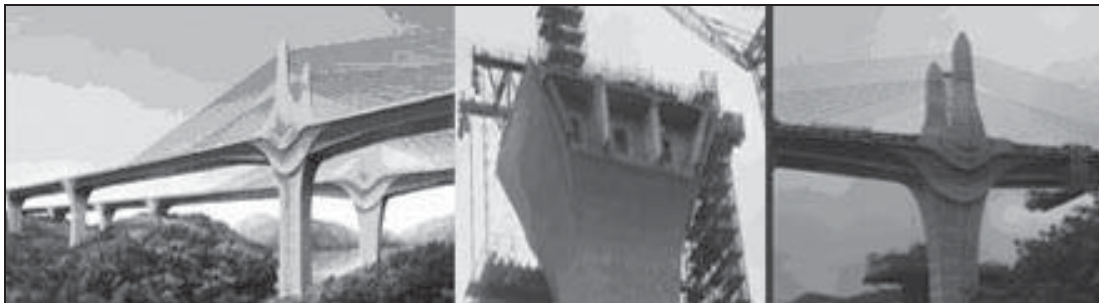
Σχήμα 6 Κέντρο Σύγχρονης Τέχνης Ρόξενταλ, Σινσινάτι, Οχάιο [πηγή: [ACI 237R \(2007\)](#)]



Σχήμα 7 Εργαστηριακά τοιχεία, Πανεπιστήμιο Σέρμπρουκ, Κεμπέκ, Καναδάς [πηγή: [ACI 237R \(2007\)](#)]



Σχήμα 8 Βάσεις αγκύρωσης γέφυρας Akashi-Kaikyo, Ιαπωνία [πηγή: [Okamura and Ouchi \(2003\)](#)]



Σχήμα 9 Γέφυρα Ritto (τμήμα αυτοκινητόδρομου διπλής κατευθύνσεως) [πηγή: [Google Εικόνες](#)]



Σχήμα 10 Ομόκεντρα κυκλικά τοιχεία στο Κέντρο Τέχνης Meudon [πηγή: [Corradi et al. \(2003\)](#)]



Σχήμα 11 (α) Τοίχιο στη Χάγη, (β) Στάδιο στο Άμστερνταμ, (γ) Τόξα [πηγή: Walraven (2010)]

## 1.2. Γενικά στοιχεία για το νωπό ΑΣΣ

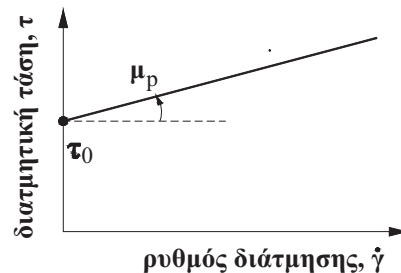
Στο Κεφάλαιο 1.2 πραγματοποιείται αρχικά μία σύντομη εισαγωγή στις ρεολογικές ιδιότητες του ΑΣΣ (Παρ. 1.2.1) και, ειδικότερα, στο ρεολογικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του νωπού μίγματος (Παρ. 1.2.1.1), στις κύριες ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί ένα επιτυχημένο μίγμα ΑΣΣ στη νωπή του φάση (Παρ. 1.2.1.2) και στις ειδικές δοκιμές που εκτιμούν τις παραπάνω ιδιότητες (Παρ. 1.2.1.3). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία περιγραφή των συστατικών υλικών που εν γένει χρησιμοποιούνται για την παρασκευή μιγμάτων ΑΣΣ (Παρ. 1.2.2), με έμφαση στα συστατικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο των πειραμάτων της παρούσας Διατριβής. Ειδικότερα, περιγράφονται και σχολιάζονται βάσει και των κανονισμών που τα διέπουν: το τσιμέντο (Παρ. 1.2.2.1), τα πρόσμικτα (Παρ. 1.2.2.2), τα αδρανή (Παρ. 1.2.2.3), το νερό αναμίξεως (Παρ. 1.2.2.4) και τα χημικά πρόσθετα (Παρ. 1.2.2.5).

### 1.2.1. Ρεολογικές ιδιότητες

#### 1.2.1.1. Ρεολογικό μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το βασικό πλεονέκτημα του ΑΣΣ, το οποίο αποτέλεσε και το έναυσμα για την περαιτέρω χρήση του, αποτελεί η εξαιρετικά βελτιωμένη ρεολογία του. Συγκεκριμένα, το ΑΣΣ συμπεριφέρεται ως ρευστό που ακολουθεί το μοντέλο Bingham (Σχήμα 12), βάσει του οποίου η διατμητική τάση,  $\tau$  (σε  $\text{N/mm}^2$ ) ορίζεται ως:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$$



Σχήμα 12 Ρεολογικό μοντέλο Bingham

όπου  $\tau_0$ : η τάση διαρροής ( $\text{N/mm}^2$ ), που αντιστοιχεί στην ελάχιστη διατμητική τάση που απαιτείται για την έναρξη της ροής (σημειώνεται ότι για τιμές  $\tau < \tau_0$ , το μίγμα δε ρέει, μιας και δεν υφίσταται παραμόρφωση).

$\mu_p$ : το πλαστικό ιξώδες ( $\text{N}\cdot\text{s/mm}^2$ ), που αντιστοιχεί στην αντίσταση του υλικού (στην πλαστική του κατάσταση) να υποστεί μια δεδομένη ροή.

$\dot{\gamma}$ : ο ρυθμός διάτμησης.

Βάσει των παραπάνω, το νωπό ΑΣΣ πρέπει να χαρακτηρίζεται αφενός από χαμηλή τάση διαρροής, ώστε να διασφαλίζεται η υψηλή παραμορφωσιμότητα του υλικού, και αφετέρου από μέσο πλαστικό ιξώδες, ώστε να διασφαλίζεται η επιθυμητή συνεκτικότητα και να διατηρείται η ομοιογένεια μεταξύ των σωματιδίων στη μάζα του σκυροδέματος. Αποτέλεσμα των παραπάνω χαρακτηριστικών του νωπού ΑΣΣ αποτελεί ο περιορισμός των συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων των συστατικών του, γεγονός που συνεισφέρει τόσο στην ικανοποιητική ρευστότητα του μίγματος όσο και στον περιορισμό της πιθανότητας απόμιξης.

### 1.2.1.2. Κύριες ιδιότητες

Οι κύριες ιδιότητες που πρέπει ταυτόχρονα να πληροί ένα μίγμα ΑΣΣ στη νωπή του φάση είναι οι ακόλουθες τρεις, αν και σε εξειδικευμένες εφαρμογές είναι πιθανό να υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις – ιδιότητες, όπως για παράδειγμα η αρτιότητα των τελικών επιφανειών<sup>3</sup>. Σημειώνεται ότι οι ακόλουθες ιδιότητες δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αν και η συσχέτισή τους δεν είναι απολύτως ξεκάθαρη και επαρκώς ποσοτικοποιημένη.

- **ικανότητα πλήρωσης** (ανεμπόδιστη ροή) ή **ρευστότητα** (filling ability, unconfined flowability), που αποτελεί την ικανότητα του ΑΣΣ να ρέει και να πληροί ομοιογενώς και πλήρως απλούς ή σύνθετους γεωμετρικά ή/ και πυκνά οπλισμένους τύπους, μόνο υπό την επίδραση του ίδιου βάρους του.
- **ικανότητα διέλευσης – ροής μέσω στενών ανοιγμάτων** (εμποδιζόμενη ροή) ή **διελευσιμότητα** (confined flowability, passing ability), που αποτελεί την ικανότητα του ΑΣΣ να ρέει διαμέσου εμποδίων ή στενών ανοιγμάτων, όπως τα κενά μεταξύ των ράβδων οπλισμού ή οι περίπλοκοι γεωμετρικά τύποι, χωρίς να σημειώνεται εμπλοκή αδρανών και χωρίς το μίγμα να διαχωρίζεται τοπικά στα επιμέρους συστατικά του (απόμιξη).
- **αντίσταση σε απόμιξη/ διαχωρισμό ή σταθερότητα** (segregation resistance, stability), που αποτελεί την ικανότητα του ΑΣΣ να διατηρεί την ομοιογένεια της σύστασής του, κατά τη διάρκεια της διάστρωσης (δυναμική σταθερότητα) και της πήξης του, όσο δηλαδή βρίσκεται σε πλαστική κατάσταση (στατική σταθερότητα), σε ολόκληρο το εύρος του διαστρωμένου όγκου.

### 1.2.1.3. Ειδικές ρεολογικές δοκιμές<sup>4</sup>

Για την παρασκευή ενός αποδεκτού μίγματος ΑΣΣ για οποιαδήποτε εφαρμογή απαιτείται να προηγηθούν δοκιμαστικά μίγματα. Στα μίγματα αυτά θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν οι βασικές ιδιότητες του ΑΣΣ, δηλαδή η ικανότητα πλήρωσης, η ικανότητα διέλευσης και η σταθερότητα. Επιπλέον των τριών αυτών ιδιοτήτων, πρέπει να διασφαλίζεται και η ποιότητα της τελικής επιφάνειας.

Η υψηλή ρευστότητα του ΑΣΣ καθιστά την ευρέως εφαρμοζόμενη στο ΣΣ δοκιμή κάθισης ανώφελη, μιας και η τελευταία δεν προσφέρει ουσιαστικά συμπεράσματα.

---

<sup>3</sup> Σημειώνεται, πάντως, ότι ειδικά για την επίτευξη της αρτιότητας της τελικής επιφάνειας έχει αναπτυχθεί από τις εταιρείες παρασκευής έτοιμου σκυροδέματος το λεγόμενο «αρχιτεκτονικό σκυρόδεμα».

<sup>4</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευτεί, στο πλαίσιο της συνεισφοράς του συντάκτη της παρούσας Διατριβής στην Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος του ΣΠΜΕ, στην Τεχνική Οδηγία 5 για το ΑΣΣ [ΣΠΜΕ – Τ.Ο.5 (2014)].

Συγκεκριμένα, ένα καλά σχεδιασμένο ΑΣΣ αναμένεται να παρουσιάζει καθίσεις σημαντικά υψηλότερες από το ανώτατο όριο του ισχύοντος κανονισμού EN 206-1 (2000) (Πίνακας 1, 220 mm για την κατηγορία κάθισης S5).

**Πίνακας 1** Κατηγορίες κάθισης, εύρη τιμών και ανοχές για το ΣΣ [πηγή: EN 206-1 (2000)]

κατηγορία κάθισης	κάθιση (mm)	ανοχή (mm)
S1	10 – 40	± 10
S2	50 – 90	± 20
S3	100 – 150	± 30
S4	160 – 210	± 30
S5	≥ 220	± 30

Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί ειδικές δοκιμές, μέρος των οποίων έχουν προτυποποιηθεί από τους αμερικανικούς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς, που αποσκοπούν ειδικά στην ρεολογική κατάταξη μιγμάτων ΑΣΣ, βάσει της αξιολόγησης των τριών κύριων ιδιοτήτων του, όπως αυτές περιγράφηκαν στην Παρ. 1.2.1.2. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι καμία δοκιμή δεν είναι ικανή να εκτιμήσει ταυτόχρονα και τις τρεις βασικές ιδιότητες και, για το λόγο αυτό, η αξιολόγηση ενός μίγματος πραγματοποιείται με συνδυασμό περισσότερων δοκιμών. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις πλέον διαδεδομένες δοκιμές που αφορούν στις νωπές ιδιότητες του ΑΣΣ, μαζί με την ελεγχόμενη κάθε φορά ιδιότητα, τα σχετικά ευρωπαϊκά ή αμερικάνικα πρότυπα, όπου αυτά είναι διαθέσιμα, και τα μετρούμενα μεγέθη.

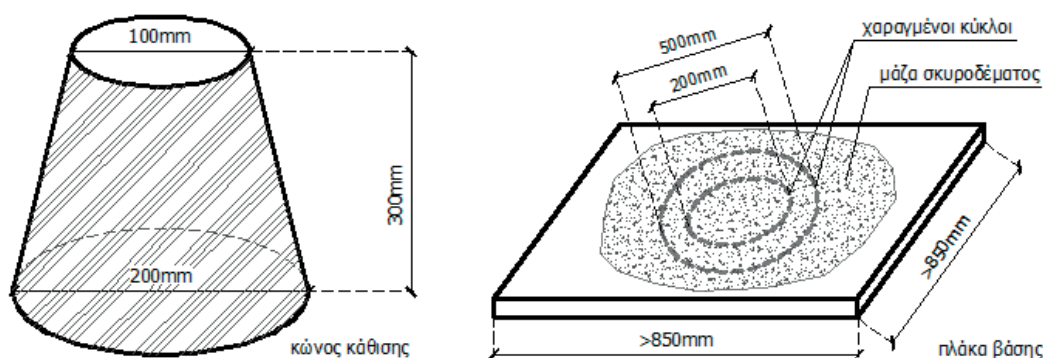
**Πίνακας 2** Συνοπτική παρουσίαση κυριότερων δοκιμών νωπού ΑΣΣ

ονομασία δοκιμής	ελεγχόμενη ιδιότητα		εφαρμοζόμενο πρότυπο		μετρούμενα μεγέθη	
	ικ. πλ.	ικ. διελ. σταθ.	ιξ.	αμερικάνικα / ευρωπαϊκά		
εξάπλωση	×		×	ASTM C1611/1611M (2009)	EN 12350-8 (2010)	- εξάπλωση - χρόνος εξάπλωσης - οπτικός δείκτης σταθερότητας
				μη διαθέσιμο	μη διαθέσιμο	
χοάνη V	×	×	×	μη διαθέσιμο	EN 12350-9 (2010)	- χρόνος εκροής - χρόνος εκροής μετά από 5 min
				μη διαθέσιμο	EN 12350-9 (2010)	
δοχείο L	×	×		υπό ανάπτυξη	EN 12350-10 (2010)	- λόγος υψών στα άκρα του δοχείου
δοχείο U	×	×		μη διαθέσιμο	μη διαθέσιμο	- υψομετρική διαφορά μεταξύ διαμερισμάτων
σταθερότητα μέσω κοσκίνισης			×	ASTM C1610/1610M (2010)	EN 12350-11 (2011)	- βάρος χονδρόκοκκων αδρανών καθ' ύψος
δακτύλιος J	×	×		ASTM C1621/1621M (2009)	EN 12350-12 (2010)	- εξάπλωση - διαφορά υψών εντός και εκτός δακτυλίου
έλεγχος διείδυσης (στατική απόμειξη)			×	ASTM C1712 (2009)	μη διαθέσιμο	- βύθιση (βάθος διείδυσης) κυλίνδρου

Στη διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν αναφορές και σε άλλες δοκιμές των νωπών ιδιοτήτων του ΑΣΣ (δοχείο Orimet, κάθιση Κ, χοάνη Ο, κ.ά.), οι οποίες πάντως δεν έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής ή προτυποποίησης από τα επίσημα κανονιστικά κείμενα [ACI 237R (2007), EN 206-9 (2010)] ή τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)]. Συμπληρωματικές πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στις πηγές που παραπέμπει ο αμερικάνικος κανονισμός ACI 237R (2007) [Cussigh et al. (2003), Sonebi et al. (2003), Bartos et al. (2002), Brower and Ferraris (2002), Bui and Shah (2002), Rooney (2002), Ferraris and Brower (2001), Hackley and Ferraris (2001), Ferraris (1999), Bui et al. (1998)] στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Οδηγιών για τον έλεγχο νωπού ΑΣΣ [De Schutter (2005)], κ.α. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των κυριότερων δοκιμών του νωπού ΑΣΣ.

### Δοκιμή εξάπλωσης

*Γενικά* – Η δοκιμή εξάπλωσης (slump flow) είναι μια εύκολη διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της ελεύθερης οριζόντιας ροής του ΑΣΣ απουσία εμποδίων (ανεμπόδιστη ροή) και, ειδικότερα, την ρευστότητα και το ρυθμό ροής.



Σχήμα 13 Εξοπλισμός δοκιμής εξάπλωσης [πηγή: Σφήκας (2007)]

*Σύνοψη δοκιμής* – Πρότυπος κώνος του Abrams (Σχήμα 13) πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς να συμπυκνωθεί. Ο κώνος ανασηκώνεται και το σκυρόδεμα αφήνεται να ρεύσει. Η μέση τιμή δύο διαμέτρων της τελικώς εξαπλωμένης μάζας σκυροδέματος, μετρούμενων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, αναφέρεται ως εξάπλωση του σκυροδέματος και με βάση αυτήν το σκυρόδεμα κατατάσσεται σε τρεις κατηγορίες εξάπλωσης (Πίνακας 3).

Πίνακας 3 Κατηγορίες εξάπλωσης

Κατηγορία	Εξάπλωση (mm)
SF1	550 έως 650
SF2	660 έως 750
SF3	760 έως 850

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Η τιμή της εξάπλωσης (Πίνακας 3), η οποία κυμαίνεται μεταξύ 550 και 850 mm, επιτρέπει τη σύγκριση της πλευρικής ροής και της ικανότητας πλήρωσης μιγμάτων ΑΣΣ. Υψηλές τιμές εξάπλωσης συνεπάγονται αφενός δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων από το σημείο έγχυσης και αφετέρου δυνατότητα ταχύτερης πλήρωσης τύπων ή δοκιμίων. Από την οπτική παρατήρηση της εξαπλωμένης μάζας μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη

σταθερότητα του μίγματος, ενώ οι τιμές εξάπλωσης από διαδοχικές δοκιμές<sup>5</sup> δεν πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 50 mm.

### Χρόνος εξάπλωσης $t_{500}$

*Γενικά* – Ο ρυθμός ή η ταχύτητα ροής ενός μίγματος επηρεάζονται, μεταξύ άλλων, και από το ιξώδες του. Ειδικά για την εργαστηριακή παρασκευή μιγμάτων ΑΣΣ, η σχετική μέτρηση του ιξώδους είναι χρήσιμη. Ο χρόνος που απαιτείται ώστε το εξωτερικό άκρο της μάζας σκυροδέματος, όπως αυτή δημιουργείται μέσω της δοκιμής εξάπλωσης, να φτάσει μία διάμετρο 500 mm από την στιγμή έναρξης της δοκιμής (έναρξη ανασήκωσης του κώνου) παρέχει μία εκτίμηση του ρυθμού ανεμπόδιστης ροής του μίγματος σκυροδέματος. Για παρόμοια μίγματα, αυτό το χρονικό εύρος, που συμβολίζεται ως  $t_{500}$  (s), αποτελεί μία ένδειξη του ιξώδους του μίγματος ΑΣΣ.

*Σύνοψη δοκιμής* – Με χρήση κατάλληλου χρονομέτρου, μετράται ο χρόνος (με ακρίβεια ενός δεκάτου του δευτερολέπτου) από τη χρονική στιγμή έναρξης της ανασήκωσης του κώνου κατά τη δοκιμή εξάπλωσης μέχρι οποιοδήποτε άκρο της εξαπλωμένης μάζας σκυροδέματος να φτάσει την περίμετρο των 500 mm.

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Ο χρόνος εξάπλωσης  $t_{500}$  αποτελεί μία ένδειξη της ταχύτητας ροής και, ως εκ τούτου, συνδέεται με το ιξώδες του μίγματος (**Πίνακας 4**). Μεγαλύτεροι χρόνοι  $t_{500}$  αποτελούν ένδειξη μιγμάτων με υψηλότερο ιξώδες και αντιστρόφως. Χρόνοι μικρότεροι των 2 δευτερολέπτων χαρακτηρίζουν μίγματα με χαμηλό ιξώδες, ενώ χρόνοι μεγαλύτεροι των 5 δευτερολέπτων γενικώς υποδεικνύουν μίγματα ΑΣΣ υψηλού ιξώδους. Πρέπει, πάντως, να σημειωθεί ότι ο τρόπος καταγραφής του χρόνου  $t_{500}$  γίνεται, συνήθως, μέσω χρονομέτρου χειρός και εμπεριέχει σημαντικό περιθώριο σφάλματος, λόγω των αντανακλαστικών του χειριστή. Για την αντιμετώπιση των εν λόγω σφαλμάτων, έχουν αναπτυχθεί ειδικές διατάξεις με ηλεκτρονικά μέσα καταγραφής, αλλά η δυνατότητα χρήσης τους είναι περιορισμένη λόγω, αφενός, του υψηλού τους κόστους αγοράς και, αφετέρου, της περιορισμένης ευελιξίας της χρήσης τους (π.χ. αδυναμία χρήσης των εν λόγω διατάξεων επιτόπου του έργου).

**Πίνακας 4** Κατηγορίες ιξώδους –  $t_{500}$

Κατηγορία	Χρόνος εξάπλωσης $t_{500}$ (s)
VS1	< 2.0
VS2	≥ 2.0

### Οπτικός δείκτης σταθερότητας

*Γενικά* – Ο οπτικός δείκτης σταθερότητας (ΟΔΣ, VSI: Visual Stability Index) περιλαμβάνει την οπτική διερεύνηση της εξαπλωμένης μάζας ΑΣΣ από τη δοκιμή εξάπλωσης. Η εκτίμηση του ΟΔΣ στοχεύει στον προσδιορισμό της σταθερότητας του μίγματος [[Daczko and Kurtz \(2001\)](#)] και εφαρμόζεται με σκοπό την συγκριτική

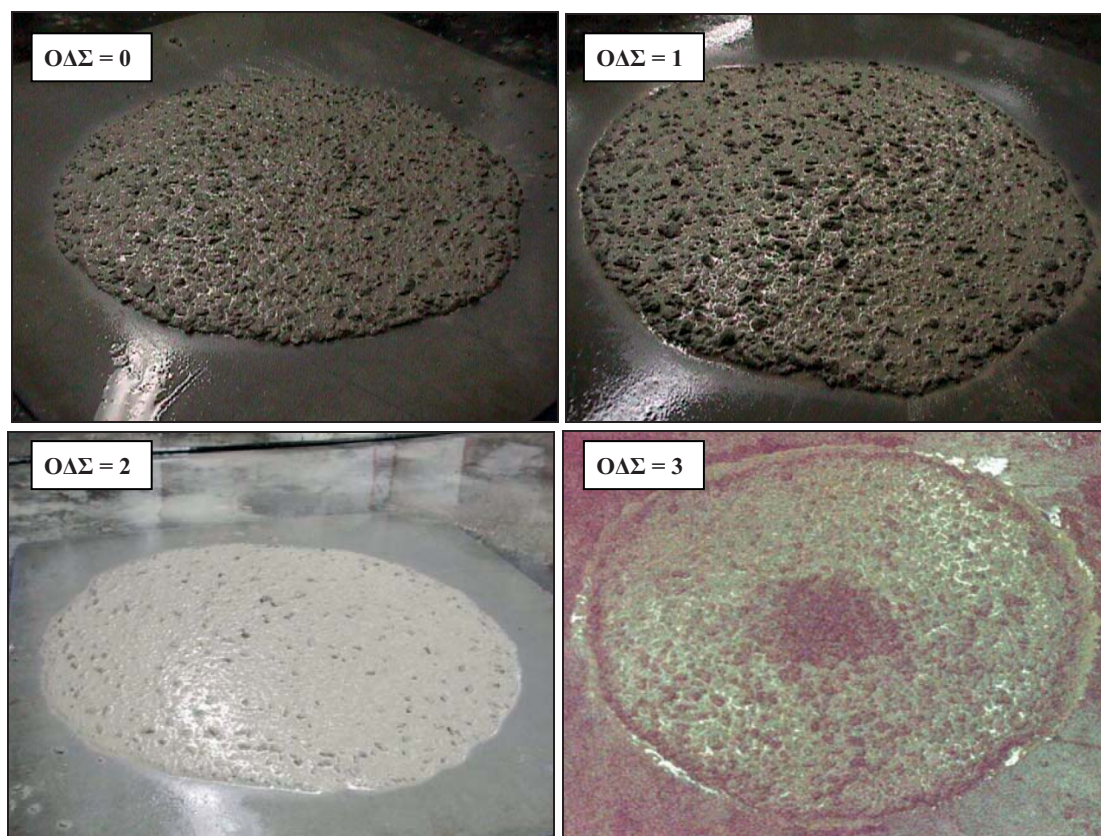
<sup>5</sup> Ως διαδοχικές δοκιμές ορίζονται ως οι δοκιμές επαναληψιμότητας, σύμφωνα με τον ορισμό που δίδεται στο πρότυπο [ISO 5725-1 \(1994\)](#), εντός «μικρών χρονικών διαστημάτων» (“short intervals of time”), ώστε να διασφαλίζεται αφενός η σταθερότητα των συνθηκών (κυρίως περιβαλλοντικών, αλλά και άλλων, όπως εν προκειμένω ο βαθμός πήξης του μίγματος) και αφετέρου η ανεξαρτησία μεταξύ των δοκιμών.

αξιολόγηση της σχετικής σταθερότητας μεταξύ μιγμάτων ίδιας ή παρεμφερούς σύνθεσης.

*Σύνοψη διαδικασίας* – Η εξαπλωμένη μάζα, όπως προκύπτει από τη δοκιμή εξάπλωσης, αξιολογείται οπτικά από έμπειρο παρατηρητή και αποδίδεται δείκτης 0, 1, 2 ή 3, ο οποίος χαρακτηρίζει τη σταθερότητα του μίγματος (**Πίνακας 5**).

**Πίνακας 5** Οπτικός Δείκτης Σταθερότητας – Ερμηνεία & Κριτήρια Επιλογής [πηγή: [ACI 237R \(2007\)](#)]

Τιμή ΟΔΣ	Ερμηνεία	Κριτήρια
0	Υψηλή σταθερότητα μίγματος	Απουσία ενδείξεων απόμιξης στην εξαπλωμένη μάζα του μίγματος
1	Σταθερό μίγμα	Απουσία στεφάνης κονιάματος ή σωρού αδρανών στην εξαπλωμένη μάζα
2	Ασταθές μίγμα	Μικρή στεφάνη κονιάματος (< 10 mm) ή σωρός αδρανών ή συνδυασμός τους στην εξαπλωμένη μάζα
3	Υψηλή αστάθεια μίγματος	Εμφανής απόμιξη με παρουσία μεγάλης στεφάνης κονιάματος (> 10 mm) ή μεγάλης σωρού αδρανών στο κέντρο της εξαπλωμένης μάζας του μίγματος ή συνδυασμός τους.



**Σχήμα 14** Ενδεικτικές περιπτώσεις απόδοσης ΟΔΣ σε μίγματα ΑΣΣ [πηγή: [PCI TR-6-03 \(2003\)](#)]

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Τιμή του ΟΔΣ ίση με 0 ή 1 αποτελεί ένδειξη ότι το μίγμα ΑΣΣ είναι σταθερό και κατάλληλο για την στοχευόμενη χρήση. Τιμή του ΟΔΣ ίση με 2 ή 3 αποτελεί ένδειξη δυνητικής απόμιξης και απαιτεί μεταβολή ή προσαρμογή του μίγματος από τον παραγωγό για την διασφάλιση της σταθερότητας. Δεδομένου ότι ο ΟΔΣ προσδιορίζεται οπτικά, μπορεί να είναι υποκειμενικός. Ως εκ τούτου, η αποτίμηση ενός μίγματος μέσω του ΟΔΣ μπορεί να αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για την παραγωγή ΑΣΣ, αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί για την αποδοχή ή την

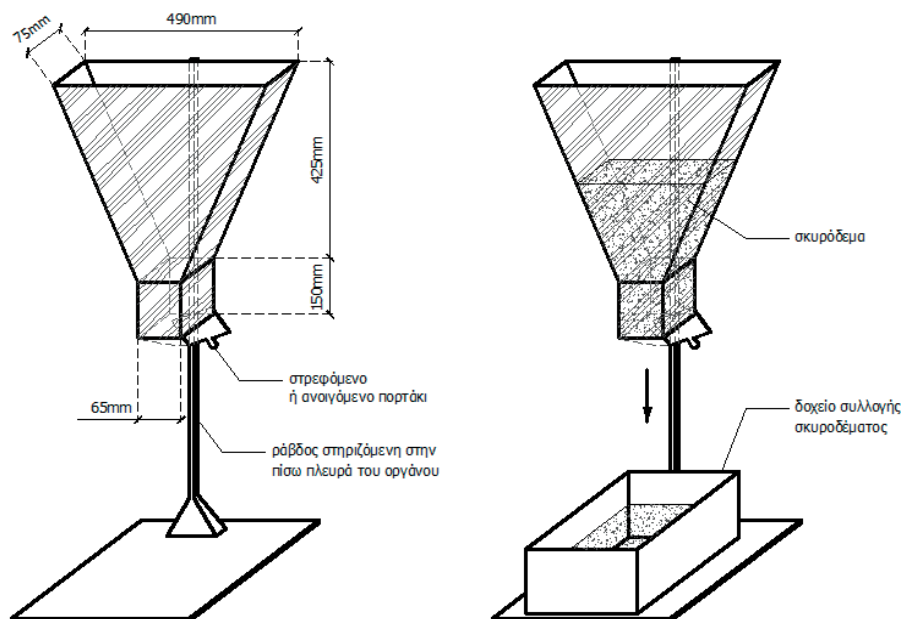


απόρριψη ενός δεδομένου μίγματος. Η εκτίμηση του ΟΔΣ αφορά κυρίως μίγματα ΑΣΣ που τείνουν να παρουσιάσουν φαινόμενα εξίδρωσης, διαφορετικά δεν βοηθά στην αναγνώριση της απομικτικής τάσης του μίγματος. Συνοψίζοντας, ακόμα κι αν δεν παρατηρηθούν φαινόμενα απόμιξης δε διασφαλίζεται ότι αυτή δε θα συμβεί σε άλλη χρονική στιγμή ή υπό άλλες συνθήκες. Πλούσιο φωτογραφικό υλικό που μπορεί να βοηθήσει στην εξοικείωση με τα διαφορετικά κριτήρια επιλογής ΟΔΣ μπορεί να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [PCI TR-6-03 (2003)], ενώ εδώ παρατίθενται ενδεικτικές περιπτώσεις ΟΔΣ, μόνο για λόγους πληρότητας (Σχήμα 14).

### Δοκιμή χοάνης V

*Γενικά* – Η δοκιμή χοάνης V (V-funnel) αποτιμά την εμποδιζόμενη ροή του ΑΣΣ και το βαθμό στον οποίο το μίγμα είναι επιρρεπές σε έμφραξη σε θέσεις στενών ανοιγμάτων, εκτιμά δηλαδή την ικανότητα διέλευσης (διελευσιμότητα) του μίγματος διαμέσου στενών ανοιγμάτων και συνεισφέρει στον προσδιορισμό του ιξώδους.

*Σύνοψη δοκιμής* – Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή τύπου χοάνης, ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 15). Το κάτω άκρο της χοάνης καταλήγει σε θύρα εκροής. Η χοάνη πληρώνεται με νωπό σκυρόδεμα και καταγράφεται ο χρόνος εκροής,  $t_v$  (s), από τη χρονική στιγμή ανοίγματος της θύρας εκροής έως τη χρονική στιγμή που ο παρατηρητής που στέκεται άνωθεν της χοάνης δει φως στη θέση της θύρας εκροής. Στη συνέχεια, το δοχείο επαναπληρώνεται με το ίδιο υλικό και παραμένει σε ηρεμία για 5 λεπτά. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται και μετράται ο νέος χρόνος εκροής  $t_v$  5 min.



Σχήμα 15 Εξοπλισμός δοκιμής χοάνης V [πηγή: Σφήκας (2007)]

Πίνακας 6 Κατηγορίες ιξώδους – Χοάνη V

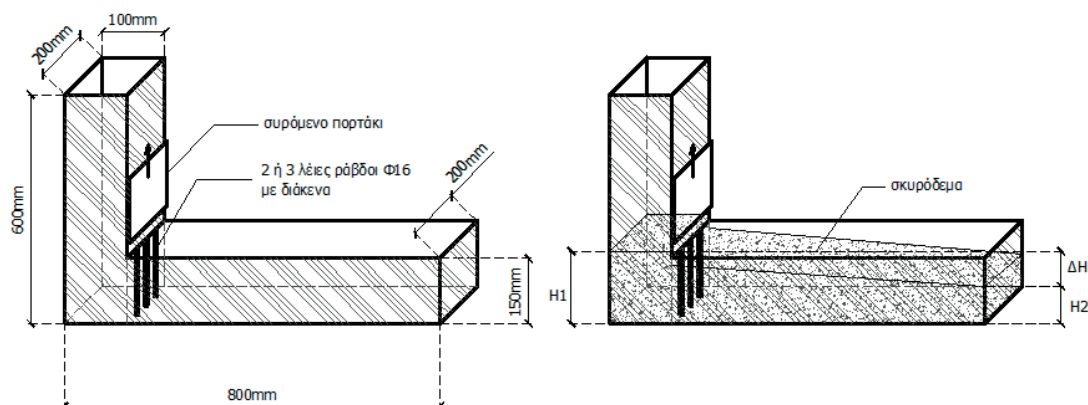
Κατηγορία	Χρόνος εκροής $t_v$ (s)
VF1	< 9.0
VF2	9.0 έως 25.0

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Ο χρόνος εκροής  $t_v$  (Πίνακας 6) δίνει μία εκτίμηση της ρευστότητας του μίγματος και αποτελεί ένδειξη της ικανότητας διέλευσης διαμέσου στενών ανοιγμάτων. Ειδικά για περιπτώσεις με μεγάλη περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα αδρανή, είναι πιθανό να δημιουργηθούν συνθήκες έμφραξης στο στόμιο της χοάνης. Σημαντική είναι, επίσης, η επίδραση της γωνίας της χοάνης και των διαστάσεων διατομής του στομίου, αν και η επίδραση αυτή δεν είναι επαρκώς ποσοτικοποιημένη. Η δεύτερη φάση της δοκιμής ( $t_v$  5 min) δίνει μία εκτίμηση για την τάση του μίγματος να απομεινύεται. Συγκεκριμένα, μεγαλύτεροι χρόνοι εκροής κατά της δεύτερης φάσης της δοκιμής υποδηλώνουν φαινόμενα απόμειξης.

### Δοκιμή δοχείου L

*Γενικά* – Η δοκιμή δοχείου L (L-box) αποτιμά την εμποδιζόμενη ροή του ΑΣΣ και το βαθμό στον οποίο το μίγμα είναι επιρρεπές σε έμφραξη στις θέσεις των οπλισμών, εκτιμά δηλαδή την ικανότητα διέλευσης (διελευσιμότητα) του μίγματος διαμέσου πυκνών οπλισμών ή στενών ανοιγμάτων.

*Σύνοψη δοκιμής* – Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή που αποτελείται από δοχείο ορθογωνικής διατομής σχήματος L, με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο τμήμα (Σχήμα 16). Τα δύο τμήματα χωρίζονται από κινούμενη θύρα, μπροστά από την οποία είναι τοποθετημένες δύο ή τρεις κατακόρυφες λείες ράβδοι χάλυβα. Το κατακόρυφο τμήμα του δοχείου πληρώνεται με ΑΣΣ και, αμέσως μετά, η θύρα ανασηκώνεται, αφήνοντας το μίγμα να ρεύσει στο οριζόντιο τμήμα του δοχείου. Μετά τη λήξη της ροής, το ύψος του σκυροδέματος στο άκρο του οριζόντιου τμήματος εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) του εναπομείναντος ύψους του σκυροδέματος στο κατακόρυφο τμήμα του δοχείου. Η δοκιμή πραγματοποιείται αρχικά με τρεις κατακόρυφες λείες ράβδους. Σε περίπτωση που ο λόγος υψών υπολείπεται του 0.80, τότε η δοκιμή επαναλαμβάνεται με δύο κατακόρυφες λείες ράβδους. Σε περίπτωση που ο λόγος υψών υπολείπεται ξανά του 0.80, τότε το σκυρόδεμα δε θεωρείται αυτοσυμπυκνούμενο.



Σχήμα 16 Εξοπλισμός δοκιμής δοχείου L [πηγή: Σφήκας (2007)]

Πίνακας 7 Κατηγορίες διελευσιμότητας – Δοχείο L

Κατηγορία	Λόγος υψών (-)
PL1	$\geq 0.80$ με 2 ράβδους
PL2	$\geq 0.80$ με 3 ράβδους

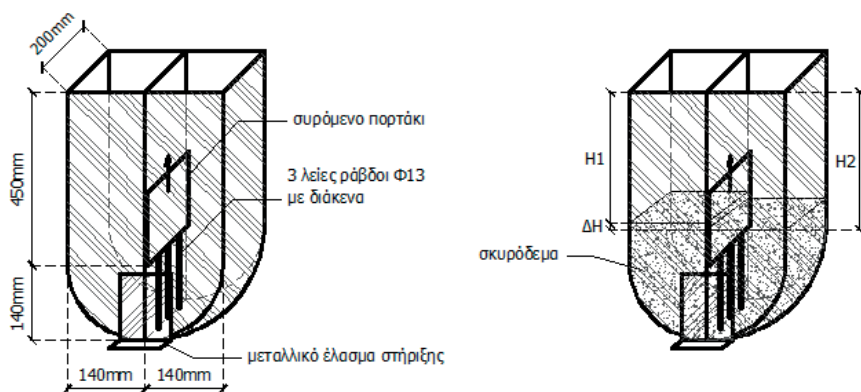
*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο ελάχιστος επιτρεπόμενος λόγος υψών του σκυροδέματος μεταξύ του άκρου του οριζόντιου τμήματος και του κατακόρυφου τμήματος του δοχείου L θεωρείται ίσος με 0.80 (Πίνακας 7).

Αν το ΑΣΣ ρέει ελεύθερα σε νερό, τότε η τελική επιφάνεια θα είναι πλήρως οριζόντια και ο λόγος θα ισούται με 1.00. Έτσι, λόγοι πλησιέστεροι στη μονάδα συνεπάγονται καλύτερη δυναμική ροή του μίγματος ΑΣΣ. Ο λόγος αποτελεί ένδειξη της ικανότητας διέλευσης ή του βαθμού στον οποίο εμποδίζεται η διέλευση του ΑΣΣ διαμέσου των οπλισμών. Χονδρόκοκκα αδρανή πίσω από τις ράβδους οπλισμού (έμφραξη) και πιθανή απόμιξη στο άκρο του οριζόντιου τμήματος μπορούν να εντοπιστούν οπτικά. Τέτοια φαινόμενα πρέπει να αντιμετωπίζονται μέσω της μεταβολής των αναλογιών των συστατικών του μίγματος, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητά του.

### Δοκιμή δοχείου U

*Γενικά* – Η δοκιμή δοχείου U (U-box) είναι παραπλήσια της δοκιμής δοχείου L, αποτιμά δηλαδή και αυτή την εμποδιζόμενη ροή του ΑΣΣ και το βαθμό στον οποίο το μίγμα είναι επιρρεπές σε έμφραξη στις θέσεις των οπλισμών, την ικανότητα δηλαδή διέλευσης του μίγματος (διελευσιμότητα) διαμέσου πυκνών οπλισμών ή στενών ανοιγμάτων.

*Σύνοψη δοκιμής* – Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή που αποτελείται από δοχείο ορθογωνικής-κυκλικής διατομής σχήματος U, με δύο κατακόρυφα διαμερίσματα (Σχήμα 17). Τα δύο διαμερίσματα χωρίζονται από κινούμενη θύρα, μπροστά από την οποία είναι τοποθετημένες τρεις κατακόρυφες λείες ράβδοι χάλυβα. Το ένα διαμέρισμα του δοχείου (από την αντίθετη πλευρά των ράβδων) πληρώνεται με ΑΣΣ και, αμέσως μετά, η θύρα ανασηκώνεται, αφήνοντας το μίγμα να ρεύσει στο άλλο διαμέρισμα του δοχείου, έως ότου το μίγμα να ισορροπήσει στα δύο διαμερίσματα βάσει της αρχής των συγκοινωνούντων δοχείων. Μετά τη λήξη της ροής, μετράται η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο διαμερισμάτων.



Σχήμα 17 Εξοπλισμός δοκιμής δοχείου U [πηγή: Σφήκας (2007)]

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς του σκυροδέματος μεταξύ των δύο διαμερισμάτων αποτελεί ένδειξη της ικανότητας διέλευσης ή του βαθμού στον οποίο εμποδίζεται η διέλευση του ΑΣΣ διαμέσου των οπλισμών. Αν το ΑΣΣ ρέει ελεύθερα σε νερό, τότε η στάθμη στα δύο διαμερίσματα θα βρίσκεται στο

ίδιο ύψος. Η μέγιστη επιτρεπόμενη υψομετρική διαφορά είναι ίση με 30 mm. Χονδρόκοκκα αδρανή πίσω από τις ράβδους οπλισμού (έμφραξη) και πιθανή απόμιξη στο άκρο του οριζόντιου τμήματος δεν μπορούν συνήθως να εντοπιστούν οπτικά, εκτός εάν η πλευρά της συσκευής είναι διαφανής. Τέτοια φαινόμενα πρέπει να αντιμετωπίζονται μέσω της μεταβολής των αναλογιών των συστατικών του μίγματος, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητά του.

### Δοκιμή απόμιξης στήλης σκυροδέματος

*Γενικά* – Η δοκιμή απόμιξης στήλης σκυροδέματος (column segregation) αποτελεί μία δοκιμή για την εκτίμηση της ικανότητας αντίστασης του μίγματος σε πιθανή απόμιξη.

*Σύννοψη δοκιμής* – Κυλινδρικό δοκίμιο (στήλη) πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς να συμπυκνωθεί (**Σχήμα 18α**). Το δοκίμιο είναι χωρισμένο σε τέσσερα τμήματα που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά επίπεδα του δοκιμίου. Το σκυρόδεμα από το ανώτερο και το κατώτερο τμήμα υπόκειται στη διαδικασία του υγρού κοσκινίσματος (κοσκίνισμα σε πρότυπο κόσκινο Νο. 4 / 4.75 mm). Τα βάρη των χονδρόκοκκων αδρανών που παραμένουν τελικώς στα κόσκινα ζυγίζονται και συγκρίνονται, υπολογίζοντας έτσι την ποσοστιαία απόμιξη.

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Η δοκιμή αποσκοπεί στον προσδιορισμό της σταθερότητας των μιγμάτων ΑΣΣ. Η ποσοστιαία απόμιξη,  $S$  (%), υπολογίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$S (\%) = [(C_{A_B} - C_{A_T}) / ((C_{A_B} + C_{A_T}) / 2)] \times 100 \quad \text{για } C_{A_B} > C_{A_T}$$

$$S (\%) = 0 \quad \text{για } C_{A_B} < C_{A_T}$$

όπου:  $C_{A_i}$  το βάρος των χονδρόκοκκων αδρανών (Coarse Aggregates) του κάτω ( $i = B$ : bottom) ή του άνω ( $i = T$ : top) τμήματος του υποστρώματος.

Αν και μία ποσοστιαία απόμιξη κάτω του 10 % θεωρείται πρακτικώς ικανοποιητική για το ΑΣΣ, σημειώνεται ότι δεν έχει, προς το παρόν, καθοριστεί συγκεκριμένο επίσημο όριο για την αποτίμηση της ανεκτής απόμιξης.



**Σχήμα 18** (α) Εξοπλισμός δοκιμής απόμιξης στήλης σκυροδέματος [πηγή: D' Ambrosia et al. (2007)]  
(β) Εξοπλισμός δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης [πηγή: ACMC (2005)]

## Δοκιμή σταθερότητας μέσω κοσκίνισης

*Γενικά* – Η δοκιμή απόμιξης μέσω κοσκίνισης (sieve segregation resistance ή sieve stability test) αποτελεί μία δοκιμή για την εκτίμηση της ικανότητας αντίστασης του μίγματος σε πιθανή απόμιξη.

*Σύνοψη δοκιμής* – Δείγμα νωπού σκυροδέματος παραμένει σε ηρεμία για 15 λεπτά και καταγράφονται τυχόν φαινόμενα εξιδρώσεως. Αμέσως μετά, το άνω μέρος του δείγματος εκχύνεται σε κόσκινο με τετραγωνικά ανοίγματα 5 mm, άνωθεν δοχείου υποδοχής (**Σχήμα 18β**), και παραμένει σε ηρεμία για 2 λεπτά. Στη συνέχεια, το υλικό που διαπέρασε το κόσκινο ζυγίζεται και υπολογίζεται η ποσοστιαία απόμιξη.

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Η δοκιμή αποσκοπεί στον προσδιορισμό της σταθερότητας των μιγμάτων ΑΣΣ (**Πίνακας 8**). Η ποσοστιαία απόμιξη,  $SR$  (%), υπολογίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$SR (\%) = (W_{ps} - W_p) 100 / W_c$$

Όπου  $W_{ps}$  το μικτό βάρος του δοχείου υποδοχής (μαζί με το κοσκινισμένο υλικό)

$W_p$  το καθαρό βάρος του δοχείου υποδοχής και

$W_c$  το μικτό βάρος του πληρωμένου με υλικό κόσκινου (πριν την κοσκίνιση)

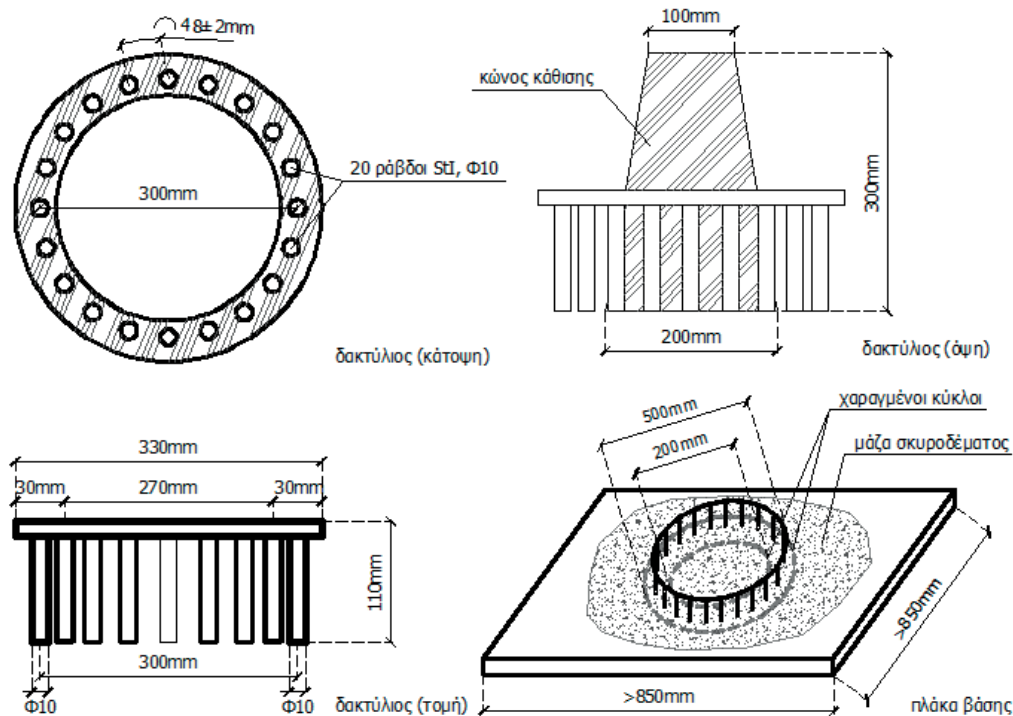
**Πίνακας 8** Κατηγορίες αντίστασης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης

Κατηγορία	Απομιγμένο ποσοστό (%)
SR1	$15 < SR \leq 20$
SR2	$SR \leq 15$

## Δοκιμή δακτυλίου J

*Γενικά* – Κατά την διάστρωσή του στους οπλισμένους τύπους το ΑΣΣ πρέπει να παραμένει συνεκτικό και να μην εμφανίζει διαχωρισμό των αδρανών από την πάστα κατά τη ροή του. Η δοκιμή δακτυλίου J (J-ring) χαρακτηρίζει την ικανότητα του ΑΣΣ να διέρχεται διαμέσου των ράβδων οπλισμού.

*Σύνοψη δοκιμής* – Πρότυπος κώνος του Abrams, που περιβάλλεται από δακτύλιο με δώδεκα ή δεκαέξι κατακόρυφες λείες ράβδους, πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς να συμπυκνωθεί (**Σχήμα 19**). Ο κώνος ανασηκώνεται και το σκυρόδεμα αφήνεται να ρεύσει διαμέσου των ράβδων. Η μέση τιμή δύο διαμέτρων της τελικώς εξαπλωμένης μάζας σκυροδέματος, μετρούμενων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, αναφέρεται ως εξάπλωση διαμέσου του δακτυλίου J. Επιπλέον, καταγράφεται η υψομετρική διαφορά μεταξύ του σκυροδέματος που παρέμεινε εσωτερικά του δακτυλίου και του σκυροδέματος που, διαπερνώντας τις ράβδους, εξαπλώθηκε εξωτερικά του δακτυλίου. Για την καλύτερη εκτίμηση της υψομετρικής διαφοράς, λαμβάνεται η μέση τιμή τεσσάρων μετρήσεων. Η δοκιμή πραγματοποιείται αρχικά με δακτύλιο δεκαέξι κατακόρυφων λείων ράβδων. Σε περίπτωση που η υψομετρική διαφορά του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από 10 mm, η δοκιμή επαναλαμβάνεται με δακτύλιο δώδεκα κατακόρυφων λείων ράβδων. Σε περίπτωση που η υψομετρική διαφορά του σκυροδέματος είναι και πάλι μεγαλύτερη από 10 mm, τότε το σκυρόδεμα δε θεωρείται αυτοσυμπυκνούμενο.



Σχήμα 19 Εξοπλισμός δοκιμής δακτυλίου J [πηγή: Σφήκας (2007)]

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Η προκύπτουσα εξάπλωση και η υψομετρική διαφορά του σκυροδέματος εντός και εκτός των ράβδων αποτελούν ενδείξεις της ικανότητας διέλευσης (διελευσιμότητα) του ΑΣΣ διαμέσου ράβδων οπλισμού. Σημειώνεται, πάντως, ότι η κατάταξη του μίγματος ως προς τη διελευσιμότητά του πραγματοποιείται μόνο βάσει της υψομετρικής διαφοράς (Πίνακας 9).

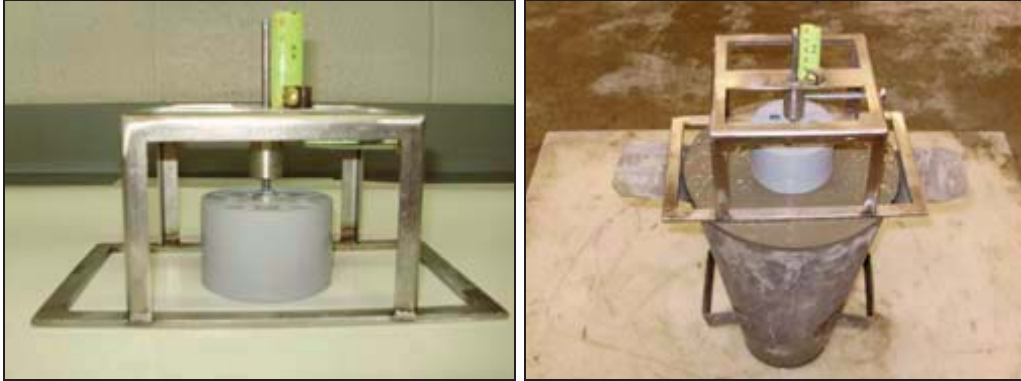
Πίνακας 9 Κατηγορίες διελευσιμότητας – Δακτύλιος J

Κατηγορία	Υψομετρική διαφορά (mm)
PJ1	≤ 10 με 12 ράβδους
PJ2	≤ 10 με 16 ράβδους

Υψηλότερες τιμές εξάπλωσης διαμέσου του δακτυλίου J συνεπάγονται αφενός δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων από το σημείο έγχυσης και αφετέρου δυνατότητα ταχύτερης πλήρωσης τύπων ή δοκιμίων. Η διαφορά μεταξύ της εξάπλωσης διαμέσου του δακτυλίου J και της ανεμπόδιστης εξάπλωσης, όπως προκύπτει από τη δοκιμή εξάπλωσης, αποτελεί ένδειξη του βαθμού, στον οποίο εμποδίζεται η διέλευση διαμέσου ράβδων οπλισμού. Η ίδια δοκιμή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της πιθανότητας έμφραξης μίγματος ΑΣΣ για δεδομένη εφαρμογή. Εφόσον οι ράβδοι εγκλωβίσουν τα χονδρόκοκκα αδρανή εντός του δακτυλίου, τότε το μίγμα έχει υψηλή πιθανότητα έμφραξης και οι αναλογίες των συστατικών του θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του μίγματος.

## Δοκιμή διείσδυσης / Αντίσταση σε στατική απόμιξη

*Γενικά* – Η δοκιμή διείσδυσης (penetration test / static segregation resistance) δεν μετρά με άμεσο τρόπο την αντίσταση σε στατική απόμιξη, παρέχει όμως μια εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης στατικής απόμιξης.



Σχήμα 20 Εξοπλισμός δοκιμής διείσδυσης [πηγή: Russell (2010)]

*Σύνοψη δοκιμής* – Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιείται ο πρότυπος κώνος του Abrams, τοποθετημένος ανάποδα, πάνω στον οποίο στηρίζεται με κατάλληλη διάταξη ειδική συσκευή διείσδυσης κυλινδρικής μορφής (Σχήμα 20). Μετά την πλήρωση του κώνου με σκυρόδεμα, ο κύλινδρος έρχεται κεντρικά σε επαφή με την τελική επιφάνεια και, μετά την παρέλευση 30 δευτερολέπτων καταγράφεται το βάθος διείσδυσης,  $P_d$ .

Πίνακας 10 Βαθμός αντίστασης σε στατική απόμιξη

Βάθος διείσδυσης $P_d$ (mm)	Βαθμός αντίστασης σε στατική απόμιξη
$P_d \leq 10$	Ανθεκτικό
$10 < P_d < 25$	Μέτρια ανθεκτικό
$P_d \geq 25$	Μη ανθεκτικό

*Ερμηνεία αποτελεσμάτων* – Το βάθος διείσδυσης  $P_d$  προσδιορίζει τον βαθμό αντίστασης σε στατική απόμιξη (Πίνακας 10). Συγκεκριμένα, χαμηλότερα βάθη συνεπάγονται και υψηλότερο βαθμό αντίστασης σε στατική απόμιξη. Ενδεικτικά, αναφέρεται ο κανονιστικός μη δεσμευτικός πίνακας αντιστοίχισης του βάθους διείσδυσης και της κατάταξης του μίγματος.

### 1.2.2. Συστατικά υλικά

#### 1.2.2.1. Τσιμέντο

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 206-1 (2000) και EN 206-9 (2010), για την παρασκευή ΑΣΣ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τσιμέντα που πληρούν τις προϋποθέσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 197-1 (2000). Όπως αναφέρεται στις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)], η επιλογή του τύπου τσιμέντου καθορίζεται περισσότερο από τις ειδικές απαιτήσεις κάθε ξεχωριστής εφαρμογής, όπως αυτές αναφέρονται συνοπτικά στο EN 206-1 (2000), παρά από τις ειδικές απαιτήσεις του ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, το Ευρωπαϊκό πρότυπο αναφέρει ότι η καταλληλότητα του τσιμέντου καθορίζεται, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η

τελική χρήση του σκυροδέματος, οι συνθήκες συντήρησης, οι διαστάσεις της κατασκευής (που σχετίζονται με την ανάπτυξη θερμικής καταπόνησης λόγω της θερμότητας ενυδάτωσης), οι περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης της κατασκευής και η δυνητική αντίδραση των αδρανών με τα αλκάλια των συστατικών. Σύμφωνα με την Παπανικολάου (2008) και τους Παπανικολάου και Τριανταφύλλου (2003), για την παρασκευή ΑΣΣ προτιμώνται τσιμέντα με αυξημένη ικανότητα διασποράς των κόκκων τους από τους υπερρευστοποιητές. Τέτοια τσιμέντα είναι τα τσιμέντα Πόρτλαντ με χαμηλή περιεκτικότητα σε αργλικό τριασβέστιο ( $C_3A$ ) και αργιλοσιδηρούχο τετρασβέστιο ( $C_4AF$ ), καθώς και το τσιμέντο με υψηλή περιεκτικότητα σε δυασβεστικό πυριτικό άλας ( $C_2S$ , γνωστό και ως μπελίτης), το οποίο παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία ενυδάτωσης εν σχέσει προς το κανονικό τσιμέντο Πόρτλαντ.

### 1.2.2.2. Πρόσμικτα

Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων που σχετίζονται με τις ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ και, συγκεκριμένα, της συνεκτικότητας του μίγματος και της αντίστασής του σε διαχωρισμό, συχνά χρησιμοποιούνται αδρανή (τύπου I) ή/ και ποζολανικά ή υδραυλικά πρόσμικτα (τύπου II) ως συμπληρωματικά συστατικά του σκυροδέματος. Τα συστατικά αυτά ονομάζονται πρόσμικτα<sup>6</sup>.

Με την προσθήκη των εν λόγω προσμίκτων μπορεί, επιπρόσθετα, να ρυθμιστεί η περιεκτικότητα του τσιμέντου, έτσι ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία ενυδάτωσης και η θερμική συστολή [EFNARC (2005)]. Σημειώνεται ότι η προσθήκη πρόσμικτων απαιτεί υψηλό Έλεγχο Ποιότητας ως προς την κοκκομετρική τους κατανομή, τη χημική τους σύνθεση και τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, ενώ δεν πρέπει να λησμονείται και η συνεισφορά τους στο χρωματισμό των τελικών εμφανών επιφανειών. Ο Πίνακας 11 συνοψίζει τις κατηγορίες πρόσμικτων, με βάση τη ικανότητα αντίδρασής τους με το νερό, καθώς και τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα πρόσμικτα κάθε κατηγορίας.

**Πίνακας 11** Τύποι πρόσμικτων ανάλογα με τη δράση τους [πηγές: EFNARC (2005), EN 206-1 (2000)]

ΤΥΠΟΥ I	Αδρανή ή ημι-αδρανή	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανόργανα πληρωτικά (ασβεστολιθικά, δολομιτικά, γρανιτικά, κ.λπ.) [EN 12620 (2013)]</li> </ul>
ΤΥΠΟΥ II	Ποζολανικά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρωστικές ουσίες [EN 12878 (2005)]</li> <li>• Ιπτάμενη τέφρα [EN 450 (2012)]</li> <li>• Πυριτική παιπάλη [EN 13263 (2009)]</li> </ul>
	Υδραυλικά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σκωρία υψικαμίνου [EN 15167 (2006)]</li> </ul>

Σημειώνεται ότι οι διαφορές στην κοκκομετρία, στο μέγεθος και στο σχήμα των κόκκων, στη χημική σύσταση και στις φυσικοχημικές ιδιότητες μπορούν να επιφέρουν σημαντικές διαφορές στη δράση του εκάστοτε επιλεγθέντος πρόσμικτου. Για τον λόγο αυτόν, και ειδικά για πρόσμικτα που δεν καλύπτονται από επίσημα πρότυπα (π.χ. μετακαολίνης, φυσικές ποζολάνες, πληρωτικά γυαλιού, χαλαζιακή σκόνη, τέφρα φλοιού ρυζιού, κ.ά.), η ενσωμάτωσή τους στο μίγμα πρέπει πάντοτε να συνοδεύεται από προσεκτική και εις βάθος αξιολόγηση της επίδρασής τους στο σκυρόδεμα, σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο (συνεκτικότητα μίγματος, στερρότητα/

<sup>6</sup> Σημειώνεται ότι η μετάφραση αυτή αποτελεί την επίσημη μετάφραση του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας για τον αγγλικό όρο ‘additions’. Στην πράξη συχνά χρησιμοποιείται ο ελληνικός όρος ‘πρόσθετα’, ο οποίος όμως παραπέμπει επισήμως στα χημικά πρόσθετα.



ευαισθησία μίγματος, θερμότητα ενυδάτωσης, ταχύτητα πήξης) ή/ και σε μεσομακροπρόθεσμο επίπεδο (μηχανικές αντοχές και εξέλιξή τους στον χρόνο, ανθεκτικότητα), ανάλογα και με τον σκοπό της χρήσης τους.

Καθώς η διαθέσιμη βιβλιογραφία είναι εξαιρετικά εκτεταμένη για κάθε επιμέρους είδος πρόσμικτου, στη συνέχεια και κατόπιν μιας σύντομης περιγραφής των διαφορετικών τύπων πρόσμικτων θα εξετασθούν λεπτομερέστερα μόνο όσα πρόσμικτα χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο των πειραματικών διεργασιών της παρούσας Διατριβής: το ασβεστολιθικό φίλερ (πρόσμικτο τύπου I), η πυριτική παιπάλη και ο μετακαολίνης (πρόσμικτα τύπου II).

### **Ανόργανα ασβεστολιθικά πληρωτικά (πρόσμικτα τύπου I)**

Η χρήση ανόργανων πληρωτικών (φίλερ) με βάση το ανθρακικό ασβέστιο ( $CaCO_3$ ) έχουν ευρεία χρήση στην παραγωγή ΑΣΣ, ενώ μπορούν να αποδώσουν εξαιρετικές ρεολογικές ιδιότητες και άριστη τελική επιφάνεια στο μίγμα. Σημαντικό ρόλο για την ευεργετική δράση του ασβεστολιθικού φίλερ παίζει κυρίως η κοκκομετρική του κατανομή και, ειδικότερα, η ειδική του επιφάνεια, που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απαίτηση και την ευαισθησία του μίγματος σε νερό. Το πλέον ευεργετικό κλάσμα του πληρωτικού υλικού είναι εκείνο με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 0.125 mm. Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)] είναι επιθυμητό ένα ποσοστό άνω του 70 % των κόκκων να διέρχεται από το κόσκινο 63 μm. Σημειώνεται ότι στον λόγο νερού προς λεπτόκοκκα ή σκόνη ( $w/p$ ), ο οποίος συχνά αναφέρεται ως χαρακτηριστικό του μίγματος, περιλαμβάνονται ως «σκόνες» ( $p$ : powders) όλα τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0.125 mm, συνυπολογιζομένων και των ανόργανων πληρωτικών.

### **Πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά (πρόσμικτα τύπου II)**

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος και, κυρίως, η ανθεκτικότητά του μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την ενσωμάτωση διαφορετικών πρόσμικτων, γνωστών ως πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά (supplementary cementing ή cementitious materials, SCM). Διάφορα πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη, η σκωρία υψικαμίνων ή ο μετακαολίνης, έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την παρασκευή ΑΣΣ και έχει βρεθεί ότι εν γένει βελτιώνουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, πολλές φορές σε πολύ σημαντικό βαθμό. Τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά, όσο και η ανθεκτικότητα βελτιώνονται σημαντικά, είτε τα υλικά αυτά ενσωματωθούν στο μίγμα συμπληρωματικά ή ως αντικατάσταση μέρους του περιεχόμενου τσιμέντου. Στο σημείο αυτό ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της συνεισφοράς δύο εκ των πρόσμικτων τύπου II, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο των πειραμάτων της παρούσας Διατριβής.

#### **Πυριτική Παιπάλη**

*Ορισμός* – Εξαιρετικά λεπτή παιπάλη, περίπου εκατό φορές λεπτότερη του κοινού τσιμέντου Πόρτλαντ, με σφαιρική μορφή κόκκων, άμορφης μη κρυσταλλικής δομής, που παράγεται σε ηλεκτρικούς φούρνους ως παραπροϊόν της παραγωγής κραμάτων που περιέχουν πυρίτιο [Silica Fume Association (2005), ACI 116R (2005), EN 13263-1 Parts 1 & 2 (2005/ 2009), FHWA-IF-05-016 (2005)]. Η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής της, η οποία ξεφεύγει από το σκοπό του

παρόντος κειμένου, μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία [[Advanced Concrete Technology \(2005\)](#), [Aitcin \(2008\)](#)].

*Χρήση* – Η πυριτική παιπάλη χρησιμοποιείται είτε ως συστατικό του βιομηχανικού τσιμέντου ή ως ξεχωριστό συστατικό του σκυροδέματος. Στη δεύτερη περίπτωση, η πυριτική παιπάλη χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα είτε ως πρόσθετο υλικό ή ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου. Γενικώς, προτείνεται περιεκτικότητα σε πυριτικής παιπάλης μεταξύ 7 και 12 % κ.β. των τσιμεντοειδών υλικών του μίγματος [[ACI E3-01 \(2001\)](#)], χωρίς πάντως αυτό να είναι δεσμευτικό, καθώς σε κάθε περίπτωση πρέπει να προηγούνται δοκιμαστικά μίγματα. Ειδικότερα, ανάλογα τη σκοπούμενη χρήση (σκυρόδεμα υψηλής αντοχής ή υψηλής επιτελεστικότητας, απαιτήσεις ανθεκτικότητας, κ.λπ.) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα ποσοστά (**Πίνακας 12**), σε συνδυασμό με την απαιτούμενη ρύθμιση της περιεκτικότητας νερού [[Advanced Concrete Technology \(2005\)](#), [ACI 234R \(2006\)](#)].

**Πίνακας 12** Προτεινόμενη περιεκτικότητα πυριτικής παιπάλης, ανάλογα με τον τύπο σκυροδέματος [πηγή: [Advanced Concrete Technology \(2005\)](#)]

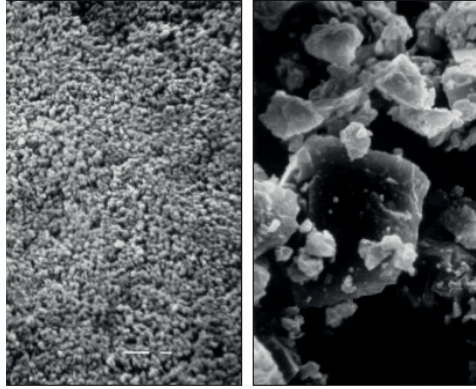
τύπος σκυροδέματος	% περιεκτικότητα ως προς τη συνολική περιεκτικότητα τσιμεντοειδών υλικών
κανονικό («συμβατικό»)	4-7
υψηλής επιτελεστικότητας	8-10*
υψηλής αντίστασης σε χημικά	10-12*
υποθαλάσσιο	10-15
αντλήσιμο	2-5

\*υψηλότερες τιμές μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές περιπτώσεις

Η ευρεία χρήση της πυριτικής παιπάλης, η ευεργετική δράση της οποίας είχε ήδη γίνει γνωστή από τη δεκαετία του σαράντα, προέκυψε από την ανάγκη περιορισμού της εκπομπής των αερίων της βιομηχανίας που ήταν επιβλαβής για το περιβάλλον. Αρχικά, η πυριτική παιπάλη χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου με σκοπό τη μείωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου στο μίγμα. Τα τελευταία χρόνια, ο κύριος σκοπός της χρήσης της βασίζεται στην ανάγκη παρασκευής σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας με βελτιωμένες ιδιότητες (υψηλές αντοχές, βελτιωμένη ανθεκτικότητα). Σύμφωνα με το [ACI 234R \(2006\)](#) εκτιμάται ότι σε παγκόσμιο επίπεδο παράγονται περί το 1.000.000 τόνοι πυριτικής παιπάλης, χωρίς πάντως να είναι σαφές σε ποιο ποσοστό τελικώς χρησιμοποιούνται και δεν απορρίπτονται.

*Χημική Σύνθεση* – Η περιεκτικότητά της σε διοξείδιο του πυριτίου υπερβαίνει το 85 έως 90 % [[ASTM C 1240 \(2003\)](#), [ACI 234R \(2006\)](#)], ενώ μπορεί να περιέχει προσμίξεις, αναλόγως των προϊόντων, των οποίων αποτελεί παραπροϊόν. Η συνολική χημική σύσταση εξαρτάται από τις προσμίξεις αυτές, οι οποίες πάντως δεν επηρεάζουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, αν και τα σχετικά πρότυπα μπορεί να θέσουν συγκεκριμένα όρια για κάποιες από αυτές. Το χρώμα των κόκκων κυμαίνεται από ανοιχτό έως σκούρο γκρι και, καθώς το διοξείδιο του πυριτίου είναι άχρωμο, το γεγονός αυτό οφείλεται σε άλλες μη πυριτικές προσμίξεις που μπορεί να περιλαμβάνονται, όπως οξείδια του άνθρακα ή του σιδήρου [[ACI 234R \(2006\)](#)].

*Φυσικές Ιδιότητες* – Το μέγεθος των κόκκων είναι εξαιρετικά μικρό, με περισσότερο από το 95 % των κόκκων να είναι μικρότερο του 1 μm, που είναι περίπου το 1/100 του αντίστοιχου μέσου μεγέθους κόκκου του τσιμέντου (**Σχήμα 21**).



**Σχήμα 21** Σύγκριση σωματιδίων πυριτικής παιπάλης (αριστερά) με σωματίδια τσιμέντου (δεξιά) στον ίδιο βαθμό μεγέθυνσης [πηγή: [Silica Fume Association \(2005\)](#)]

Οι κόκκοι έχουν σφαιρική μορφή, με διάμετρο που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.1 και 0.2  $\mu\text{m}$ , πάντως συχνά δημιουργούνται συσσωματώματα περισσότερων κόκκων με μεγέθη που κυμαίνονται μεταξύ 1 και 100  $\mu\text{m}$  [[ACI 234R \(2006\)](#)]. Η χύδην πυκνότητα (bulk density) εξαρτάται από τον τρόπο παρασκευής (υλικό του οποίου η πυριτική παιπάλη αποτελεί παραπροϊόν, τρόπος έψησης, κ.λπ.) και είναι αρκετά χαμηλή για το πρωτογενές προϊόν (130 - 430  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Για τον λόγο αυτόν, η παιπάλη διατίθεται συνήθως σε συμπυκνωμένη μορφή (400-720  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Σημειώνεται ότι δεν έχει αποδειχθεί κάποια διαφορά στη δράση της πυριτικής παιπάλης που να σχετίζεται με τη μορφή διάθεσής της [[Silica Fume Association \(2005\)](#)]. Το ειδικό βάρος (specific gravity) είναι μικρότερο από το ειδικό βάρος του τσιμέντου (3.15  $\text{t}/\text{m}^3$ ) και κυμαίνεται, ανάλογα με τις προσμίξεις, σε ένα εύρος από 2.20 έως 2.35  $\text{t}/\text{m}^3$  [[ACI 234R \(2006\)](#)]. Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ειδική επιφάνεια (specific surface), η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη (13000 - 30000  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) εν σχέσει προς την αντίστοιχη ειδική επιφάνεια του τσιμέντου (300 - 400  $\text{m}^2/\text{kg}$ ), λόγω της λεπτότητας της παιπάλης. Το γεγονός αυτό έχει συνέπεια η απαίτηση σε νερό για τη διαβροχή της να είναι επίσης μεγάλη. Αντί της αύξησης του νερού που θα είχε επιπτώσεις σε όλες τις ιδιότητες, χρησιμοποιούνται συνήθως μειωτές νερού (high-range water reducing agents, HWRA) ή μεγαλύτερες ποσότητες ρευστοποιητών (για τη διατήρηση της εργασιμότητας). Πάντως, έχει αναφερθεί [[Bache \(1981\)](#) και [Sellevold and Radjy \(1983\)](#), κατά [ACI 234R \(2006\)](#)] ότι χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου (έως 5 % κ.β. τσιμέντου) από πυριτική παιπάλη θα μπορούσαν να μειώσουν την απαίτηση σε νερό, καθώς οι κόκκοι της πυριτικής παιπάλης θα καταλάβουν χώρο που διαφορετικά θα καταλαμβάνονταν από νερό μεταξύ των κόκκων τσιμέντου. Για μεγαλύτερα ποσοστά πυριτικής παιπάλης η αύξηση της απαίτησης σε νερό είναι, πάντως, σαφής.

*Είδη δράσεων στο σκυρόδεμα* – Τα πλεονεκτήματα της πυριτικής παιπάλης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: λόγω φυσικής δράσης και λόγω χημικής δράσης.

**Φυσική δράση:** Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης συνεπάγεται ένα πολύ μεγάλο πλήθος εξαιρετικά μικρών κόκκων στο μίγμα, το οποίο συνεισφέρει στην πλήρωση των κενών μεταξύ του τσιμέντου, κατά τον ίδιο τρόπο που τα λεπτόκοκκα αδρανή πληρούν τα κενά μεταξύ των χονδρόκοκκων αδρανών. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως πυκνότητα στοιβαξης (packing density, particle packing, micro-filling). Η θετική επιρροή της πυριτικής παιπάλης αφορά κυρίως στην ευαίσθητη μεταβατική ζώνη μεταξύ τσιμεντοπολτού και αδρανών, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρότερη

πυκνότητα, χαμηλότερη αντοχή και υψηλή διαπερατότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά οφείλονται στο φαινόμενο παρειάς (wall effect), το οποίο δεν επιτρέπει την επαρκή σύνδεση των κόκκων του τσιμέντου στην επιφάνεια των αδρανών, γεγονός που περιορίζεται όταν χρησιμοποιείται πυριτική παιπάλη, οι κόκκοι της οποίας είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, σχεδόν 100 φορές μικρότεροι από τους κόκκους του τσιμέντου [Neville (2004)]. Επιπλέον, η πυριτική παιπάλη μειώνει την κινητικότητα του νερού μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, αυξάνοντας έτσι την σταθερότητα της μίγματος [ACI 237R (2007)]. Ποσοστά κάτω από 5% γενικά δεν προτιμώνται, μιας και οδηγούν σε μείωση του πλαστικού ιξώδους του μίγματος.

**Χημική δράση:** Λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας άμορφου διοξειδίου του πυριτίου, η πυριτική παιπάλη αποτελεί ένα εξαιρετικά δραστικό ποζολανικό υλικό για το σκυρόδεμα. Κατά τη χημική διεργασία της ενυδάτωσης του τσιμέντου παράγεται υδροξείδιο του ασβεστίου ( $Ca(OH)_2$  ή, για συντομία, CH), με το οποίο αντιδρά η πυριτική παιπάλη, παράγοντας πρόσθετο συνδετικό υλικό, γνωστό ως ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (με χημικό τύπο  $3 CaO \cdot 2 SiO_2 \cdot 4 H_2O$  ή, για συντομία, CSH), πέραν αυτού που παράγεται από το τσιμέντο. Σε αυτό το πρόσθετο συνδετικό υλικό οφείλονται κυρίως οι βελτιωμένες ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος.

*Συνολικά οι δράσεις στο σκυρόδεμα, ανάλογα με τη φάση του* – Οι δράσεις της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα αφορούν τόσο το νωπό, όσο και το σκληρυμένο σκυρόδεμα.

**Νωπό σκυρόδεμα:** Το νωπό σκυρόδεμα που περιέχει πυριτική παιπάλη είναι πιο συνεκτικό με αποτέλεσμα το μίγμα να παρουσιάζει μικρότερη απόμιξη. Επιπροσθέτως, το σφαιρικό σχήμα των κόκκων συνεισφέρει στην μείωση των τριβών μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων του τσιμέντου. Οι κόκκοι της πυριτικής παιπάλης δρουν ως λιπαντικό, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ρεολογίας του νωπού μίγματος. Επιπλέον το σκυρόδεμα αυτό παρουσιάζει ηπιότερα ή και σχεδόν ανύπαρκτα φαινόμενα εξίδρωσης, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία μικρότερου δικτύου ανοιχτών πόρων εν σχέσει προς άλλα σκυροδέματα, μείωση του πλήθους των μεγάλων πόρων (ανοιχτών και κλειστών), αλλά με το συνολικό πορώδες να μη μεταβάλλεται για σταθερό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό (w/b) [ACI 234R (2006), Neville (2004)]. Όσο αφορά στο φαινόμενο της εξίδρωσης, αυτό λαμβάνει χώρα κατά την αρχική διάστρωση και πριν τη πήξη. Τα βαρύτερα σωματίδια (τσιμέντο, αδρανή) καθιζάνουν λόγω βαρύτητας και το ελαφρύτερο νερό εξαναγκάζεται να ανέλθει σε υψηλότερα στρώματα. Μέρος του νερού παγιδεύεται κάτω από τα μεγαλύτερα αδρανή ή κάτω από τους σπλισμούς, ενώ μέρος του φθάνει έως και την επιφάνεια (φαινόμενο εξίδρωσης). Κατά την διαδρομή αυτή δημιουργείται ένα δίκτυο ανοιχτών τριχοειδών πόρων (capillary channels), στην ευαίσθητη μεταβατική ζώνη μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των αδρανών (πάχους περίπου 50  $\mu m$ ), γύρω από τους κόκκους των αδρανών [ACI 234R (2006)], το οποίο θα επιτρέψει στη συνέχεια την είσοδο σε εξωγενείς επιθετικούς παράγοντες (νερό, χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα, κ.λπ.). Ο περιορισμός του δικτύου αυτού, μέσω της φυσικής και χημικής δράσης της πυριτικής παιπάλης, βελτιώνει σημαντικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

**Σκληρυμένο σκυρόδεμα:** Το σκληρυμένο σκυρόδεμα που περιέχει πυριτική παιπάλη παρουσιάζει βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά (θλιπτική αντοχή, καμπτική αντοχή, τάση συνάφειας) και μειωμένη διαπερατότητα (βελτιωμένη ανθεκτικότητα: μειωμένη υδατοπερατότητα, μειωμένη υδαταπορροφητικότητα, αυξημένη αντίσταση

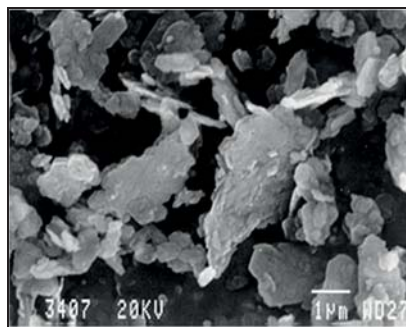
σε χλωριόντα). Πάντως, η σπουδαιότητα της χρήσης πυριτικής παιπάλης συνίσταται περισσότερο στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, παρά στη βελτίωση των αντοχών [Neville (2004)]. Συγκεκριμένα, οι ρυθμοί μεταφοράς επιθετικών παραγόντων (νερό, χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα, κ.λπ.) που επιτυγχάνονται είναι πολύ πιο βελτιωμένοι (μειωμένοι) εν σχέσει προς την αντίστοιχη βελτίωση (αύξηση) της θλιπτικής αντοχής. Όσο αφορά στη θλιπτική αντοχή, αναφέρεται [ACI 234R (2006)] ότι η βελτίωσή της οφείλεται στη βελτίωση της αντοχής της πάστας και, ειδικότερα, της πάστας που βρίσκεται στη μεταβατική ζώνη γύρω από τους κόκκους των αδρανών. Πάντως, έχει αναφερθεί [Neville (2004)] ότι μικρά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη (3 έως 5 % κ.β.) δεν αναμένεται να επηρεάσουν τη θλιπτική αντοχή, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ποσότητα αυτή είναι ανεπαρκής ώστε να καλύψει επαρκώς την επιφάνεια των αδρανών και να βελτιώσει έτσι την μικροδομή της μεταβατικής ζώνης, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Μικρή είναι και η δραστικότητα της πυριτικής παιπάλης σε ποσοστά άνω του 10 %, καθώς η επιφάνεια των αδρανών είναι ήδη πλήρως καλυμμένη από πυριτική παιπάλη και η τυχόν περίσσια υλικού δεν μπορεί να προσκολληθεί και να δράσει, έτσι, θετικά [Neville (2004)]. Η σχέση μεταξύ θλιπτικής και εφελκυστικής ή καμπτικής αντοχής δεν αναμένεται να διαφέρει από την αντίστοιχη σχέση σε σκυροδέματα χωρίς τη χρήση πυριτικής παιπάλης [Neville (2004)].

Η σύνοψη των αποτελεσμάτων διαφόρων μελετών σχετικών με την επίδραση της πυριτικής παιπάλης στις ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου συμβατικού σκυροδέματος μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [Neville (2004), ACI 234R (2006), Siddique and Khan (2011)].

*Περιβαλλοντικά οφέλη* – Τα περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης και μη απόρριψης ενός παραπροϊόντος της βιομηχανίας είναι προφανή. Επιπροσθέτως, η χρήση της για την κατασκευή πιο ανθεκτικών κτηρίων και υποδομών, που συνεπάγονται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και περιορισμένη ανάγκη επισκευών και συντήρησης, μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη στην οικονομία και το περιβάλλον.

### Μετακαολίνης

*Ορισμός* – Ο μετακαολίνης (**Σχήμα 22**) αποτελεί ένα άμορφο χαλαζιακό υλικό υψηλής ποζολανικότητας, με κόκκους γωνιώδους πλακοειδούς μορφής, το οποίο παράγεται από την έψηση (calcination) καθαρού ή επεξεργασμένου καολίνη σε θερμοκρασίες μεταξύ 650 και 850 °C, ακολουθούμενης από άλεση για την επίτευξη πολύ μεγάλης λεπτότητας μεταξύ 700 και 900 m<sup>2</sup>/kg [Aitcin (2008), Neville (2004)].



**Σχήμα 22** Σωματίδια μετακαολίνης [πηγή: Aitcin (2008)]

Ο καολίνης είναι μία μαλακή άργιλος λευκού χρώματος, με ειδικό βάρος 2.20-2.60 t/m<sup>3</sup>, που προέρχεται από αστριούς (τηκτοπυριτικά ορυκτά) και άλλα μεταλλικά ορυκτά [Advanced Concrete Technology (2005)]. Η συνήθης χρήση του καολίνης αφορά στην κατασκευή πορσελάνης, ενώ συναντάται ως πληρωτικό υλικό στην βιομηχανία χάρτου και υφασμάτων κ.ά.

Ο καολινίτης αποτελεί κύρια ορυκτολογική φάση του καολίνης και έχει θεωρητική χημική σύσταση 46.54 % SiO<sub>2</sub>, 39.5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και 13.96 % H<sub>2</sub>O w/w. Σε ένα πέτρωμα καολίνης, μαζί με τον καολινίτη συνυπάρχουν συνήθως και προσμίξεις άλλων ορυκτών όπως χαλαζίας ή χριστοβαλίτης, ανάτασης ή ρουτίλιο, αλουνίτης, σιδηροπυρίτης, λειμωνίτης, μοντμοριλλονίτης, άστριοι, μαρμαρυγίες, μοσχοβίτης ή βιοτίτης, λεπιδόλιθος και οξειδία του σιδήρου. Το πυρίτιο και το αργίλιο με τη μορφή υδροξειδίου μπορεί να απαντηθούν και ως επιφανειακά στον καολινίτη.

*Χημική Σύνθεση* – Ο μετακαολίνης (2 SiO<sub>2</sub>·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) προέρχεται από την έψηση του καολίνης (2 SiO<sub>2</sub>·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2H<sub>2</sub>O) [Aitcin (2008)].

*Φυσικές Ιδιότητες* – Οι φυσικές ιδιότητες του μετακαολίνης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των πρωτογενών υλικών, την θερμοκρασία έψησης και τις διαδικασίες ολοκλήρωσης της παρασκευής του [Advanced Concrete Technology (2005)]. Η πυκνότητα (ειδικό βάρος) του μετακαολίνης είναι χαμηλότερη από του τσιμέντου (3.15 t/m<sup>3</sup>) και είναι περίπου 2.40 t/m<sup>3</sup>, με αποτέλεσμα ο όγκος των τσιμεντοειδών υλικών να αυξάνεται όταν το τσιμέντο αντικαθίσταται από μετακαολίνης. Αυτό προτείνεται [Shirvill (1992) κατά Advanced Concrete Technology (2005)] ότι μπορεί να αντιμετωπιστεί, μειώνοντας την περιεκτικότητα της άμμου κατά 5 % για κάθε 10 % τσιμέντου που αντικαθίσταται από πυριτική παιπάλη. Επιπλέον, η προσθήκη μετακαολίνης αυξάνει την απαίτηση σε νερό, η οποία όμως μπορεί να εξισορροπηθεί μέσω κατάλληλης ποσότητας ρευστοποιητή.

*Θετικές δράσεις στο σκυρόδεμα* – Λόγω της άμορφης δομής του, ο μετακαολίνης αντιδρά με πολύ μεγάλη ταχύτητα με το παραγόμενο από την ενυδάτωση του τσιμέντου υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)<sub>2</sub>). Συγκριτικά με την πυριτική παιπάλη, έχει αποδειχθεί πειραματικά [Largent (1978) κατά Advanced Concrete Technology (2005)] ότι η ποζολανική δραστηριότητα του μετακαολίνης (κατανάλωση Ca(OH)<sub>2</sub> ανά γραμμάριο μετακαολίνης) είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη δραστηριότητα της πυριτικής παιπάλης.

Όπως και στην περίπτωση της πυριτικής παιπάλης, ο μετακαολίνης συνεισφέρει σημαντικά στη συνεκτικότητα του μίγματος, ενώ περιορίζει το φαινόμενο της εξίδρωσης. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα λεπτόκκοκων τσιμεντοειδών υλικών έχει αποτέλεσμα την ιδιαίτερα βελτιωμένη τελική επιφάνεια του σκυροδέματος.

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που περιλαμβάνει μετακαολίνης έχει διερευνηθεί εκτενώς, οδηγώντας σε αντιφατικά συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [Advanced Concrete Technology (2005)] μέρος των ερευνητικών εργασιών έδειξαν ότι η αντοχή μένει ανεπηρέαστη, ενώ άλλοι ερευνητές απέδειξαν τη θετική επίδραση του μετακαολίνης στην αντοχή. Οι διαφορές αποδόθηκαν στη σειρά ανάμιξης των υλικών, στη μελέτη σύνθεσης, τη σύσταση του τσιμέντου και την ποιότητα του μετακαολίνης, αλλά κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο. Η βέλτιστη ποσότητα μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου βρέθηκε

[Gold and Shirvill (1992) κατά *Advanced Concrete Technology* (2005)] μεταξύ 5 και 10%, ενώ μεγαλύτερα ποσοστά δεν φάνηκε να επηρεάζουν περαιτέρω τη θλιπτική αντοχή, εύρημα, πάντως, που ανατράπηκε από μεταγενέστερες μελέτες [Poon et al. (2006), Güneyisi et al. (2008), Hassan et al. (2010, 2012), Madandoust and Mousavi (2012), Ramezaniarpour and Bahrami Jovein (2012)]

Όπως και στην περίπτωση της πυριτικής παιπάλης, η βασικότερη δράση του μετακαολίνης αφορά στη βελτίωση της ανθεκτικότητας, μέσω της μείωσης της περατότητας σε εξωγενείς επιθετικούς παράγοντες (χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα, κ.λπ.). Ο μετακαολίνης δρα στις διεπιφάνειες μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των υπόλοιπων συστατικών του σκυροδέματος, που αποτελούν αδύναμες περιοχές της μικροδομής του σκυροδέματος. Στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται προσανατολισμένοι κρύσταλλοι CH και νερού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων και μικρορωγμών. Ο μετακαολίνης αντιδρά ποζολανικά με το CH, μειώνοντας έτσι την περιεκτικότητα και τη συγκέντρωσή του στις διεπιφάνειες και παράγοντας, παράλληλα, ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (CSH). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της συνεκτικότητας και τη μείωση του πορώδους. Η συμπαγής δομή βελτιώνεται ακόμα περισσότερο από την παρουσία των υπόλοιπων κρυσταλλικών ενώσεων που παράγονται κατά την ποζολανική αντίδραση. Οι ενώσεις αυτές έχουν ως χαρακτηριστικό τον μικρό τους όγκο, που τους δίνει τη δυνατότητα να εισέρχονται στους πόρους, μειώνοντας έτσι το εύρος τους (< 20 nm) ή ακόμα και εξαλείφοντάς τους. Η μείωση του πορώδους επιτυγχάνεται και μέσω της φυσικής δράσης του μετακαολίνης, κατά την οποία οι λεπτότεροι κόκκοι δρουν ως πληρωτικό μέσο. Συμπληρωματικές πληροφορίες που αφορούν στο μηχανισμό δράσης, αλλά και μία πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [Siddique and Klaus (2009), Badogiannis et al. (2005), Sabir et al. (2001)].

Συμπερασματικώς, η παρουσία μετακαολίνης βελτιώνει σημαντικά το πορώδες αλλά και την κατανομή του στη μάζα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της διαπερατότητάς του.

*Περιβαλλοντικά οφέλη* – Πέραν των θετικών δράσεων στην απόδοση του σκυροδέματος, ο μετακαολίνης έχει μία σημαντική περιβαλλοντική αξία, υπό την έννοια ότι ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου, συνεισφέρει στη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που συνοδεύονται από την παρασκευή του τσιμέντου. Επιπροσθέτως, η χρήση του για την κατασκευή ανθεκτικότερων κτηρίων και υποδομών, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και περιορισμένη ανάγκη επισκευών και συντήρησης, μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη στην οικονομία και το περιβάλλον.

### 1.2.2.3. Αδρανή

Τα αδρανή που συμμορφώνονται με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620 (2005) και καλύπτουν τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας του EN 206-1 (2000) (Παρ. 5.1.3, 5.2.3 του σχετικού Ευρωπαϊκού Προτύπου) είναι κατάλληλα για χρήση στο ΑΣΣ [EFNARC (2005)]. Ειδικά για το ΑΣΣ, η καταλληλότητα αλλά και η περιεκτικότητα των αδρανών, όσο αφορά τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του μίγματος, καθορίζεται από την πυκνότητα των οπλισμών και τη γεωμετρία των τύπων, που μπορούν να προκαλέσουν συνθήκες έμφραξης. Τόσο το μέγιστο μέγεθος και το σχήμα κόκκου, όσο και ο συνολικός περιεχόμενος όγκος των αδρανών θεωρούνται κρίσιμες παράμετροι για την επίτευξη ικανοποιητικής ικανότητας διέλευσης και σταθερότητας

του μίγματος. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Συνηθέστερα, χρησιμοποιείται μέγιστος κόκκος μεταξύ 12 και 20 mm. Τα θραυστά αδρανή, που εν γένει έχουν γωνιώδες σχήμα, είναι πιθανό να δημιουργήσουν συνθήκες έμφραξης λόγω της αυξημένης εσωτερικής τριβής του μίγματος. Αντίθετα, τα πιο σφαιρικά αδρανή λειτουργούν ως λιπαντικό του μίγματος, μειώνοντας τις εσωτερικές τριβές, και επηρεάζουν θετικά την εργασιμότητα του μίγματος, δηλαδή τη ροή και την ικανότητα διέλευσης. Τέλος, ο όγκος των αδρανών προτείνεται να κυμαίνεται μεταξύ 28 και 35 % του συνολικού όγκου του μίγματος [EFNARC (2002)], μπορεί πάντως να αυξηθεί όταν οι αντικειμενικοί κίνδυνοι έμφραξης αδρανών είναι περιορισμένοι. Σημειώνεται, πάντως, ότι τα περισσότερα μίγματα της βιβλιογραφίας ξεπερνούν σημαντικά την ως άνω προτεινόμενη αναλογία.

Σημειώνεται ότι η παρασκευή ΑΣΣ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον Έλεγχο Ποιότητας, μεταξύ άλλων, και των αδρανών (κοκκομετρία, περιεκτικότητα λεπτόκοκκων, υδαταπορροφητικότητα, περιεχόμενη υγρασία). Η μεταβολή κάθε φυσικής ιδιότητας ή κατάστασης του υλικού (ξηρό, πλήρως ή μερικώς κορεσμένο, κ.ά.) μπορεί να μεταβάλει σημαντικά την ποιότητα του τελικού προϊόντος [EFNARC (2005)].

#### 1.2.2.4. Νερό αναμίξεως

Το νερό που χρησιμοποιείται στο ΑΣΣ πρέπει να συμμορφώνεται με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1008 (2002).

#### 1.2.2.5. Χημικά πρόσθετα

Τα χημικά πρόσθετα αποτελούν μακρομοριακές οργανικές ενώσεις, συμμορφούμενες στο EN 934-2 (2009), οι οποίες σε κατάλληλο συνδυασμό με άλλα χαρακτηριστικά του μίγματος, όπως ορθά σχεδιασμένη κοκκομετρική καμπύλη ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική πυκνότητα στοίβαξης (packing density) και υψηλή περιεκτικότητα ανόργανων ή/ και ποζολανικών πρόσμικτων (τύπου I ή II, αντίστοιχα), μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην εργασιμότητα, τη συνεκτικότητα και τη σταθερότητα του μίγματος. Ενώ στο ΣΣ οι συνήθειες αναλογίες κυμαίνονται, κατά μέγιστο, από 1.0 έως 1.5 % κ.β. της περιεκτικότητας του τσιμέντου (σε ορισμένες περιπτώσεις έως και 2.0 % κ.β.), στο ΑΣΣ η μέγιστη περιεκτικότητα μπορεί να ανέλθει και σε ποσοστά ακόμα άνω του 3 % κ.β. της περιεκτικότητας του συνδετικού υλικού (binder). Γενικά, η δραστηριότητα των χημικών πρόσθετων εξαρτάται από τον τύπο τους, την χρονική στιγμή και τη μεθοδολογία εισαγωγής τους στο μίγμα, τη δοσολογία τους, τον λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ , ο οποίος συχνά αναφέρεται ως λόγος νερού προς τσιμεντοειδή υλικά,  $w/cm$ ), την κοκκομετρική διαβάθμιση, την προέλευση, τη λεπτότητα και τη χημική σύσταση των περιεχόμενων πρόσμικτων, τη θερμοκρασία του σκυροδέματος, κ.ά. [EFNARC (2005)].

Τα χημικά πρόσθετα διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, οι οποίες τα διαφοροποιούν ως προς τη δράση και όχι τη χημική τους σύσταση: Η *πρώτη* κατηγορία αφορά τους υπερπλαστικοποιητές - υπερρευστοποιητές (superplasticizers), οι οποίοι συνεισφέρουν στην βελτίωση της συνεκτικότητας και της εργασιμότητας του μίγματος, διατηρώντας την περιεκτικότητα νερού και την αντοχή. Η *δεύτερη* κατηγορία αποτελείται από τους ευρέως φάσματος υδατικούς μειωτήρες (high-range water reducing agents: HRWRA), οι οποίοι συνοδεύονται από μείωση



της περιεκτικότητας του νερού, διατηρώντας σχετικώς σταθερή την συνεκτικότητα και την εργασιμότητα και αυξάνοντας την αντοχή. Τέλος, η *τρίτη* κατηγορία αφορά στα ρυθμιστικά διαλύματα για το ιξώδες ή τροποποιητικά ιξώδους (viscosity modifying agents: VMA), τα οποία αυξάνουν το ιξώδες και τη συνεκτικότητα του μίγματος, βελτιώνοντας παράλληλα τη σταθερότητά του (μείωση τάσης απόμειξης). Τα τροποποιητικά ιξώδους χρησιμοποιούνται συνήθως σε μίγματα με μικρή περιεκτικότητα λεπτόκοκκων υλικών ή με μη ομαλή κοκκομετρική διαβάθμιση. Βασικό πλεονέκτημά τους είναι η μείωση της ευαισθησίας του μίγματος σε μικρές μεταβολές των συστατικών, ιδιαίτερα της περιεχόμενης υγρασίας των αδρανών.

Στο εμπόριο υπάρχει μεγάλο πλήθος χημικών προσθέτων, που προορίζονται για ευρεία χρήση στο ΣΣ ή εξειδικευμένη χρήση σε υπέρρευστα σκυροδέματα, όπως το ΑΣΣ.

### 1.3. Γενικά στοιχεία για το σκληρυμένο ΑΣΣ

Το υποκεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη, τα μηχανικά χαρακτηριστικά (Παρ. 1.3.1) και τα θέματα ανθεκτικότητας (Παρ. 1.3.2). Καθώς το εύρος της θεματολογίας είναι εξαιρετικά μεγάλο, ο σχολιασμός πραγματοποιείται μόνο ως προς τις ιδιότητες που ελέγχθηκαν πειραματικά, στο πλαίσιο της Διατριβής. Συγκεκριμένα, όσο αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά, σχολιάζονται η θλιπτική αντοχή (Παρ. 1.3.1.1), η εφελκυστική αντοχή (Παρ. 1.3.1.2), η καμπτική αντοχή (Παρ. 1.3.1.3), η αντοχή σε συνάφεια (Παρ. 1.3.1.4) και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (Παρ. 1.3.1.5). Ειδικά για τα θέματα συνάφειας, που αποτελούν και κύριο μέρος των πειραμάτων, γίνεται ιδιαίτερη μνεία σε πιο εξειδικευμένα θέματα, όπως η επιρροή της σύνθεσης, το φαινόμενο των άνω οπλισμών, η επιρροή της απόστασης από το σημείο έγχυσης, καθώς και η επιρροή αθέλητων μετακινήσεων κατά την πήξη του σκυροδέματος. Στο δεύτερο μέρος του υποκεφαλαίου, που αφορά σε θέματα ανθεκτικότητας, κατόπιν μιας γενικής ανασκόπησης (Παρ. 1.3.2.1), ιδιαίτερο βάρος δίδεται σε θέματα υδατοπερατότητας (Παρ. 1.3.2.2) και την αντίσταση του σκυροδέματος σε διείδυση χλωριόντων (Παρ. 1.3.2.3).

#### 1.3.1. Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Σε αντίθεση με τις σημαντικές διαφορές μεταξύ των νωπών ιδιοτήτων ΑΣΣ και ΣΣ, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ μπορούν να προσαρμοστούν και να προσομοιάζουν προς τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του ΣΣ. Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, οι περισσότερες έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ μπορούν να αξιολογηθούν με τις ίδιες δοκιμές που εφαρμόζονται και στο ΣΣ και είναι τουλάχιστον όμοια ή βελτιωμένα εν σχέσει προς το ΣΣ [[ACI 237R \(2007\)](#)]. Το γεγονός αυτό οφείλεται γενικώς στη χρήση ίδιων συστατικών για την παρασκευή των δύο τύπων σκυροδέματος (αν και σε διαφορετικές αναλογίες), ενώ τυχόν βελτίωση αποδίδεται κυρίως στην αύξηση της πυκνότητας του μίγματος λόγω της ενσωμάτωσης πρόσμικτων. Πάντως, σημειώνεται [[EFNARC \(2005\)](#)] ότι τυχόν διαφορές στα μηχανικά χαρακτηριστικά μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ συνήθως καλύπτονται από τα περιθώρια ασφαλείας των κανονισμών, υπόθεση, πάντως, που ελέγχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής.

Στα επόμενα υποκεφάλαια πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή της αναμενόμενης επιρροής της χρήσης ΑΣΣ σε σημαντικά μηχανικά χαρακτηριστικά, τα

οποία μελετήθηκαν και πειραματικά στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής. Οι επιρροή της χρήσης ΑΣΣ στα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας, ερπυσμός, συστολή ξήρανσης και αυτογενής συστολή, κ.λπ.) μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [[ACI 237R \(2007\)](#), [EFNARC \(2005\)](#), [RILEM Report 23 \(2000\)](#)].

### 1.3.1.1. Θλιπτική αντοχή

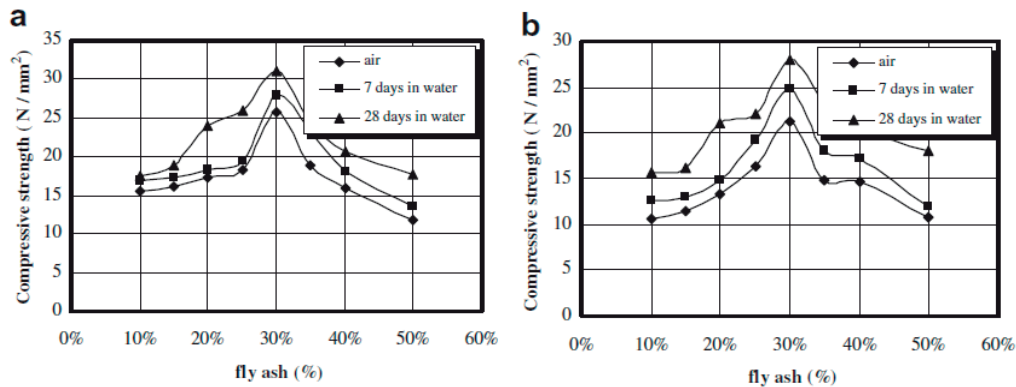
Οι ρεολογικές απαιτήσεις ενός ποιοτικού ΑΣΣ επιτυγχάνονται με την ενσωμάτωση συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών (supplementary cementitious materials), αλλά και ανόργανων πρόσμικτων χαμηλής κοκκομετρίας (π.χ. ασβεστολιθικό φίλερ). Παράλληλα, η επίτευξη ικανοποιητικής συνεκτικότητας οδηγεί στην απαίτηση για ρύθμιση της περιεκτικότητας του νερού σε χαμηλό επίπεδο και εξισορρόπησης της απώλειας εργασιμότητας μέσω της χρήσης κατάλληλων χημικών πρόσθετων (Παρ. 1.2.2.5) σε μεγαλύτερες ποσότητες. Ο περιγραφόμενος σχεδιασμός των μιγμάτων έχει ως αποτέλεσμα το ΑΣΣ να αναπτύσσει μια πιο πυκνή δομή εν σχέσει προς το ΣΣ, στην οποία και οφείλεται η συχνά σημαντικά υψηλότερη αντοχή σε θλίψη. Γενικά, αναφέρεται [[EFNARC \(2005\)](#), [ACI 237R \(2007\)](#), [RILEM Report 23 \(2000\)](#)] ότι μίγματα ΑΣΣ με ίδιο λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) ή προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ) ως προς αντίστοιχα μίγματα ΣΣ αναμένεται να παρουσιάσουν λιγότερο ή περισσότερο αυξημένες θλιπτικές αντοχές. Πάντως, από την ανασκόπηση μεγάλου πλήθους μελετών από τον [Domone \(2005\)](#) έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι κύρια παράμετρος που επηρεάζει τη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ είναι η σύσταση του συνδετικού υλικού και όχι οι λόγοι  $w/c$  ή  $w/b$ , όπως στην περίπτωση του ΣΣ.

Σε μελέτη των [Assié et al. \(2007\)](#) που αφορά ιδιότητες ανθεκτικότητας (Παρ. 1.3.2.4) για περιγραφή της μελέτης όσο αφορά τα θέματα ανθεκτικότητας), αναφέρθηκε ότι, παρά το διαφορετικό λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), αλλά για ίδιο λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), το ΑΣΣ αναπτύσσει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον ίση (ή και μεγαλύτερη) από το ΣΣ.

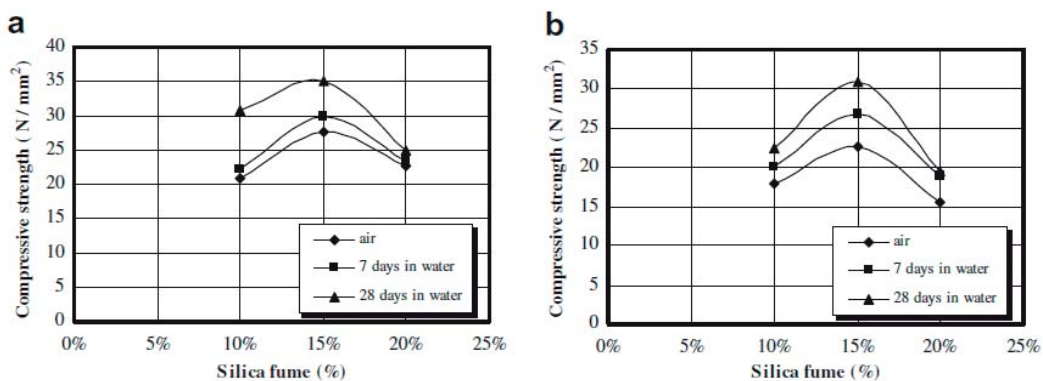
Στο 6<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο για το ΑΣΣ (Μόντρεαλ, Καναδάς, 2010), οι [Hassan et al. \(2010a\)](#) περιέγραψαν, μεταξύ άλλων, τη θετική δράση του μετακαολίνης, ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου, στη θλιπτική αντοχή. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από μίγματα με χρήση πυριτικής παιπάλης. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι ποσοστό αντικατάστασης 25 % κ.β. τσιμέντου από μετακαολίνη οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής κατά 22 %. Όμοια θετική επίδραση είχε τόσο η χρήση μετακαολίνης, όσο και πυριτικής παιπάλης.

Οι [Melo and Carneiro \(2010\)](#) διερεύνησαν το ρόλο της λεπτότητας και της περιεκτικότητας του μετακαολίνης στη συμπεριφορά μιγμάτων ΑΣΣ. Συνολικά, διερευνήθηκαν τρεις διαφορετικές λεπτότητες μετακαολίνης σε ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου 5 και 35 % κ.β. Ειδικά για το μετακαολίνη μέσης (κανονικής) λεπτότητας εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικοί όγκοι πάστας, από 0.40 έως 0.55 του συνολικού όγκου του μίγματος. Παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη λεπτότητα ή υψηλότερη περιεκτικότητα, ανεξαρτήτως της λεπτότητας του μετακαολίνης, συνεπάγονται αυξημένες απαιτήσεις σε ρευστοποιητή. Η θλιπτική αντοχή βρέθηκε να μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας μετακαολίνης, σημειώνεται πάντως ότι αυτό συμβαίνει σε συνδυασμό με την αύξηση του λόγου

νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ). Στο ίδιο αποτέλεσμα φάνηκε, ομοίως, να οδηγούν η μείωση της λεπτότητας, καθώς και η αύξηση του όγκου της πάστας.



**Σχήμα 23** Επίδραση διαφορετικών ποσοστών ιπτάμενης τέφρας στη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ με περιεκτικότητα τσιμέντου (a) 550 kg/m<sup>3</sup> και (b) 450 kg/m<sup>3</sup> [πηγή: Mohammed (2011)]



**Σχήμα 24** Επίδραση διαφορετικών ποσοστών πυριτικής παιπάλης στη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ με περιεκτικότητα τσιμέντου (a) 550 kg/m<sup>3</sup> και (b) 450 kg/m<sup>3</sup> [πηγή: Mohammed (2011)]

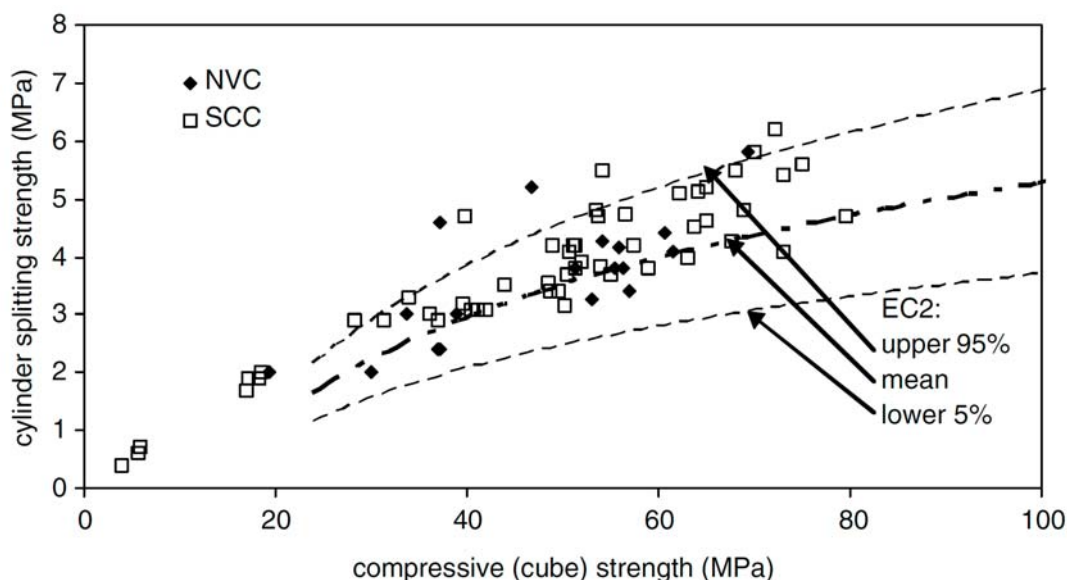
Η [Mohamed \(2011\)](#) πραγματοποίησε μία πειραματική μελέτη με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της ιπτάμενης τέφρας και της πυριτικής παιπάλης στην θλιπτική αντοχή δοκιμών ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, για το σκοπό της μελέτης παρασκευάστηκαν είκοσι πέντε μίγματα, αντικαθιστώντας το τσιμέντο είτε με ιπτάμενη τέφρα (έως 50%), είτε με πυριτική παιπάλη (έως 20%) ή με συνδυασμό των δύο πρόσμικτων. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι η θλιπτική αντοχή μεγιστοποιείται για ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα ίσο με 30% (**Σχήμα 23**) και από πυριτική παιπάλη ίσο με 15% (**Σχήμα 24**). Μεταξύ των δύο αυτών ποσοστών, η μέγιστη θλιπτική αντοχή αναπτύσσεται για την περίπτωση της πυριτικής παιπάλης.

Οι [Hassan et al. \(2012b\)](#), στο πλαίσιο μελέτης με κύριο αντικείμενο την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ, παρατήρησαν ότι η θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη (έως 25%). Επιπλέον, η βέλτιστη περιεκτικότητα πυριτικής παιπάλης, η οποία οδηγεί στη μέγιστη θλιπτική αντοχή, βρέθηκε ίση με 8% κ.β. τσιμέντου. Σημειώνεται, ότι για το εν λόγω ποσοστό αντικατάστασης, η αυξητική επίδραση στη θλιπτική αντοχή είναι παρεμφερής και περίπου ίση με 14%, ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου πρόσμικτου, μετακαολίνη ή πυριτικής παιπάλης. Για μεγαλύτερα ποσοστά

αντικατάστασης, ο μετακαολίνης συνεχίζει να δρα θετικά στην αντοχή, αν και με μικρότερη ένταση. Συγκεκριμένα, για μια αύξηση από 8 σε 25 % η αντίστοιχη αύξηση της θλιπτικής αντοχής δεν ξεπέρασε το 7 % (ως προς την αντοχή που αντιστοιχεί στο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη 8 %).

### 1.3.1.2. Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή του ΑΣΣ αναμένεται να είναι παρόμοια με την αντίστοιχη αντοχή του ΣΣ [RILEM Report 23 (2000), EFNARC (2005)]. Συγκεκριμένα, οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)] αναφέρουν ότι η σχέση μεταξύ θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής που ισχύει για το ΣΣ δεν αναμένεται να μεταβληθεί για το ΑΣΣ, καθώς ο όγκος της πάστας (τσιμέντο, λεπτόκοκκα και νερό) δεν επηρεάζει την εφελκυστική αντοχή. Η υπόθεση αυτή αποτέλεσε, πάντως, αντικείμενο της παρούσας Διατριβής και θα αξιολογηθεί στην Παρ. 2.3.2.5. Από την ανασκόπηση μεγάλου πλήθους μελετών από τον Domone (2007), βρέθηκε ότι, παρά τη σημαντική διασπορά, το ΑΣΣ και το ΣΣ παρουσιάζουν παρεμφερή συμπεριφορά (Σχήμα 25).



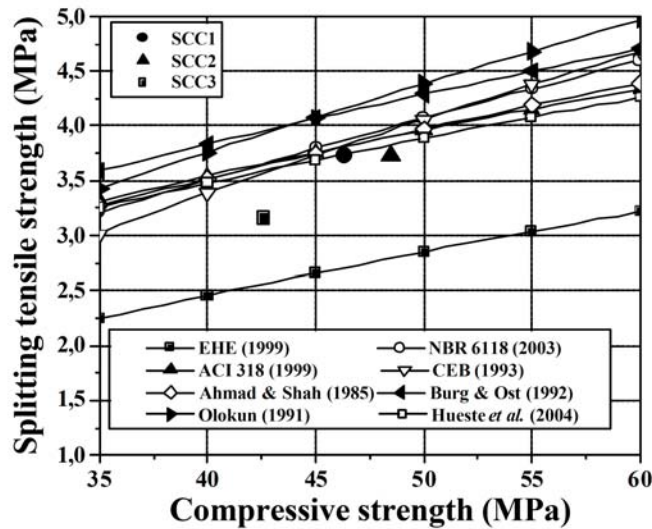
Σχήμα 25 Σύγκριση αποτελεσμάτων βιβλιογραφίας συσχέτισης εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και θλιπτικής αντοχής με κανονιστικές καμπύλες του Ευρωκώδικα 2 [πηγή: Domone (2007)]

Οι Almeida Filho et al. (2010) πραγματοποίησαν μια στατιστική διερεύνηση της μεταβλητότητας των μηχανικών χαρακτηριστικών στο σκληρυμένο ΑΣΣ και, συγκεκριμένα της θλιπτικής αντοχής, της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και του μέτρου ελαστικότητας. Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων από μίγματα ΑΣΣ με διαφορετικά αδρανή και περιεκτικότητες πάστας και χονδρόκοκκων αδρανών, προέκυψε ότι οι περισσότεροι κανονισμοί που εξετάστηκαν [EHE 2661 (1998), NBR 6118 (2003), CEB-FIP MC90 (1993), ACI 318/ 318R (2008)], αλλά και μοντέλα που προτάθηκαν από άλλους μελετητές [Hueste et al. (2004), Olokun (1991), Ahmad and Shah (1985), Burg and Ost (1992)] υπερεκτιμούν την εφελκυστική αντοχή (Σχήμα 26). Σημειώνεται ότι, ανάλογα με την τιμή της θλιπτικής αντοχής, διαφορετικά μοντέλα (Πίνακας 13) εκτιμούν καλύτερα την τιμή της αντίστοιχης εφελκυστικής αντοχής.

**Πίνακας 13** Εμπειρικές σχέσεις έμμεσου υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής  
[πηγές: Almeida Filho et al. (2010), Vilanova et al. (2011), Aslani and Nejadi (2012a)]

Βιβλ. Πηγή	Εφελκ. αντοχή $f_{ct}$ ( $f_{ct}, f_{cc}$ σε N/mm <sup>2</sup> )	Βιβλ. Πηγή	Εφελκ. αντοχή $f_{ct}$ ( $f_{ct}, f_{cc}$ σε N/mm <sup>2</sup> )
ACI 318/ 318R* (2008)	$0.56 f_{cc}^{0.50}$	Felekoğlu et al. (2007)	$0.43 f_{cc}^{0.60}$
ACI 363R (1997)	$0.59 f_{cc}^{0.50}$	Hueste et al. (2004)	$0.55 f_{cc}^{0.50}$
Ahmad and Shah (1985)	$4.34 f_{cc}^{0.55}$	Kim (2007)	$0.68 f_{cc}^{0.50}$
Aslani and Nejadi (2012a)	$0.134 f_{cc}^{0.587}$	NBR 6118 (2003)	$0.30 f_{cc}^{0.67}$
Burg and Ost (1992)	$7.30 f_{cc}^{0.50}$	NZS 3101 (2006)	$0.54 f_{cc}^{0.50}$
CEB-FIP MC90 (1993)	$1.56 [(f_{cc}-8)/10]^{0.67}$	Olokun (1991)	$1.39 f_{cc}^{0.69}$
CSA A23.4 (2004)	$0.67 f_{cc}^{0.50}$	Parra et al. (2011)	$0.28 f_{cc}^{0.67}$
Dinakar et al. (2008)	$0.82 f_{cc}^{0.50}$	Sukumar et al. (2008)	$0.0843 f_{cc} + 0.8180$
EHE 2661 (1998)	$0.21 f_{cc}^{0.67}$	Topçu and Uygunoğlu (2010)	$0.0602 f_{cc} + 0.2009$
EN 1992-1-1 (2004)	$0.33 (f_{cc}-8)^{0.67}$		

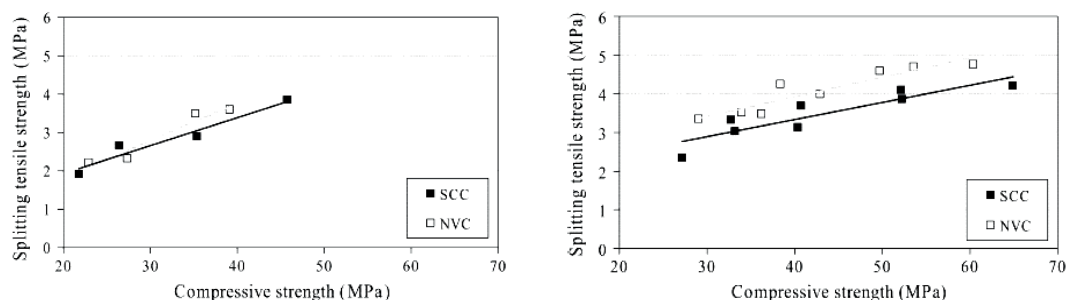
\*Στο Σχήμα 26 αναφέρεται παλαιότερη έκδοση του αμερικάνικου κανονισμού (1999). Στη νεότερη έκδοση του κανονισμού (2008) η σχέση παρέμεινε αμετάβλητη.



**Σχήμα 26** Σύγκριση πειραματικών καμπυλών συσχέτισης εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και θλιπτικής αντοχής με καμπύλες κανονισμών και προγενέστερων εργασιών  
[πηγή: Almeida Filho et al. (2010)]

Οι Vilanova et al. (2011) μελέτησαν την ικανότητα μοντέλων που προτείνονται από τους κυριότερους διεθνείς κανονισμούς [ACI 318/ 318RR (2008), EN 1992-1-1 (2004), NZS 3101 (2006), CSA A23.3 (2004)] και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών για το ΣΣ, να εκτιμήσουν ορθά τη μηχανική συμπεριφορά του ΑΣΣ. Μέσω της αξιολόγησης πειραματικών αποτελεσμάτων σε μίγματα ΑΣΣ από τη προγενέστερη αρθρογραφία, οι συγγραφείς έλεγξαν, μεταξύ άλλων, την εγκυρότητα των παραπάνω μοντέλων και παρατήρησαν ότι τα υπάρχοντα μοντέλα (Πίνακας 13) είναι γενικώς κατάλληλα για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερη ακρίβεια παρατηρήθηκε στο μοντέλο του αμερικάνικου κανονισμού [ACI 318/ 318RR (2008)], ενώ ο ευρωπαϊκός κανονισμός [EN 1992-1-1 (2004)] φαίνεται να υποεκτιμά ελαφρώς τα πειραματικά αποτελέσματα. Η υποεκτίμηση αυτή είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του νεοζηλανδικού κανονισμού [NZS 3101 (2006)], ενώ ο καναδικός κανονισμός [CSA A23.3 (2004)] φαίνεται να υπερεκτιμά τα πειραματικά αποτελέσματα. Σημαντικό είναι, επίσης, να αναφερθεί ότι οι αποκλίσεις των πειραματικών τιμών είναι μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες από τα διάφορα μοντέλα. Τέλος, οι συγγραφείς τονίζουν την διαφαινόμενη ανάγκη τα μελλοντικά μοντέλα να χρησιμοποιούν και άλλες παραμέτρους, πέραν της θλιπτικής αντοχής, ειδικά για την περίπτωση του ΑΣΣ.

Οι [Parra et al. \(2011\)](#) διερεύνησαν την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη και το μέτρο ελαστικότητας τεσσάρων μιγμάτων ΑΣΣ σε διαφορετικές ηλικίες, ενώ μελέτησαν και τη δομή του πορώδους. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα τεσσάρων μιγμάτων ΣΣ. Παρατηρήθηκε ότι η ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ οδήγησε σε μια μέση μείωση την εφελκυστική αντοχή κατά περίπου 15 % εν σχέσει προς το ΣΣ, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την αναμενόμενη συμπεριφορά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Σημειώνεται πάντως ότι η μείωση ήταν ασήμαντη σε χαμηλές ηλικίες (7 ημέρες), αλλά εντεινόταν για μεγαλύτερες ηλικίες (28 και 90 ημέρες) (**Σχήμα 27**). Ως εκ τούτου, οι συγγραφείς προτείνουν την ανάπτυξη νέων μοντέλων εκτίμησης της εφελκυστικής αντοχής για το ΑΣΣ.



**Σχήμα 27** Εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με ενσωματωμένο ασβεστολιθικό φίλερ, σε ηλικία (a) 7 ημερών και (b) 28 και 90 ημερών [πηγή: [Parra et al. \(2011\)](#)]

Στη μελέτη των [Aslani and Nejadi \(2012b\)](#) πραγματοποιήθηκε μία εκτενής ανασκόπηση προηγούμενων εργασιών σε θέματα μηχανικών χαρακτηριστικών του ΑΣΣ και στην εγκυρότητα των αναλυτικών μοντέλων εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, με έμφαση στο μέτρο ελαστικότητας, την εφελκυστική αντοχή (σε διάρρηξη) και την καμπύλη θλιπτικών τάσεων – παραμορφώσεων ( $\sigma - \epsilon$ ). Ειδικά για την εφελκυστική αντοχή, παρουσιάζονται μοντέλα υπολογισμού βάσει της θλιπτικής αντοχής, όπως έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές για το ΑΣΣ [[Felekoglou et al. \(2007\)](#), [Dinakar et al. \(2008\)](#), [Sukumar et al. \(2008\)](#), [Kim \(2008\)](#), [Torcu and Uygunoğlu \(2010\)](#), [Parra et al. \(2011\)](#)]. Αντίστοιχα μοντέλα έχουν προταθεί και για το ΣΣ. Οι συγγραφείς, μετά από αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων των προηγούμενων μελετών, κατέληξαν σε μοντέλα εκτίμησης της εφελκυστικής αντοχής (**Πίνακας 14**), βάσει της θλιπτικής αντοχής μιγμάτων ΑΣΣ συγκεκριμένων χαρακτηριστικών σύνθεσης (τύπος και προέλευση αδρανών, πρόσμικτο) ή μιγμάτων σκυροδέματος, ανεξαρτήτως τύπου (ΑΣΣ ή ΣΣ).

**Πίνακας 14** Εμπειρικές σχέσεις έμμεσου υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής, ανάλογα με τύπο σκυροδέματος και συστατικά υλικά [πηγή: [Aslani and Nejadi CBM \(2012a\)](#)]

Περιγραφή μίγματος	Εφελκυστική αντοχή $f_{ct}$ ( $f_{ct}$ , $f_{cc}$ σε $N/mm^2$ )
ΣΣ	$0.190 f_{cc}^{0.780}$
ΑΣΣ	$0.115 f_{cc}^{0.893}$
ΑΣΣ με ποταμίσια χονδρόκοκκα αδρανή και θραυστά γρανιτικά αδρανή	$0.115 f_{cc}^{0.912}$
ΑΣΣ με ασβεστολιθικά αδρανή	$0.472 f_{cc}^{0.551}$
ΑΣΣ με ιπτάμενη τέφρα	$0.251 f_{cc}^{0.712}$
ΑΣΣ με ασβεστολιθικό φίλερ	$0.082 f_{cc}^{0.965}$
Γενικό μοντέλο (ΑΣΣ, ΣΣ)	$0.134 f_{cc}^{0.587}$

### 1.3.1.3. Καμπτική αντοχή

Όπως και στο ΣΣ, η καμπτική αντοχή επηρεάζεται από τον λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), τον όγκο των χονδρόκοκκων αδρανών και την ποιότητα σύνδεσης μεταξύ της πάστας και των αδρανών. Όπως αναφέρεται στο αμερικάνικο πρότυπο [ACI 237R \(2007\)](#), οι [Sonebi and Bartos \(2001\)](#) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η καμπτική αντοχή του ΑΣΣ αναμένεται να είναι αυξημένη εν σχέσει προς την αντίστοιχη αντοχή του ΣΣ ίδιων αναλογιών συστατικών.

Η προγενέστερη βιβλιογραφία σε θέματα καμπτικής αντοχής του ΑΣΣ είναι γενικώς περιορισμένη και συνήθως αναφέρονται ως περιορισμένης έκτασης υποπαράγραφοι στο πλαίσιο των μηχανικών ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος.

### 1.3.1.4. Αντοχή σε συνάφεια

#### Γενικά στοιχεία από τη βιβλιογραφία

Ένα από τα σημαντικότερα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος είναι η συνάφεια με τον χάλυβα οπλισμού, που αποτελεί και την απαραίτητη προϋπόθεση για την ομοιόμορφη λειτουργία του τελικού προϊόντος.

Για την επίτευξη ικανοποιητικής συνάφειας, κρίσιμο στάδιο της διάστρωσης αποτελεί η επαρκής συμπίκνωση του σκυροδέματος, η οποία όμως καθίσταται ιδιαίτερα δυσχερής λόγω των αυξημένων απαιτήσεων οπλισμού που έχουν υιοθετηθεί κατά τις δύο με τρεις τελευταίες δεκαετίες, από τους πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενων διεθνείς κανονισμούς [[EN 1992-1-1 \(2004\)](#), [ACI 318/ 318R \(2008\)](#)]. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα των οπλισμών συχνά εμποδίζει ή δυσχεραίνει σημαντικά την είσοδο των δονητών μάζας στο εσωτερικό του σκυροδέματος, ενώ ακόμη και τα τυχόν μέτρα πρόληψης αποδεικνύονται ανεπαρκή ή ανέφικτα προς εφαρμογή. Επιπροσθέτως, δεν πρέπει να λησμονείται ότι η συχνή απειρία ή βιασύνη του τεχνικού προσωπικού οδηγεί επίσης σε φαινόμενα ανεπαρκούς συμπίκνωσης. Ως συνέπεια των ανωτέρω, το σκυρόδεμα δεν διατηρεί την ομοιογένειά του στο εσωτερικό της μάζας του, αφήνοντας κενά (σπηλαιώσεις) και ανεπαρκώς εγκιβωτισμένους οπλισμούς. Το ΑΣΣ έρχεται να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό, μιας και μετά από καλό σχεδιασμό (ρευστότητα, διελευσιμότητα, σταθερότητα) μπορεί να διασφαλίσει την εσωτερική ομοιογένεια του σκυροδέματος και την συνεπαγόμενη ορθή και πλήρη συνεργασία των δύο υλικών: σκυρόδεμα και χάλυβα, χωρίς την ανάγκη συμπληρωματικής συμπίκνωσης.

Μέχρι σήμερα, η διαθέσιμη βιβλιογραφία [[Castel et al. \(2006\)](#), [Desnerck et al. \(2010a\)](#), [Zhu et al. \(2004\)](#), [Domone \(2007\)](#), [Aslani and Nejadi \(2012b\)](#), [Almeida Filho et al. \(2008\)](#), [Valcuende and Parra \(2009\)](#), [Hassan et al. \(2010a\)](#), [Sfikas and Trezos \(2012\)](#), [Sfikas and Trezos \(2013\)](#), [Trezos et al. \(2014\)](#)] έχει παράσχει σημαντικά δεδομένα που διασφαλίζουν την καλή συμπεριφορά του ΑΣΣ σε συνάφεια.

Η αντοχή σε συνάφεια επηρεάζεται σημαντικά από την διάμετρο των ράβδων οπλισμού [[Desnerck et al. \(2010a\)](#), [Zhu et al. \(2004\)](#), [Almeida Filho et al. \(2008\)](#)], το ενεργό μήκος συνάφειας [[Desnerck et al. \(2010a\)](#), [Valcuende and Parra \(2009\)](#)], καθώς και από τη θέση των οπλισμών, τόσο ως προς το ύψος (φαινόμενο άνω ράβδων) [[Valcuende and Parra \(2009\)](#), [Esfahani et al. \(2008\)](#), [Hassan et al. \(2010a\)](#),

Trezos et al. (2010), Trezos et al. (2014)], αλλά και ως προς την επικάλυψή τους [Esfahani et al. (2008)].

Πέραν των χαρακτηριστικών του οπλισμού (γεωμετρία, προσανατολισμός και θέση), η αντοχή σε συνάφεια είναι επίσης γνωστό ότι επηρεάζεται από την ποιότητα και τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, καθώς επίσης και από την ποιότητα του τελικού επιτόπου προϊόντος [Cairns et al. (2006), Castel et al. (2006), Desnerck et al. (2010a), Trezos et al. (2010), Sfikas and Trezos (2013), Boel et al. (2010), Zhu et al. (2004), Domone (2007), Aslani and Nejadi (2012b), Söylev and François (2006), FIB Bulletin 10 (2000), ACI 408R (2003)]. Ειδικότερα, οποιαδήποτε αλλαγή στο σχεδιασμό του μίγματος, την διαδικασία παραγωγής, τον τρόπο διάστρωσης και την τελική κατανομή (settlement) του σκυροδέματος μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή σε συνάφεια. Οι περισσότερες προγενέστερες ερευνητικές εργασίες είναι προσανατολισμένες στην επιρροή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος [Zhu et al. (2004), Almeida Filho et al. (2008), Valcuende and Parra (2009), Foughi et al. (2008)], της ηλικίας του σκυροδέματος [Hassan et al. (2010a), Foughi et al. (2008)] και της προέλευσης των χονδρόκοκκων αδρανών [Almeida Filho et al. (2008)].

Έχει προταθεί ότι επόμενες ερευνητικές εργασίες θα πρέπει να εστιάσουν σε επιβεβαιώσεις των προηγούμενων αποτελεσμάτων ή σε πιο εξειδικευμένη θεματολογία [Domone (2007), Aslani and Nejadi (2012b)].

### **Επιρροή σύνθεσης στη συνάφεια**

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες εργασίες [Cairns and Plizzari (2003), Castel et al. (2006), Desnerck et al. (2010a), ACI (234R (2006)], η ποιότητα του σκυροδέματος, όσο αφορά στη σύνθεσή του, την διαδικασία παραγωγής και διάστρωσης, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την συνάφεια. Θεωρείται [Gjörv et al. (1990), Zhu et al. (2004), Domone (2007), Sfikas and Trezos (2012), Aslani and Nejadi (2012b), Sfikas and Trezos (2013), Trezos et al. (2014)] ότι οποιεσδήποτε αλλαγές στη σύνθεση, οι οποίες επηρεάζουν τη μορφολογία και τη μικροδομή του σκυροδέματος και, συνεπώς, της μεταβατικής ζώνης σκυροδέματος – χάλυβα, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά της συνάφειας. Τέτοιες αλλαγές στη σύνθεση περιλαμβάνουν μεταβολές στην περιεκτικότητα του τσιμέντου, του νερού ή της προσθήκης πρόσθετων αδρανών, ποζολανικών ή υδραυλικών υλικών (πρόσμικτα τύπου I ή II). Επιπλέον, έχει αναφερθεί [Collepari and Corradi (1979), Concrete Admixtures Handbook 1995)] ότι η συνάφεια βελτιώνεται μέσω της προσθήκης ρευστοποιητών.

Η συνήθης ενσωμάτωση αδρανών ή ποζολανικών πρόσμικτων, όπως το ασβεστολιθικό φίλερ, η πυριτική παιπάλη ή η ιπτάμενη τέφρα, στο ΑΣΣ, τα οποία στοχεύουν κυρίως στην βελτίωση των ρεολογικών χαρακτηριστικών του νωπού μίγματος, αναμένεται να οδηγήσει σε καλύτερη πυκνότητα στοίβαξης (packing density) του μίγματος (πιο ομαλή κατανομή κόκκων) και, συνεπώς, σε πυκνότερη μικροδομή του σκυροδέματος. Το συνολικό πορώδες μειώνεται, γεγονός που μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στα χαρακτηριστικά συνάφειας.

Για τη χρήση πυριτικής παιπάλης στο ΣΣ, η δράση στη συνάφεια έχει ήδη διερευνηθεί πειραματικά σε αρκετές παλαιότερες μελέτες. Όπως αναφέρεται στην



οδηγία [ACI 234R \(2006\)](#), πλήθος μελετών, όπως αναλύθηκαν από τους [Sellevold and Nilsen \(1987\)](#) απέδειξαν πειραματικά την βελτιωτική δράση της πυριτικής παιπάλης στη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Όπως αναφέρεται στην ίδια οδηγία, οι [Ezeldin and Balaguru \(1989\)](#) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για ποσοστά πυριτικής παιπάλης έως και 20 %, η αντοχή σε συνάφεια αυξάνεται αναλογικά με την τετραγωνική ρίζα της θλιπτικής αντοχής. Σημειώνεται, πάντως, ότι η χρήση πυριτικής παιπάλης οδηγεί σε πιο ψαθυρή συμπεριφορά του σκυροδέματος.

Οι [Gjörv et al. 1990](#) μελέτησαν την επιρροή συμπυκνωμένης πυριτικής παιπάλης (condensed silica fume, CFS) στη συμπεριφορά σε συνάφεια, αλλά και στην μικροδομή της μεταβατικής ζώνης μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Τα πειράματά τους αφορούσαν ΣΣ διαφόρων κατηγοριών αντοχής (από 35 έως 84 N/mm<sup>2</sup>) και περιεκτικότητας πυριτικής παιπάλης (από 0 έως 16 % κ.β. του τσιμέντου) και υλοποιήθηκαν μέσω δοκιμών εξόλκευσης, ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM) και ανάλυσης διάθλασης ακτίνων Χ (X-ray diffraction, XRD). Παρατηρήθηκε ότι αυξημένα ποσοστά πυριτικής παιπάλης αύξησαν την απαιτούμενη δύναμη εξόλκευσης, ειδικά για σκυροδέματα υψηλότερων αντοχών, ενώ η παρουσία πυριτικής παιπάλης μείωσε σημαντικά το πορώδες και το πάχος της μεταβατικής ζώνης.

Λίγα χρόνια αργότερα, οι [Abadjiev et al. \(1993\)](#) μελέτησαν και πάλι την επιρροή της συμπυκνωμένης πυριτικής παιπάλης στη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Ως παράμετροι των πειραμάτων ελήφθησαν η περιεκτικότητα σε πυριτική παιπάλη και η μορφή των ράβδων (λείες ή με νευρώσεις), ενώ οι συγκρίσεις έγιναν μεταξύ μιγμάτων σταθερής θλιπτικής αντοχής με ή χωρίς ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση πυριτικής παιπάλης βελτίωσε τη συνάφεια. Ειδικά για τις ράβδους με νευρώσεις (καθώς οι λείες ράβδοι έχουν πλέον καταργηθεί, με βάση τον [EN 10080 \(2005\)](#)), η αύξηση της συνάφειας κυμάνθηκε από 9 έως 37 %.

Συνοψίζοντας τα ευρήματα των παραπάνω μελετών, η βελτιωμένη συνάφεια μπορεί να αποδοθεί στη χημική αντίδραση μεταξύ των κρυστάλλων CH και του ποξολανικού υλικού (ποξολανική αντίδραση) που θεωρείται ότι συμπυκνώνει σημαντικά την μεταβατική ζώνη μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση ελεύθερου (μη δεσμευμένου) νερού λόγω της εξίδρωσης κάτω από τις οριζοντίως τοποθετημένες ράβδους. Σε συνδυασμό με τη συνήθως μικρότερη περιεκτικότητα νερού των μιγμάτων ΑΣΣ, το επιτευχθέν μικρότερο δίκτυο πόρων αναμένεται να οδηγήσει στη μείωση της συγκέντρωσης νερού κάτω από όλες τις ράβδους, βελτιώνοντας έτσι περαιτέρω τη συνάφεια.

### **Επιρροή θέσης οπλισμού καθ' ύψος (φαινόμενο άνω ράβδων)**

Για την περίπτωση μελών σκυροδέματος μεγάλου βάθους και ανεξαρτήτως της σύνθεσης, ο ρόλος του οπλισμού και, ειδικότερα, η επιρροή του προσανατολισμού και της θέσης των ράβδων στη συνάφεια, θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική. Για το ΣΣ, οι κυριότεροι κατασκευαστικοί κανονισμοί [[EN 1992-1-1 \(2004\)](#), [ACI 318/ 318R \(2008\)](#)] έχουν υιοθετήσει έναν διορθωτικό συντελεστή, ο οποίος μειώνει την τιμή της αντοχής σε συνάφεια στα υψηλότερα τμήματα βαθέων μελών σκυροδέματος.

Ο εν λόγω διορθωτικός συντελεστής αποσκοπεί στην αντιμετώπιση ενός φαινομένου, γνωστού ως το «φαινόμενο άνω ράβδων» (top-bar effect), ο μηχανισμός του οποίου

μπορεί να συνοψιστεί ως ακολούθως. Προγενέστερα της τελικής πήξης (σκληρυνσης) του σκυροδέματος, τα βαρύτερα συστατικά υλικά (τσιμέντο, αδρανή) τείνουν να ανακατανέμονται λόγω βαρύτητας, ωθώντας έτσι το ελαφρύτερο νερό να κινείται ανοδικά, διαμέσου του δικτύου πόρων, προς τα υψηλότερα τμήματα των μελών σκυροδέματος και, τελικώς, προς την ελεύθερη επιφάνειά τους (φαινόμενο εξίδρωσης). Κατά μήκος αυτής της διαδρομής, μέρος του νερού εγκλωβίζεται κάτω από τις οριζόντια τοποθετημένες ράβδους οπλισμού, μειώνοντας έτσι την ποιότητα της ζώνης αλληλεπίδρασης, όσο αφορά στη συνάφεια μεταξύ χαλύβδινων ράβδων και περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η εν λόγω συγκέντρωση νερού είναι υψηλότερη στα ανώτερα τμήματα βαθέων μελών σκυροδέματος.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το πυκνότερο δίκτυο πόρων του ΑΣΣ, λόγω της ενσωμάτωσης τόσο ανόργανων όσο και ποζολανικών πρόσμικτων, οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης νερού κάτω από τις ράβδους και, συνεπώς, το φαινόμενο άνω ράβδων αναμένεται να είναι λιγότερο έντονο.

Η σπουδαιότητα του φαινομένου άνω ράβδων έχει προγενέστερα διερευνηθεί από αρκετούς ερευνητές [Khayat et al. (1997), Cairns and Plizzari (2003), Chan et al. (2003), Söylev and François (2006), Domone (2007), Esfahani et al. (2008), Hassan et al. (2009), Valcuende and Parra (2009), Desnerck et al. (2010a), Trezos et al. (2010), Castel et al. (2006), Hossain and Lachemi (2008), Trezos et al. (2014)], οι οποίοι μελέτησαν την μεταβολή της συνάφειας σε σχέση με τη θέση ράβδων σε υψηλά μέλη σκυροδέματος. Έχει αναφερθεί ότι η συμπεριφορά του ΑΣΣ είναι είτε όμοια είτε βελτιωμένη εν σχέσει προς το ΣΣ [Castel et al. (2006), Domone (2007), Aslani and Nejandi (2012a), Valcuende and Parra (2009), Hassan et al. (2009), Khayat et al. (1997), Cairns and Plizzari (2003), Chan et al. (2003), Hossain and Lachemi (2008)] για μέλη μεγάλου βάθους και το φαινόμενο των άνω ράβδων είναι λιγότερο έντονο για το ΑΣΣ [Desnerck et al. (2010a), Aslani and Nejandi (2012b)]. Συγκεκριμένα, έχει αναφερθεί ότι η κανονικοποιημένη (στη θλιπτική αντοχή) αντοχή σε συνάφεια του ΑΣΣ είναι, γενικώς παρεμφερής ή υψηλότερη εν σχέσει προς το ΣΣ [Desnerck et al. (2010a), Sfikas and Trezos (2013), Chan et al. (2003), Thrane et al. (2010)], αν και έχει παρατηρηθεί ότι το ΣΣ παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις των τιμών αντοχής [Valcuende and Parra (2009), Hossain and Lachemi (2008), Khayat et al. (1997), Chan et al. (2003), Thrane et al. (2010)]. Σε μία έρευνα [Esfahani et al. (2008)], παρατηρήθηκε ότι το φαινόμενο άνω ράβδων ήταν εντονότερο στο ΑΣΣ, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι η εν λόγω παρατήρηση τέθηκε υπό αμφισβήτηση και αποδόθηκε στην αστοχία της επικάλυψης και όχι σε εξόλκευση [Valcuende M, Parra C, Balasch (2008)] και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με προσοχή. Στο πλαίσιο δοκιμών για τη διερεύνηση του φαινομένου άνω ράβδων, βρέθηκε ότι οι τιμές των τάσεων συνάφειας είναι υψηλότερες στο ΑΣΣ εν σχέσει με το ΣΣ [Castel et al. (2006), Zhu et al. (2004), Valcuende and Parra (2009)], φαινόμενο πάντως που εξαλείφεται για υψηλότερες ποιότητες σκυροδέματος. Ειδικότερα, έχει αναφερθεί [Valcuende and Parra (2009)] ότι ενώ μια διαφορά 30 % παρατηρήθηκε για ένα λόγο  $w/c = 0.65$ , η αντίστοιχη διαφορά για  $w/c = 0.45$  μειώθηκε στο 10 %. Το φαινόμενο αυτό εξηγήθηκε [Zhu et al. (2004)] ως αποτέλεσμα του χαμηλότερης περιεκτικότητας νερού και της υψηλότερης περιεκτικότητας λεπτόκοκκου υλικού του ΑΣΣ, παράγοντες που θεωρείται ότι μειώνουν τη συγκέντρωση του νερού λόγω εξίδρωσης κάτω από τις οριζόντιως τοποθετημένες ράβδους. Επιπροσθέτως, πολλοί ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι προδιαγραφές που τίθενται από τον Ευρωκώδικα EN 1992-1-1 (2004) για το ΣΣ φαίνεται να είναι επαρκείς για το ΣΣ [Söylev and

François (2006), Domone (2007), Almeida Filho et al. (2008), Valcuende and Parra (2009)]. Πάντως, έχει επίσης αναφερθεί [Khayat et al. (1997), Almeida Filho et al. (2008)] ότι η μείωση της συνάφειας καθ' ύψος υπερέβη τις προδιαγραφές σε μερικά δοκίμια ΑΣΣ και ΣΣ, σε κάποιο βαθμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι καθεμία από αυτές τις μελέτες εστιάζει σε διαφορετικές παραμέτρους (αντοχή σκυροδέματος, ρεολογικές ιδιότητες, πάχος επικάλυψης, μήκος συνάφειας, κ.ά.) και δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες.

### **Επιρροή απόστασης από το σημείο έγχυσης**

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που έχει, ωστόσο, ελάχιστα διερευνηθεί μέχρι σήμερα, αποτελεί η επιρροή της απόστασης των ράβδων από το σημείο έγχυσης στα χαρακτηριστικά συνάφειας. Το πρόβλημα αυτό δεν είναι προφανώς σημαντικό για το ΣΣ, όπου τα σημεία έγχυσης είναι πολύ πυκνότερα και η μηχανική συμπίκνωση είναι (ή θα έπρεπε να είναι) ομοιόμορφα και πυκνά κατανομημένη σε ολόκληρη την περιοχή σκυροδέτησης. Αντίθετα, η ικανότητα ενός σωστά σχεδιασμένου ΑΣΣ να ρέει σε σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις (εν σχέσει προς το ΣΣ) με ασήμαντα ή ανύπαρκτα ίχνη απόμιξης, προσφέρει το πλεονέκτημα του περιορισμού των απαιτούμενων σημείων έγχυσης κατά τη σκυροδέτηση μιας κατασκευής.

Δεδομένης της ικανοποιητικής αντίστασης σε απόμιξη ενός καλά σχεδιασμένου μίγματος ΑΣΣ, θα αναμενόταν μια ασήμαντη απώλεια συνάφειας κατά μήκος, υπόθεση πάντως που δεν έχει επαρκώς επιβεβαιωθεί πειραματικά. Μόνο περιορισμένης κλίμακας αποτελέσματα και σχόλια μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Πειραματικά, το πρόβλημα έχει υλοποιηθεί από προηγούμενες μελέτες [Hossain and Lachemi (2008), Thrane et al. (2010)] μέσω δοκιμών με μοναδικό σημείο έγχυσης σε άκρο οριζόντιου δοκιμίου, το υπόλοιπο μήκος του οποίου πληρώθηκε με απλή ροή του μίγματος χωρίς μηχανική συμπίκνωση. Σημειώνεται ότι και για τις δύο μελέτες, η χαμηλή επικάλυψη του σκυροδέματος οδήγησε σημαντικό πλήθος δοκιμών σε αστοχία λόγω διάρρηξης σκυροδέματος αντί σε αστοχία συνάφειας (αστοχία λόγω εξόλκευσης ράβδου). Σε μικρότερες αποστάσεις από το σημείο έγχυσης, έως 0.90 m [Hossain and Lachemi (2008)], δεν παρατηρήθηκε απώλεια συνάφειας. Οι μεταβολές στη συνάφεια αποδόθηκαν στη σύνθεση του μίγματος ΑΣΣ, το οποίο ενσωμάτωνε ένα τροποποιητικό ιξώδους ή ιπτάμενη τέφρα ή τσιμέντο με σκωρία υψικαμίνων) και ήταν πάντοτε μικρότερες από τις αντίστοιχες μεταβολές στο ΣΣ, το οποίο είχε σκυροδετηθεί με πολλαπλά σημεία έγχυσης και εφαρμογή κατάλληλης συμπίκνωσης. Από την άλλη πλευρά, παρατηρήθηκε μια μειούμενη κλίση της τελικής επιφάνειας κατά το μήκος των δοκιμίων ΑΣΣ, μέχρι απόσταση 2.20m από το σημείο έγχυσης [Thrane et al. (2010)], γεγονός που οδήγησε σε μείωση της επικάλυψης του οπλισμού. Επιπροσθέτως, υπήρξαν κάποιες περιπτώσεις συνθέσεων (για χαμηλότερες τιμές εξάπλωσης και σε μεγαλύτερες από το σημείο έγχυσης), για τις οποίες οι ράβδοι οπλισμού δεν εγκιβωτίστηκαν επιτυχώς στο σκυρόδεμα.

### **Επιρροή μετακινήσεων κατά την πήξη του σκυροδέματος**

Κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, πιθανές τοπικές διαφορικές καθιζήσεις στα ικριώματα των τύπων ή μία πιθανή οριζόντια μετακίνηση του τύπου λόγω ενός σεισμικού γεγονότος ή ενός κρουστικού φορτίου μπορεί να οδηγήσουν σε μία σχετική μετατόπιση (ολίσθηση) μεταξύ των εγκιβωτισμένων ράβδων και του

περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η επίδραση τέτοιων σχετικών μετακινήσεων στην αλληλεμπλοκή των αδρανών μέσα στη μάζα του σκυροδέματος είναι δυνατό να επηρεάσει τη συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος.

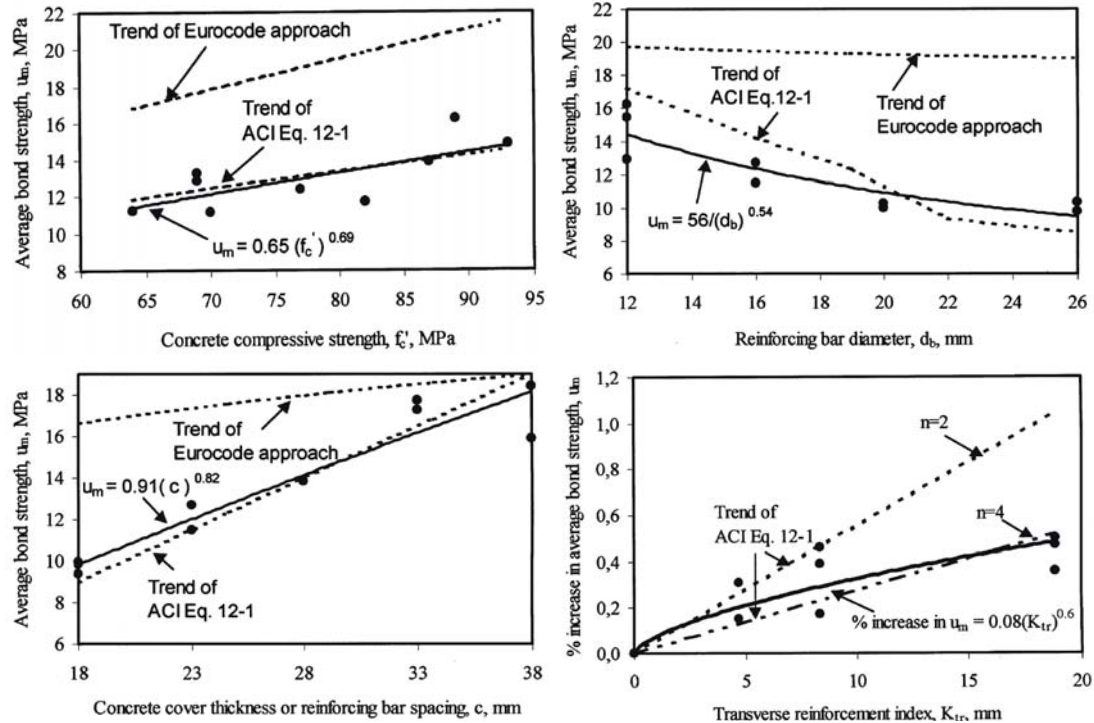
Από εκτεταμένη μελέτη της βιβλιογραφίας δεν βρέθηκαν προηγούμενες μελέτες που να εξετάζουν το φαινόμενο αυτό. Η προγενέστερη έρευνα [Hulshizer (1996), Kwan et al. (2005), Dunham et al. (2007)] είναι προσανατολισμένη κυρίως στην επιρροή των σεισμικών γεγονότων ή κρουστικών φορτίων (που αναφέρονται και ως «αιφνίδιες δονήσεις») στα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως η θλιπτική, η εφελκυστική ή η καμπτική αντοχή. Η θλιπτική αντοχή έχει βρεθεί να παραμένει ανεπηρέαστη από τέτοιες δονήσεις. Τα πρότυπα δοκίμια συνάφειας που έχουν υποστεί δονήσεις έχουν αναφερθεί να αστοχούν σε διάρρηξη προτού φτάσουν στην αστοχία συνάφειας, ενώ το φορτίο τη στιγμή της αστοχίας είναι σημαντικά υψηλότερο από το αναμενόμενο μέγιστο φορτίο που αναμένεται κανονιστικά, από τον Αμερικάνικο Κανονισμό **ACI 318/ 318R (2008)** (για μη περισφιγμένες ράβδους).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι από την αναζήτηση στη διαθέσιμη βιβλιογραφία προέκυψε ότι δεν έχουν προηγηθεί εις βάθος μελέτες που να αφορούν την επιρροή της σύνθεσης στον χρόνο πήξης του ΑΣΣ. Πάντως, λόγω της υψηλής ρευστότητας του μίγματος, ο χρόνος έναρξης πήξης αναμένεται να είναι, κατά κανόνα, σημαντικά βραδύτερος εν σχέσει προς το ΣΣ. Η χρήση επιταχυντών πήξης, αν και δεν έχει αναφερθεί ευθέως στη βιβλιογραφία και δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Διατριβής, ίσως αποτελούν ένα απαραίτητο μέτρο για τον περιορισμό της νωπής φάσης του ΑΣΣ και την συνεπακόλουθη ταχύτερη πήξη του σκυροδέματος. Μία αρκετά ενδιαφέρουσα μελέτη για την επίδραση διαφορετικών πρόσμικτων και χημικών πρόσθετων στην διαδικασία της πήξης σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής εκπονήθηκε από τους **Brooks et al. (2000)**. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση της πυριτικής παιπάλης, του μετακαολίνης, της ιπτάμενης τέφρας και της σκωρίας ψυκαμίνου στους χρόνους πήξης σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής, αλλά και ενός πρόσθετου μείωσης συστολής, μέσω της ευρέως εφαρμοζόμενης μεθόδου αντίστασης σε διείσδυση **ASTM C 403 (1999)**. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη πρόσμικτων, ανεξαρτήτως τύπου, καθυστέρησε την πήξη του σκυροδέματος, ενώ σημειώθηκε ότι οι χρόνοι πήξης εν γένει αυξάνονταν για μεγαλύτερες περιεκτικότητες πρόσμικτων. Όσο αφορά στη χρήση του πρόσθετου μείωσης συστολής, οι χρόνοι πήξης δεν μεταβλήθηκαν ουσιαστικά, ο συνδυασμός του όμως με υπερρευστοποιητή οδήγησε και πάλι σε σημαντική καθυστέρηση της πήξης. Σε όλες τις περιπτώσεις η εξέλιξη της πήξης (αντίσταση σε διείσδυση συναρτήσει του χρόνου) ακολουθεί μια εκθετική συνάρτηση.

### **Αναλυτική παρουσίαση της βιβλιογραφίας**

Προτού παρατεθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές που αφορούν στο ΑΣΣ, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί η μελέτη των **Yerlici and Özturan (2000)**, κατά την οποία διερευνήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε συνάφεια σε σκυροδέματα υψηλής αντοχής. Σκοπός της μελέτης ήταν η αξιολόγηση της επίδρασης της θλιπτικής αντοχής, της διαμέτρου της ράβδου, του πάχους επικάλυψης και της περιεκτικότητας οπλισμού κορμού στην αντοχή σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, αλλά και τη γενικότερη συμπεριφορά σε συνάφεια μέσω δοκιμών εξόλκευσης σε σαράντα έξι, συνολικά, δοκίμια. Παρατηρήθηκε (**Σχήμα 28**) ότι η αντοχή σε συνάφεια αυξάνεται για μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές, μεγαλύτερα πάχη

επικάλυψης και υψηλότερη περιεκτικότητα οπλισμού κορμού, ενώ μειώνεται για μεγαλύτερες διαμέτρους ράβδων. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση με τις κανονιστικές προδιαγραφές [ACI 318/ 318R (2008), EN 1992-1-1 (2004)], προτάθηκε μία έκφραση υπολογισμού του απαραίτητου μήκους αγκύρωσης, περιλαμβανομένων όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν.

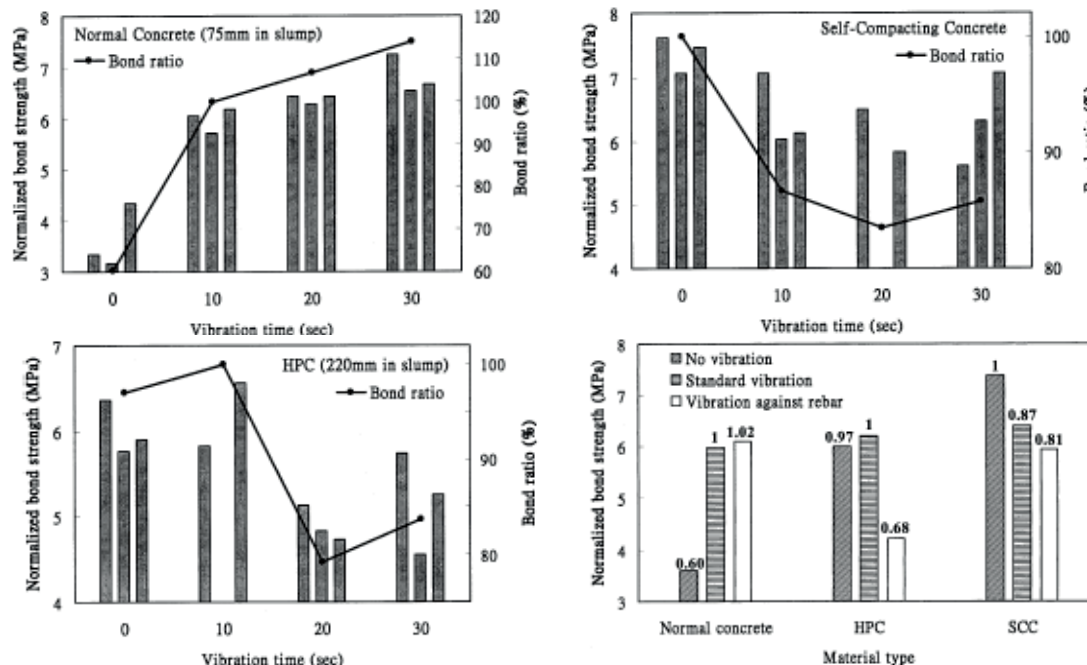


**Σχήμα 28** Επίδραση στην μέση αντοχή σε συνάφεια (α) της θλιπτικής αντοχής, (β) της διαμέτρου της ράβδου οπλισμού, (γ) της επικάλυψης σκυροδέματος της ράβδου οπλισμού, του ποσοστού οπλισμού κορμού [πηγή: [Yerlici and Özturan \(2000\)](#)]

Νωρίτερα, οι [Khayat et al. \(1997\)](#), είχαν εκπονήσει μελέτη σχετικά με την αξιολόγηση της ομοιογένειας των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΑΣΣ σε πειραματικά τοιχία σκυροδέματος. Συνολικά, στο πλαίσιο της μελέτης εξετάστηκαν πειραματικά οκτώ μίγματα ΑΣΣ με τιμές εξάπλωσης μεγαλύτερες των 630 mm και ένα μίγμα ΣΣ (μίγμα αναφοράς) με κάθιση ίση με 165 mm. Μεταξύ άλλων, διερευνήθηκε η αντοχή σε συνάφεια ράβδων που ήταν τοποθετημένες σε διάφορα ύψη. Ο απαιτούμενος διορθωτικός συντελεστής (συντελεστής θέσης, location factor) για τις ράβδους με μεγάλο υποκείμενο πάχος σκυροδέματος (1400 mm) βρέθηκε, για την πλειονότητα των μιγμάτων ΑΣΣ, ίσος με  $1.4 \pm 0.2$ , ενώ για ένα μίγμα ΑΣΣ και για το μίγμα αναφοράς ο απαιτούμενος συντελεστής ανήλθε σε 2.0. Ως εκ τούτου, προέκυψε ότι τα μίγματα ΑΣΣ είναι αρκετά σταθερά και μπορούν να διασφαλίσουν την ομοιογένεια της συνάφειάς τους με χάλυβα με μεγάλο υποκείμενο πάχος σκυροδέματος.

Στο 1<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο της RILEM για το ΑΣΣ, οι [Wang and Zheng \(1999\)](#) παρουσίασαν εισήγηση με θέμα τη συμπεριφορά του ΑΣΣ σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης σε τριάντα δοκίμια, από τις οποίες προέκυψε ότι η αντοχή σε συνάφεια είναι υψηλότερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, ενώ σημειώθηκε ότι οι εν ισχύι κινεζικοί κατασκευαστικοί κανονισμοί μπορούν να εφαρμοστούν και στο ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, για την ίδια κατηγορία αντοχής, η αντοχή σε συνάφεια του ΑΣΣ ήταν ελαφρώς υψηλότερη (περίπου 9 %) εν σχέσει προς την αντοχή σε συνάφεια του ΣΣ, τόσο στις

28 όσο και στις 60 ημέρες από τη σκυροδέτηση. Η δυσκαμψία της καμπύλης τάσεων συνάφειας συναρτήσει των ολισθήσεων ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση του ΑΣΣ, ενώ μεγαλύτερες αντοχές σε συνάφεια παρατηρήθηκαν για μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές του ΑΣΣ. Τέλος, σημειώθηκε ότι η απαιτούμενη δύναμη εξόλκευσης οδηγεί σε τάσεις ελαφρώς υψηλότερες από το όριο διαρροής του οπλισμού.



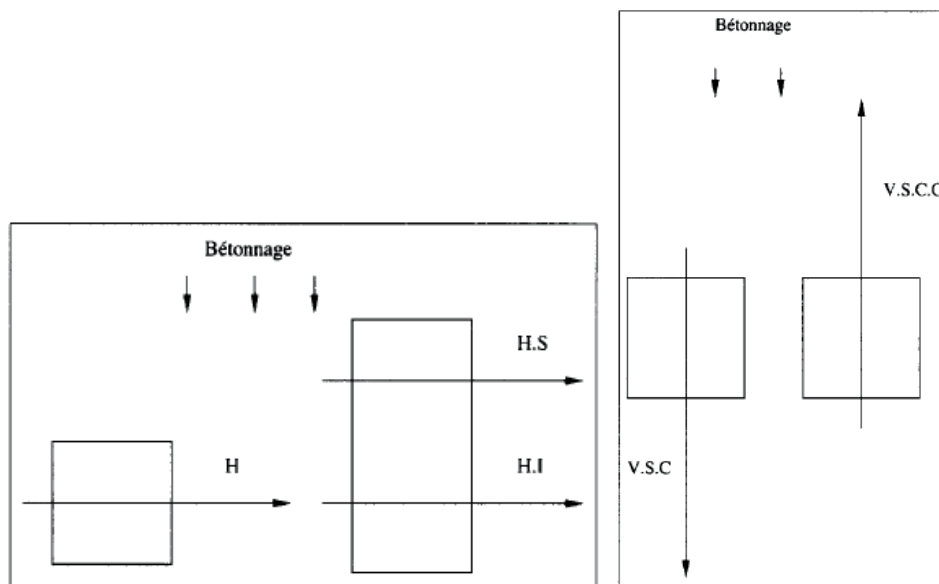
**Σχήμα 29** Ανηγμένη αντοχή σε συνάφεια για διάφορους χρόνους δόνησης (α) σε ΣΣ, (β) σε ΑΣΣ, (γ) σε Σκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητα (δ) συγκριτικά [πηγή: Chan et al. (2003a)]

Ο ρόλος της συμπύκνωσης στην αντοχή σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα διερευνήθηκε σε σκυροδέματα διαφορετικής εργασιμότητας από τους Chan et al. (2003a). Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν ΣΣ με χαμηλή κάθιση (75 mm), σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας με υψηλή κάθιση (220 mm) και ΑΣΣ. Ο διαφορετικός βαθμός συμπύκνωσης επετεύχθη μέσω κανονικής συμπύκνωσης, υπέρμετρης συμπύκνωσης, απουσίας συμπύκνωσης και εσφαλμένης συμπύκνωσης. Παρατηρήθηκε ότι η συμπύκνωση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη της αντοχής σε συνάφεια (Σχήμα 29). Η απουσία συμπύκνωσης ή η ανεπαρκής συμπύκνωση μειώνει σημαντικά την αντοχή σε συνάφεια του χαμηλής εργασιμότητας ΣΣ, φαινόμενο που δεν είναι, πάντως, εμφανές για την περίπτωση της υπέρμετρης ή εσφαλμένης συμπύκνωσης. Ειδικά για τα σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας η υπέρμετρη ή εσφαλμένη συμπύκνωση μπορεί να οδηγήσει σε ουσιαστική απώλεια συνάφειας, σε επίπεδα της τάξεως έως και 30 %. Η ανεπαρκής συμπύκνωση δεν φάνηκε να οδηγεί σε σημαντική απώλεια συνάφειας, αν και υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης κενών, ειδικά στις άκρες των μελών. Αντίθετα, παρά την απουσία συμπύκνωσης στο ΑΣΣ, η αναπτυσσόμενη αντοχή σε συνάφεια είναι σημαντικά υψηλότερη από το ΣΣ. Σημειώνεται, επίσης, ότι συμπληρωματική συμπύκνωση στο ΑΣΣ μπορεί να επηρεάσει την αντοχή σε συνάφεια (μείωση έως και 10 %) και πρέπει να αποφεύγεται.

Σε μία άλλη παράλληλη δημοσίευσή τους, οι Chan et al. (2003b) μελέτησαν την ανάπτυξη της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα σε δοκίμια ΑΣΣ πλήρους κλίμακας και συνέκριναν τα αποτελέσματα με αντίστοιχα από δοκίμια ΣΣ. Παρατηρήθηκε ότι στο ΑΣΣ, η τάση συνάφειας ήταν σημαντικά βελτιωμένη εν

σχέσει προς το ΣΣ, ενώ η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων ήταν μικρότερη εν σχέσει προς το ΣΣ. Επιπλέον, η μείωση της συνάφειας λόγω του φαινομένου της εξίδρωσης και της ανομοιογενούς φύσης του υλικού ήταν πολύ πιο περιορισμένη στην περίπτωση του ΑΣΣ, με αποτέλεσμα ένα πολύ λιγότερο έντονο φαινόμενο άνω ράβδων. Συνολικά, οι συγγραφείς τόνισαν την αξιοπιστία του ΑΣΣ σε μία κατασκευή ωπλισμένου σκυροδέματος, συγκριτικά με το ΣΣ. Πάντως, σημειώθηκε ότι για μικρές ηλικίες (έως 7 ημέρες) και πιθανόν λόγω φαινομένων που οφείλονται στα χρησιμοποιούμενα χημικά πρόσθετα (τύπος, δραστική συμπεριφορά), θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής σε συνάφεια. Τα φαινόμενα αυτά εξασθενούν μετά από τις 7 ημέρες και το ΑΣΣ υπερέχει στη συμπεριφορά του έναντι του ΣΣ.

Την ίδια εποχή, οι [Daoud and Lorrain \(2003\)](#) μελέτησαν την επιρροή της θέσης οριζόντιων ράβδων, σκυροδετημένων κάθετα στον προσανατολισμό τους (**Σχήμα 30α**), και της διεύθυνσης φόρτισης σε κατακόρυφες ράβδους (κατά τη φορά σκυροδέτησης ή αντίθετα αυτής, **Σχήμα 30β**) στη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα σε δοκίμια ΑΣΣ.

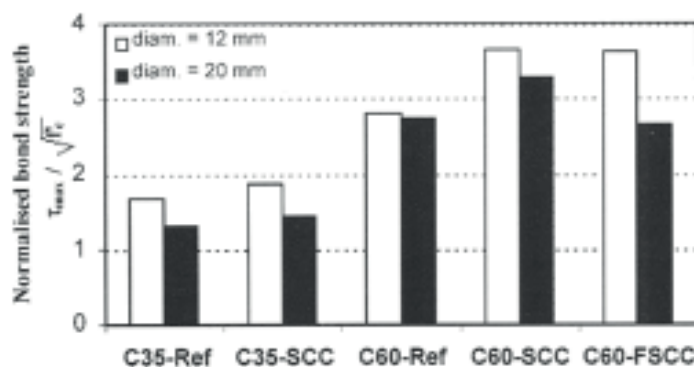


**Σχήμα 30** Διατάξεις για τη διερεύνηση (α) της επιρροής της θέσης ράβδου καθ' ύψος και (β) της διεύθυνσης φόρτισης εν σχέσει προς τη φορά σκυροδέτησης [πηγή: [Daoud and Lorrain \(2003\)](#)]

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης έδειξαν ότι η αντοχή σε συνάφεια ήταν υψηλότερη σε κατακόρυφες ράβδους, οι οποίες ελέγχθηκαν αντίθετα από τη φορά σκυροδέτησης, ενώ για τις οριζόντιες ράβδους η αντοχή σε συνάφεια μειώθηκε για μεγαλύτερα υποκείμενα πάχη σκυροδέματος. Ο λόγος μεταξύ της αντοχής σε συνάφεια κατακόρυφων ράβδων προς την αντοχή οριζόντιων ράβδων κυμάνθηκε περί το 1.15. Για την επεξήγηση των παρατηρήσεων προτάθηκε μία μέθοδος ανάλυσης εικόνας, μέσω της οποίας παρατηρήθηκε μια ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των ευρημάτων που αφορούν στην αντοχή σε συνάφεια και τη διαφορά μεταξύ του ποσοστού χονδρόκοκκων αδρανών εκατέρωθεν (άνω και κάτω) της κάθε εξεταζόμενης ράβδου.

Το πρόβλημα της ασυμβατότητας μεταξύ των δοκιμών για την αξιολόγηση της συνάφειας και η ανάγκη ανάπτυξης μιας νέα εναρμονισμένης δοκιμής, βάσει των νέων δεδομένων, καινοτομιών στην παρασκευή ράβδων ωπλισμού, αλλά και υλικών,

καθώς και της ανάπτυξης της τεχνολογίας τριάντα χρόνια μετά την πρώτη εφαρμογή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα, μελετήθηκαν από τους Cairns and Plizzari (2003). Οι συγγραφείς τόνισαν ότι οι τρέχουσες δοκιμές δε λαμβάνουν υπόψη τη γεωμετρία των νευρώσεων, η οποία παίζει ουσιαστικό ρόλο στη μεταφορά των δυνάμεων. Επιπλέον, η σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων πλέον τσιμέντων για την παρασκευή σκυροδέματος, έχει οδηγήσει σε σημαντικά αυξημένες αντοχές, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την τάση για πιο ψαθυρές θραύσεις, ειδικά για την περίπτωση των αστοχιών σε διάρρηξη. Άλλες παράμετροι, όπως το ενεργό μήκος συνάφειας και η επικάλυψη του οπλισμού, μπορεί επίσης να παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελικώς υπολογιζόμενη αντοχή σε συνάφεια, η οποία μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική από την πραγματική σε μία κατασκευή. Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής δεν πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επιρροή των παραπάνω μεταβλητών στην αντοχή σε συνάφεια, το οποίο θα μπορούσε πάντως να αποτελέσει μελλοντικά ένα αρκετά ενδιαφέρον ερευνητικό αντικείμενο. Συγκεκριμένα, λόγω των μεγαλύτερων αντοχών σε συνάφεια που αναπτύσσονται στο ΑΣΣ, που αντιστοιχούν σε δυνάμεις κοντά στην τάση διαρροής του χάλυβα, προτείνεται να μελετηθεί η πιθανή μείωση του ενεργού μήκους συνάφειας.



**Σχήμα 31** Ανηγμένη αντοχή σε συνάφεια για δύο διαφορετικές διαμέτρους ράβδων οπλισμού για διάφορους τύπους και κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος [πηγή: Zhu et al. (2004)]

Οι Zhu et al. (2004) μελέτησαν την επιρροή της χρήσης ΑΣΣ στη συνάφεια και τις ιδιότητες της ζώνης αλληλεπίδρασης μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Η αντοχή σε συνάφεια εκτιμήθηκε πειραματικά μέσω δοκιμών εξόλκευσης, ενώ η μεταβατική ζώνη αλληλεπίδρασης (interfacial transition zone) διερευνήθηκε μέσω της δοκιμής ανίχνευσης βάθους νανο-κοιλωμάτων (ελεύθερη μετάφραση του όρου depth-sensing nano-indentation)<sup>7</sup>, η οποία επιτρέπει την ποσοτική και άμεση εκτίμηση των ιδιοτήτων της ζώνης που ευθύνεται για την ανάπτυξη της συνάφειας. Ελέγχθηκαν δύο κατηγορίες ποιότητας (35 και 60 N/mm<sup>2</sup>) σε κάθε τύπο σκυροδέματος, ΑΣΣ ή ΣΣ. Παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη τάση συνάφειας μειώνεται για αύξηση της διαμέτρου των ράβδων από 12 σε 20 mm (Σχήμα 31). Η κανονικοποιημένη (στη θλιπτική αντοχή) τάση συνάφειας είναι κατά 10 έως 40 % υψηλότερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, ανεξαρτήτως της κατηγορίας αντοχής και της διαμέτρου της ράβδου. Το

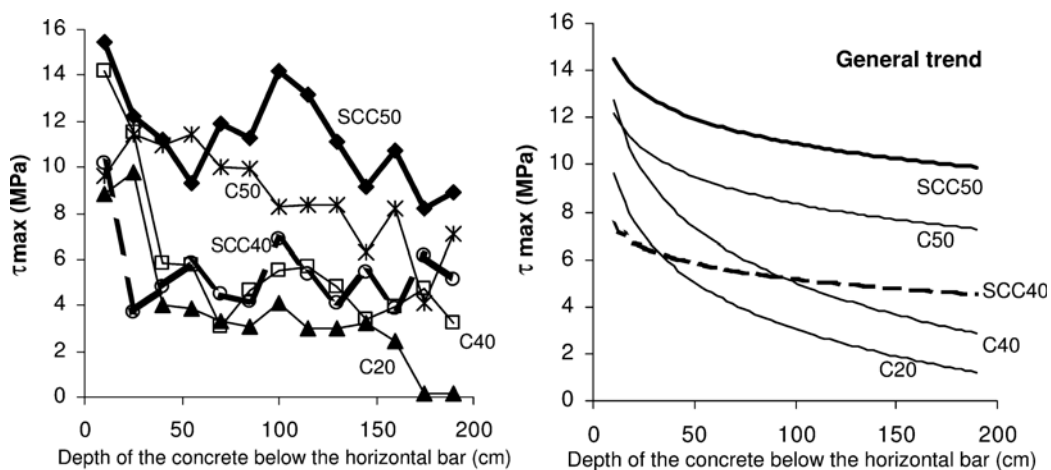
<sup>7</sup> Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο των συχνά εφαρμοζόμενων έμμεσων μεθόδων αξιολόγησης της μεταβατικής ζώνης αλληλεπίδρασης, όπως η ανάλυση εικόνας SEM ή η θεωρητική μοντελοποίηση. Η χρησιμοποιούμενη συσκευή ελέγχου παρακολουθεί διαρκώς το φορτίο και τη μετατόπιση (ή το βάθος) κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η πιο εκτενής περιγραφή της μεθόδου και της συσκευής ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας Διατριβής, όμως περαιτέρω πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν από τον αναγνώστη στη βιβλιογραφία [Oliver and Pharr (1992), Zhu et al. (2000)].



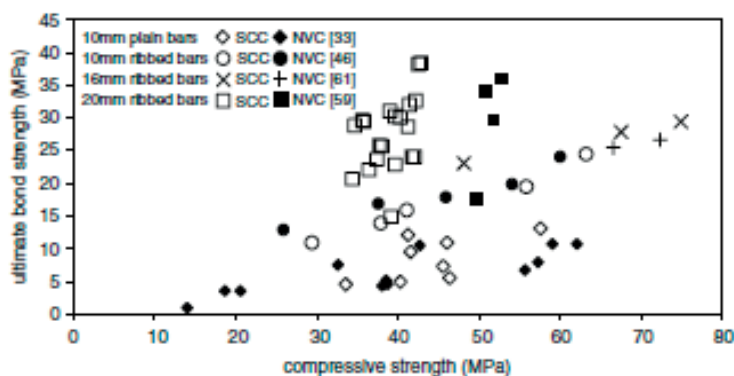
γεγονός αυτό αποδόθηκε στη χαμηλότερη περιεκτικότητα νερού και, κυρίως, στην υψηλότερη περιεκτικότητα σκόνης των μιγμάτων ΑΣΣ, συνθήκες που αναμένεται να μειώσουν σημαντικά την συγκέντρωση του ανοδικώς κινούμενου νερού της εξίδρωσης κάτω από τις οριζοντίως τοποθετημένες ράβδους. Αντίθετα, στο ΣΣ, το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε τοπική αύξηση του λόγου νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) κάτω από τις ράβδους, μειώνοντας έτσι την αντοχή σε συνάφεια. Από τη διερεύνηση της μεταβατικής ζώνης αλληλεπίδρασης προέκυψε ότι το μέτρο ελαστικότητας και η μικροαντοχή της ζώνης ήταν χαμηλότερα στην κάτω γενέτειρα των ράβδων εν σχέσει προς την άνω γενέτειρα, διαφορά που ήταν μικρότερη στην περίπτωση των μιγμάτων ΑΣΣ. Η βελτιωμένη συμπεριφορά του ΑΣΣ αποδόθηκε στην μειωμένη εξίδρωση, αλλά και τη βελτιωμένη πλαστική σταθερότητα, την περιορισμένη δηλαδή καθίζηση των αδρανών κατά την πήξη, που στην περίπτωση του ΣΣ οφείλεται στο συνδυασμό μεγάλου υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος και μειωμένης συνεκτικότητας του μίγματος.

Οι [Castel et al. \(2006\)](#) μελέτησαν μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ δύο κατηγοριών αντοχής (25 και 40 N/mm<sup>2</sup>) και παρατήρησαν ότι για χαμηλότερες αντοχές η εξίδρωση είναι μικρότερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, με τη μεταξύ τους διαφορά, πάντως, να περιορίζεται σημαντικά όσο η ποιότητα του σκυροδέματος βελτιώνεται. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε σημαντικά κενά κάτω από ράβδους που βρίσκονται σε υψηλότερες θέσεις επί των τύπων, από 200 έως 300 mm από τη βάση των δοκιμίων, για την περίπτωση του ΣΣ χαμηλής αντοχής. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται και μειωμένη αντοχή σε συνάφεια στα υψηλότερα στρώματα (φαινόμενο άνω ράβδων). Το ΑΣΣ παρουσίασε εν γένει περίπου 20 % υψηλότερες μέγιστες τάσεις συνάφειας από το ΣΣ, ανεξαρτήτως της κατηγορίας αντοχής.

Η μελέτη των [Söylev and François \(2006\)](#) επικεντρώθηκε στην επιρροή του ύψους του μέλους στη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Μέσω δοκιμών εξόλκευσης σε πέντε δοκίμια ύψους δύο μέτρων, παρασκευασμένων από δύο μίγματα ΑΣΣ και τρία μίγματα ΣΣ, με εγκάρσιες ράβδους κατανεμημένες καθ' ύψος σε διαδοχικές αποστάσεις 150 mm και απόσταση της άνω ράβδου από την κορυφή ίση με 100 mm, διαπιστώθηκε ότι η αντοχή σε συνάφεια μειώνεται για μεγαλύτερα υποκείμενα πάχη σκυροδέματος κάτω από τις οριζοντίως τοποθετημένες ράβδους (**Σχήμα 32**), γεγονός που αποδόθηκε στη συγκέντρωση νερού κάτω από τις ράβδους αυτές, λόγω της εξίδρωσης, αλλά και στην τελική κατανομή του νωπού σκυροδέματος (settlement). Σημειώνεται, επίσης, ότι η μείωση αυτή είναι μικρότερη για υψηλότερης αντοχής σκυροδέματα. Οι μειώσεις ήταν μεγαλύτερες για ράβδους κοντά ή άνω του ορίου (250 ή 300 mm από τη βάση του μέλους) μεταξύ περιοχών καλής και κακής συνάφειας, όπως ορίζεται από τους σχετικούς κανονισμούς [[EN 1992-1-1 \(2004\)](#), [ACI 318/ 318R \(2008\)](#)] και ήταν σχεδόν γραμμικές συναρτήσεις του υποκείμενου πάχους. Πάντως, αναφέρεται ότι έντονες μειώσεις συνάφειας παρατηρήθηκαν σε δύο περιοχές καθ' ύψος και, συγκεκριμένα σε ύψος μεταξύ 250 έως 400 mm και σε ύψος 1600 mm από τη βάση του μέλους. Οι μειώσεις της συνάφειας καθ' ύψος εντείνονται για μεγαλύτερες περιεκτικότητες νερού και, συνεπώς, λόγω νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), οι οποίοι οδηγούν κατά κανόνα σε αύξηση της κάθισης και μείωση της σταθερότητας του σκυροδέματος, όσο αφορά στην αντίσταση σε εξίδρωση, στην τελική κατανομή και στην πιθανή απόμιξη. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι τα μίγματα ΑΣΣ παρουσίασαν πολύ καλή συμπεριφορά σε συνάφεια, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ότι υψηλότερες τιμές καθίσεων στο ΑΣΣ δε συνδέονται με χαμηλότερη συνάφεια, όπως στο ΣΣ.



Σχήμα 32 Μέγιστη τάση συνάφειας συναρτήσει του υποκειμένου πάχους σκυροδέματος (α) πρωτογενή δεδομένα, (β) γενική τάση [πηγή: Söylev and François (2006)]

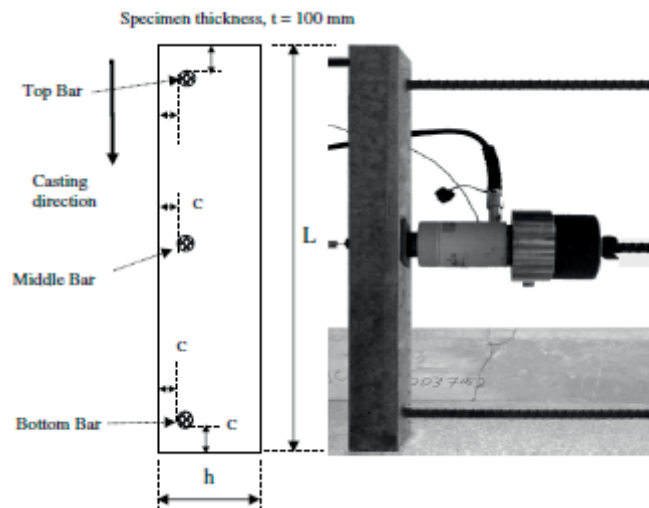


Σχήμα 33 Αντοχή σε συνάφεια συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής: σύγκριση δεδομένων από τη βιβλιογραφία [πηγή: Domone (2007)]

Ο Domone (2007), όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, πραγματοποίησε μία εκτενή ανασκόπηση άνω των εβδομήντα άρθρων που είχαν δημοσιευθεί μέχρι τη δημοσίευση της δικής του μελέτης σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ. Μεταξύ άλλων μεγεθών, ανέλυσε τα αποτελέσματα από πειράματα που σχετίζονται με τη συνάφεια σκυροδέματος και χάλυβα, συμπεραίνοντας ότι τα αποτελέσματα για το ΑΣΣ είναι όμοια ή υψηλότερα από το ΣΣ (Σχήμα 33). Συνολικά, σημείωσε ότι η γενική συμπεριφορά του ΑΣΣ είναι τουλάχιστον ίδια ή καλύτερη από το ΣΣ και ότι τυχόν νέες μελέτες θα πρέπει να επικεντρώσουν το ενδιαφέρον τους είτε σε πειράματα που να επιβεβαιώνουν παλαιότερα ευρήματα ή σε πειράματα πιο εξειδικευμένης θεματολογίας.

Οι Esfahani et al. (2008) πραγματοποίησαν δοκιμές εξόλκευσης σε συνολικά δώδεκα δοκίμια ΑΣΣ και ΣΣ (μία σύνθεση για κάθε τύπο σκυροδέματος). Τρεις εγκάρσια τοποθετημένες ράβδοι ήταν κατανομημένες καθ' ύψος των δοκιμίων (κάτω, μέση και άνω) και είχαν μικρά πάχη επικάλυψης (από 30 έως 60 mm) (Σχήμα 34). Σημειώνεται ότι τα μικρά πάχη επικάλυψης οδήγησαν, σε αντίθεση με την επιδιωκόμενη αστοχία λόγω εξόλκευσης, σε αστοχία λόγω διάρρηξης, για όλες τις ράβδους. Αντίθετα με τις κάτω ράβδους, στις οποίες οι τάσεις συνάφειας ήταν παρεμφερείς για τα δοκίμια ΑΣΣ και τα δοκίμια ΣΣ, παρατηρήθηκε ότι η τάση συνάφειας των άνω ράβδων ήταν κατά 20 % μικρότερη στα δοκίμια ΑΣΣ εν σχέσει προς τις ράβδους των δοκιμίων ΣΣ. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις

κανονιστικές προδιαγραφές [ACI 318/ 318R (2008)] και εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο διορθωτικός συντελεστής («συντελεστής θέσης»), που αφορά στις περιοχές κακής συνάφειας, θα έπρεπε να αυξηθεί για την περίπτωση του ΑΣΣ, αυξάνοντας έτσι και το απαιτούμενο μήκος συνάφειας. Συγκεκριμένα, προτάθηκε η επαύξηση του συντελεστή από 1.3 κατά έναν επιπλέον συντελεστή 1.3 (συνολικά:  $1.3 \times 1.3$ ). Το μη συμβατό με τις υπόλοιπες μελέτες συμπέρασμα, η επιδείνωση δηλαδή της συμπεριφοράς σε συνάφεια στο ΑΣΣ, τέθηκε υπό αμφισβήτηση από τους Valcuende et al. (2008), με το σκεπτικό ότι τα πάχη επικάλυψης ήταν εξαιρετικά μικρά. Όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, η διαπιστωμένα από προηγούμενες μελέτες δυσκαμψία στη συνάφεια του ΑΣΣ οδηγεί σε υψηλότερες ακτινικές τάσεις γύρω από τις ράβδους, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ταχύτερα τάσεις κοντά στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Απουσας της περισφίγξεως και δεδομένης της μικρής επικάλυψης το σκυρόδεμα αστοχεί σε διάρρηξη, οδηγώντας σε χαμηλότερες μέγιστες τάσεις συνάφειας. Ως εκ τούτου, θεωρούν ότι η πρόταση για διόρθωση του συντελεστή θέσης αφορά στις συγκεκριμένες συνθήκες και δεν μπορεί να εφαρμοστεί ενιαία σε όλες τις περιπτώσεις.



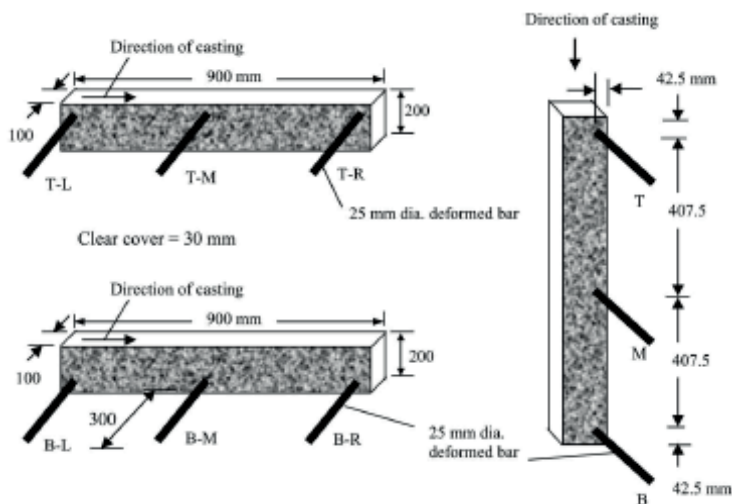
**Σχήμα 34** Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης σε χαμηλό υποστύλωμα για τη διερεύνηση του φαινομένου άνω οπλισμών [πηγή: Esfahani et al. (2008)]

Οι Almeida Filho et al. (2008a) ανέλυσαν και συνέκριναν την συμπεριφορά σε συνάφεια μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ μέσω πρότυπων δοκιμών εξόλκευσης (pull-out tests) και δοκού (beam tests). Οι παράμετροι που εξέτασαν περιελάμβαναν την επιρροή της θλιπτικής αντοχής, της διαμέτρου των ράβδων, τον τύπο σκυροδέματος και την ικανότητα των δοκιμών να εκτιμήσουν την αντοχή σε συνάφεια. Επιπλέον, εξετάστηκε η εγκυρότητα των κανονιστικών προδιαγραφών [CEB-FIP MC90 (1993)], αλλά και εμπειρικών σχέσεων [Huang (1996), Barbosa (2001)]. Η εν λόγω μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το ΑΣΣ παρουσιάζει παρόμοια ή, κατά περίπτωση, ελαφρώς βελτιωμένη συμπεριφορά σε συνάφεια εν σχέσει προς το ΣΣ. Η βελτίωση αποδόθηκε στη χρήση φίλερ στο ΑΣΣ, το οποίο θεωρήθηκε ότι βελτιώνει τη μεταβατική ζώνη μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε χαμηλή μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Η συμπεριφορά σε συνάφεια περιγράφεται ικανοποιητικά από τις εμπειρικές σχέσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία, ενώ αντίθετα, όπως και αναμενόταν, οι κανονιστικές προδιαγραφές ήταν εξαιρετικά συντηρητικές. Για μια γενική αποτίμηση της συνάφειας του ΑΣΣ και ύστερα από προσεκτική επιλογή των διαφόρων παραμέτρων (ενεργό μήκος

συνάφειας, επικάλυψη σκυροδέματος, διάμετρος ράβδων, κ.ά.), η δοκιμή εξόλκευσης κρίθηκε ως αποτελεσματική μέθοδος, σε αντίθεση με τη δοκιμή δοκού, η οποία, λόγω της δυσκολίας εφαρμογής της, προτείνεται να χρησιμοποιείται σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις. Οι ίδιες παράμετροι δοκιμών μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στο ΣΣ, όσο και στο ΑΣΣ.

Μεταξύ άλλων εξεταζόμενων παραμέτρων που εξέτασαν (θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας), οι Almeida Filho et al. (2008b) απέδειξαν πειραματικά ότι η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων για την αντοχή σε συνάφεια είναι χαμηλή, καθιστώντας το ΑΣΣ ένα αξιόπιστο τύπο σκυροδέματος για χρήση σε κατασκευές. Η χαμηλή ρευστότητα ορισμένων μιγμάτων δεν φάνηκε να επηρέασε την αντοχή σε συνάφεια, αν και παρατηρήθηκε αύξηση του πορώδους, γεγονός που σημειώθηκε ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε επιθετικά περιβάλλοντα για λόγους ανθεκτικότητας.

Η μελέτη των Hossain and Lachemi (2008) επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό της αντοχής σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα μέσω δοκιμών εξόλκευσης σε δοκίμια (Σχήμα 35) που παρασκευάστηκαν από δύο ΑΣΣ με ενσωμάτωση πρόσμικτων – συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών (ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνων), και από ΑΣΣ με χρήση πρόσμικτων τροποποιητικών ιξώδους. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από δοκίμια ΣΣ.



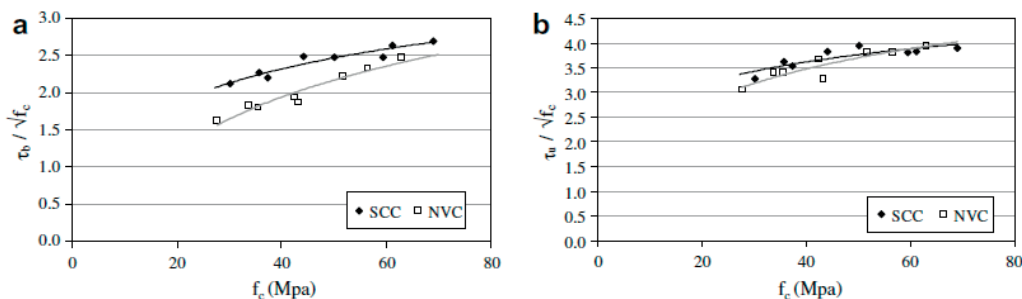
**Σχήμα 35** Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης σε χαμηλό υποστύλωμα για τη διερεύνηση της φοράς σκυροδέτησης και του φαινομένου άνω σπλισμών [πηγή: Hossain and Lachemi (2008)]

Παρατηρήθηκε ότι η απώλεια συνάφειας λόγω του φαινομένου της εξίδρωσης και λόγω της εξ ορισμού ανομοιογενούς φύσης του υλικού ήταν μικρότερη στην περίπτωση του ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, γεγονός που θα μπορούσε να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό μελών ωπλισμένου σκυροδέματος από ΑΣΣ. Το φαινόμενο άνω ράβδων, αν και υπαρκτό, ήταν λιγότερο έντονο στα δοκίμια ΑΣΣ εν σχέσει προς τα αντίστοιχα δοκίμια ΣΣ, γεγονός που αποδόθηκε στην πιο ομοιογενή φύση και την ιδιαίτερα αναβαθμισμένη ικανότητα πλήρωσης του ΑΣΣ. Ειδικότερα, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι το φαινόμενο άνω ράβδων αναμένεται να είναι εν γένει λιγότερο έντονο στο ΑΣΣ, λόγω της βελτιωμένης πλαστικής σταθερότητας των μιγμάτων ΑΣΣ, της περιορισμένης δηλαδή καθίζησης των αδρανών κατά την πήξη, που στην περίπτωση του ΣΣ οφείλεται στο συνδυασμό μεγάλου υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος και μειωμένης συνεκτικότητας του μίγματος. Η

συμπεριφορά σε συνάφεια, όπως προέκυψε από τις πειραματικές καταγραφές, συγκρίθηκε με τις προδιαγραφές διάφορων κανονισμών και άλλων εμπειρικών σχέσεων και παρατηρήθηκε ότι μια απλοποιημένη μορφή των σχέσεων του κανονισμού αρκεί για την πρόβλεψη της αντοχής σε συνάφεια. Αντίθετα, τα εμπειρικά μοντέλα φαίνεται να υπερεκτιμούν την τάση συνάφειας, τόσο στο ΑΣΣ όσο και στο ΣΣ.

Στην μελέτη των [Foroughi et al. \(2008\)](#), μελετήθηκε η συνάφεια σκυροδέματος και χάλυβα σε κυβικά δοκίμια ΑΣΣ, στα οποία δεν εφαρμόστηκε μηχανική συμπίκνωση, σε διάφορες ηλικίες (3, 7, 28 και 56 ημέρες). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη συνάφεια σε δοκίμια ΣΣ, τα οποία συμπυκνώθηκαν σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική (στη μελέτη δεν αναφέρονται περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο συμπίκνωσης). Τα δοκίμια ΑΣΣ παρουσίασαν μεγαλύτερη συνάφεια από τα δοκίμια ΣΣ, ενώ η σχέση μεταξύ αντοχής συνάφειας και θλιπτικής αντοχής ήταν πιο σταθερή στην περίπτωση του ΣΣ. Ειδικότερα, η ανηγμένη τιμή της αντοχής συνάφειας στην τετραγωνική ρίζα της θλιπτικής αντοχής ήταν πιο σταθερή συναρτήσει της ηλικίας στο ΣΣ εν σχέσει προς την αντίστοιχη τιμή στο ΑΣΣ.

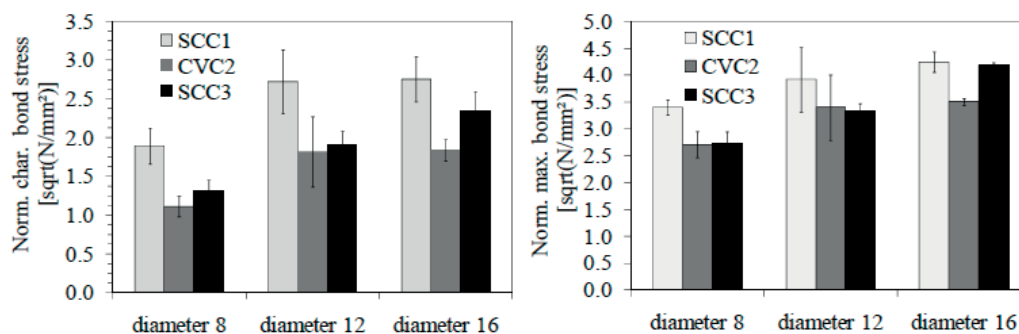
Οι [Valcuende and Parra \(2009\)](#) διερεύνησαν πειραματικά την αντοχή σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα και το φαινόμενο άνω ράβδων σε τέσσερα μίγματα ΑΣΣ, τα οποία συνέκριναν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τέσσερα μίγματα ΣΣ. Για την εκτέλεση των δοκιμών παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 200 mm και υποστυλώματα ύψους 1500 mm. Παρατηρήθηκε ότι η δυσκαμψία (stiffness) της καμπύλης τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης ήταν μεγαλύτερη στο ΑΣΣ, γεγονός που οδήγησε σε μεγαλύτερες μέσες τάσεις συνάφειας (**Σχήμα 36**).



**Σχήμα 36** Ανηγμένη (α) μέση και (β) μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [πηγή: [Valcuende and Parra \(2009\)](#)]

Οι μέγιστες τάσεις συνάφειας ήταν επίσης μεγαλύτερες, αν και η διαφορά μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ ήταν μικρότερη, ειδικά για θλιπτικές αντοχές μεγαλύτερες από 50  $\text{N/mm}^2$ . Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στο ότι η επιτευχθείσα μείωση της εξίδρωσης στο ΑΣΣ δεν επηρεάζει σημαντικά την αστοχία. Από τους συγγραφείς προτείνεται η διερεύνηση μιας πιθανής μείωσης στο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης των οπλισμών, ειδικά για μίγματα ΑΣΣ τύπου σκόνης υψηλού ιξώδους. Όσο αφορά στο φαινόμενο των άνω ράβδων, αυτό περιορίζεται για την περίπτωση του ΑΣΣ, γεγονός που οδηγεί στη δυνατότητα μείωσης του διορθωτικού συντελεστή που επιβάλλεται από τον αμερικάνικο κατασκευαστικό κανονισμό [[ACI 318/ 318R \(2008\)](#)] και ο οποίος λαμβάνει υπόψη την απώλεια συνάφειας καθ' ύψος, από 1.4 σε 1.25 (μείωση περίπου 10 %). Επιπλέον, στα υψηλά στοιχεία το ΑΣΣ συμπεριφέρεται πιο ομοιογενώς από το ΣΣ.

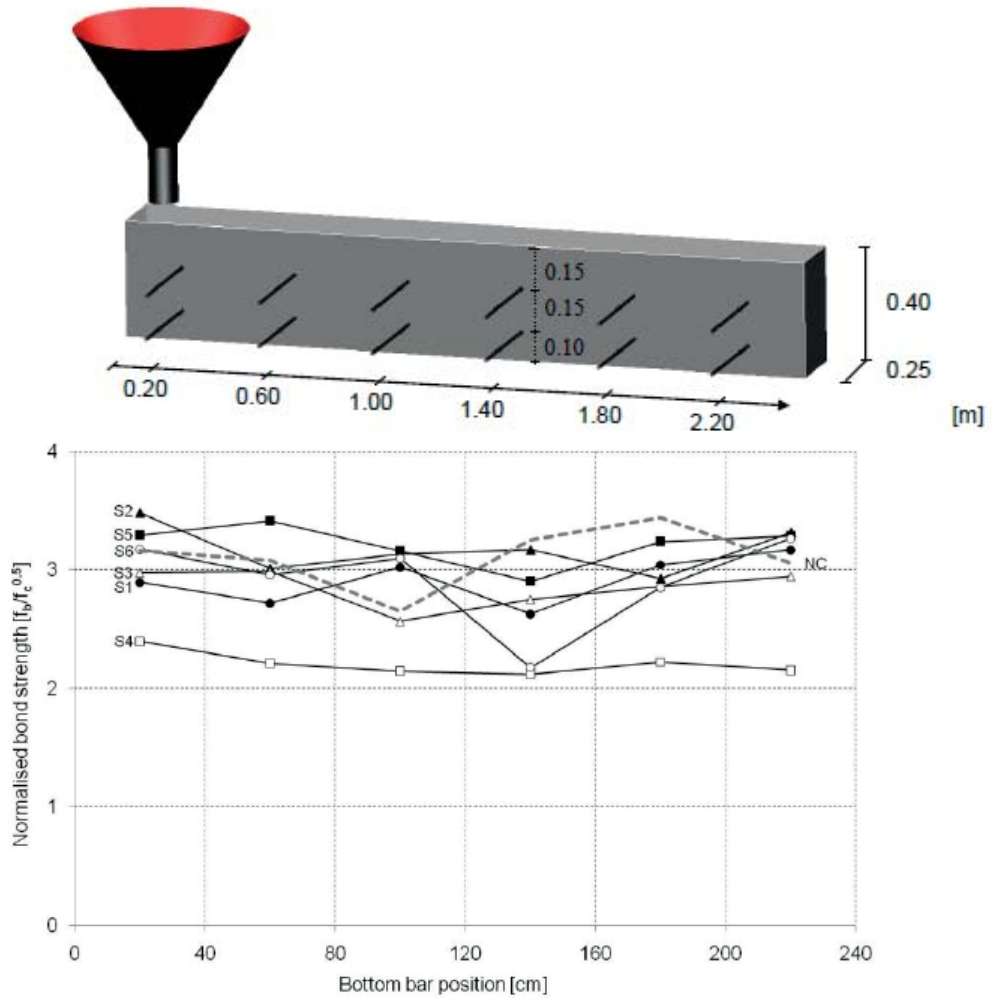
Οι Boel et al. (2010), σε εισήγησή τους στο 6<sup>ο</sup> Συνέδριο ΑΣΣ στο Μόντρεαλ του Καναδά, διερεύνησαν, μεταξύ άλλων, τους μηχανισμούς συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, συγκριτικά μεταξύ του ΑΣΣ και του ΣΣ. Παρατηρήθηκε ότι για μίγματα ίδιας θλιπτικής αντοχής, η μέγιστη τάση συνάφειας για το ΑΣΣ είναι ίση ή μεγαλύτερη εν σχέσει προς την αντίστοιχη τάση συνάφειας για το ΣΣ (Σχήμα 37). Τόσο η μέση όσο και η μέγιστη τάση συνάφειας αυξάνονται με την αύξηση της διαμέτρου των ράβδων (από 8 έως 16 mm).



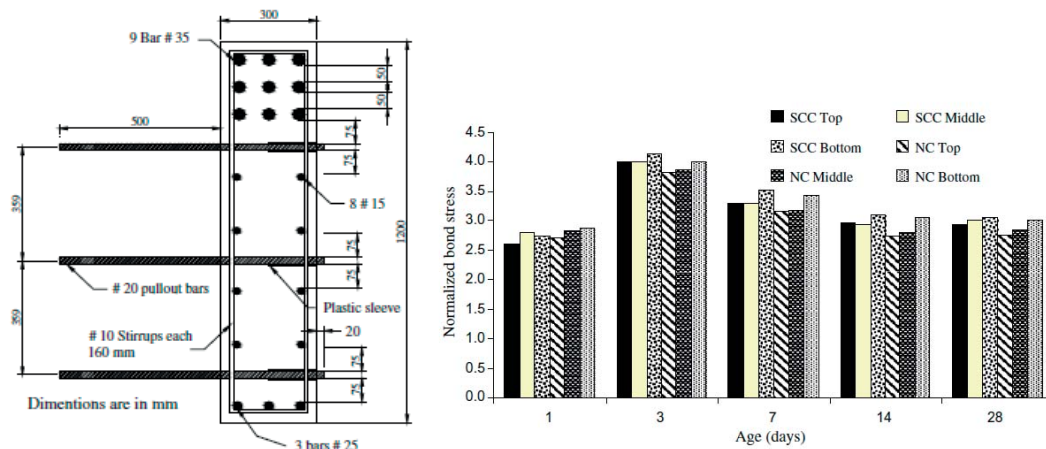
Σχήμα 37 Ανηγγενη (α) μέση και (β) μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με τον τύπο του σκυροδέματος και τη διάμετρο της ράβδου οπλισμού [πηγή: Boel et al. (2010)]

Στο ίδιο Συνέδριο, οι Thrane et al. (2010), μελέτησαν την επιρροή των ρεολογικών παραμέτρων (τάση διαρροής, πλαστικό ιξώδες) μιγμάτων ΑΣΣ στον επαρκή εγκιβωτισμό των ράβδων και τη συνεπακόλουθη επιρροή στη συνάφειά τους με το σκυρόδεμα, σε δοκίμια μεγάλου μήκους (2500 mm) με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο (Σχήμα 38). Οι δοκιμές εξόλκευσης πραγματοποιήθηκαν σε μικρή ηλικία (7 ημέρες) και προέκυψε ότι η αντοχή σε συνάφεια των ράβδων για την περίπτωση του ΑΣΣ αφενός δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις ρεολογικές του ιδιότητες, ενώ αφετέρου προσομοιάζει την αντίστοιχη αντοχή των ράβδων για την περίπτωση του ΣΣ.

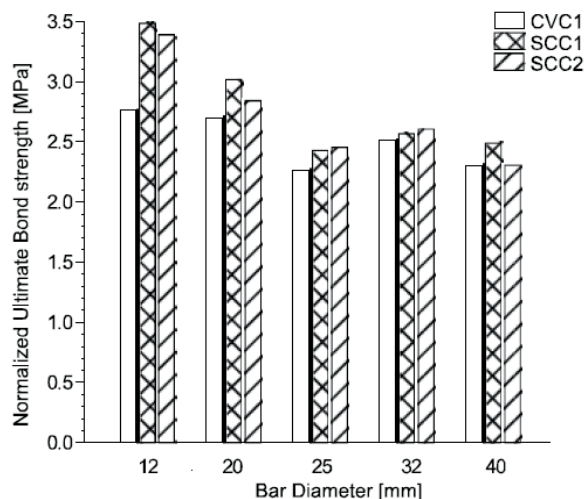
Οι Hassan et al. (2010) μελέτησαν την αντοχή σε συνάφεια μέσω δοκιμών εξόλκευσης ράβδων εγκιβωτισμένων σε πλήρους κλίμακας υψηλά οπλισμένων μελών σκυροδέματος, κατασκευασμένων με βιομηχανικό ΑΣΣ και συνέκριναν τα αποτελέσματα με όμοια μέλη από ΣΣ. Οι τύποι ήταν διαφανείς, ώστε να αξιολογείται η ροή του νωπού μίγματος σε πραγματικό χρόνο, κατά τη σκυροδέτηση. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν στην τάση συνάφειας και την ολίσθηση των ράβδων, το φαινόμενο άνω ράβδων (μέσω δοκιμής ράβδων κατανεμημένων καθ' ύψος των μελών και, συγκεκριμένα σε ύψη 150, 500 και 870 mm από τη βάση) και την επιρροή της ηλικίας (δοκιμές σε ηλικίες 1, 3, 7, 14 και 28 ημερών). Οι τάσεις συνάφειας που υπολογίστηκαν συγκρίθηκαν με σημαντικούς κανονισμούς [ACI 318/318R (2008), CSA A23.3 (2004)], οι οποίοι φάνηκε να υποεκτιμούν σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές τάσεις συνάφειας, γεγονός που αποδόθηκε στον μη συνυπολογισμό της περίσφιγξης από τους κανονισμούς.



**Σχήμα 38** (α) Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης σε οριζόντιο δοκίμιο με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο και (β) μεταβολή ανηγμένης τάσης συνάφειας κατά μήκος του δοκιμίου για τα διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ [πηγή: [Thrane et al. \(2010\)](#)]



**Σχήμα 39** (α) Πειραματική διάταξη δοκιμών εξόλκευσης και (β) μεταβολή ανηγμένης τάσης συνάφειας συναρτήσει της ηλικίας και της θέσης του σπλισμού καθ' ύψος για τα διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ [πηγή: [Hassan et al. \(2010\)](#)]



**Σχήμα 40** Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας για διάφορες διαμέτρους ράβδων οπλισμού και για διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ [πηγή: [Desnerck et al. \(2010a\)](#)]

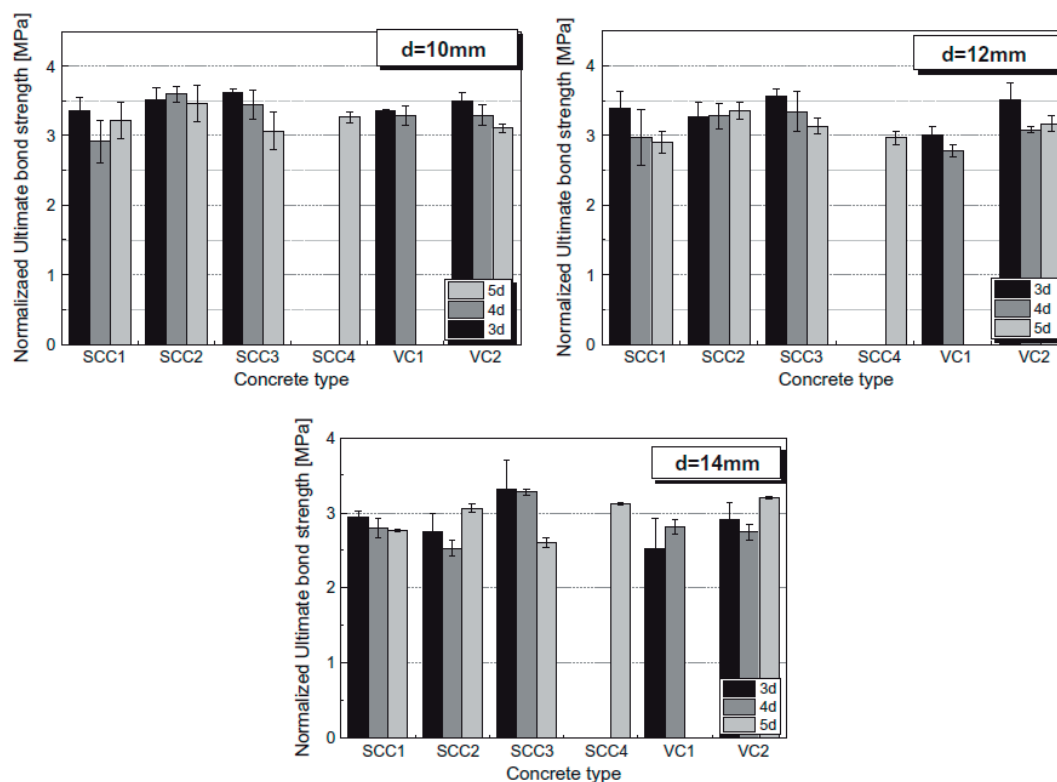
Η επιρροή της σύνθεσης του σκυροδέματος (δύο ΑΣΣ τύπου σκόνης και ένα ΣΣ για λόγους σύγκρισης), αλλά και της διαμέτρου των ράβδων (από 12 έως 40 mm), στη συνάφεια μελετήθηκε μέσω δοκιμών δοκού από τους [Desnerck et al. \(2010a\)](#) και [Desnerck et al. \(2010b\)](#). Για μικρές διαμέτρους ράβδων η αντοχή σε συνάφεια των ΑΣΣ υπερέχει εν σχέσει προς το ΣΣ, διαφορά πάντως που αποκλιμακώνεται σημαντικά για μεγαλύτερες διαμέτρους (**Σχήμα 40**). Η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας αυξάνεται για μεγαλύτερες διαμέτρους ράβδων. Για τον ίδιο λόγο  $w/c$ , το ΑΣΣ παρουσιάζει υψηλότερη θλιπτική αντοχή, μέση και μέγιστη τάση συνάφειας εν σχέσει προς το ΣΣ, γεγονός που αποδίδεται στην ενσωμάτωση του φίλερ. Για τα σκυροδέματα υψηλών αντοχών ( $\geq 60 \text{ N/mm}^2$ ), οι συγγραφείς προτείνουν τη μείωση του πρότυπου ενεργού μήκους συνάφειας από  $10 \text{ } \varnothing$  σε  $5 \text{ } \varnothing$ , καθώς το υψηλό μήκος συνάφειας οδηγεί συχνά σε διαρροή ή αστοχία των ράβδων οπλισμού, αντί της επιδιωκόμενης αστοχίας σε εξόλκευση ράβδου. Η σύγκριση των διαγραμμάτων τάσεων συνάφειας συναρτήσεως των ολισθήσεων με τα μοντέλα συνάφειας [[CEB-FIP MC90 \(1993\)](#), [Huang et al. \(1996\)](#)] έδειξε ότι τα μοντέλα αυτά δεν περιγράφουν σωστά την πραγματική συμπεριφορά σε συνάφεια. Αντίστοιχα, τα μοντέλα που σχετίζονται με την εκτίμηση της μέγιστης τάσης συνάφειας [[Orangun et al. \(1977\)](#), [Harajli \(1994\)](#), [Oh et al. \(2007\)](#), [Huang et al. \(1996\)](#), [CEB-FIP MC90 \(1993\)](#)] φαίνεται να υποεκτιμούν την πραγματική τιμή τόσο των ΑΣΣ, όσο και των ΣΣ, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη κατάρτισης νέων μοντέλων, ένα εκ των οποίων προτάθηκε στο πλαίσιο της μελέτης.

Οι [Aslani and Nejadi \(2012a\)](#) πραγματοποίησαν μια εκτενή ανασκόπηση πειραματικών αποτελεσμάτων δοκιμών εξόλκευσης και δοκού από συνολικά οκτώ προγενέστερες πειραματικές μελέτες [[Zhu et al. \(2004\)](#), [Castel et al. \(2006\)](#), [Almeida Fihlo et al. \(2008a\)](#), [Hossain and Lachemi \(2008\)](#), [Lachemi et al. \(2009\)](#), [Valcuende and Parra \(2009\)](#), [Hassan et al. \(2010\)](#), [Desnerck et al. \(2010\)](#)]. Παρατήρησαν ότι η μεταβολή στη σύνθεση του ΑΣΣ μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στα μηχανικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Έλεγξαν την εγκυρότητα των κανονιστικών προδιαγραφών [[CEB-FIP \(1999\)](#)], καθώς και εμπειρικών σχέσεων, που αφορούν σε μοντέλα ανάπτυξης της αντοχής σε συνάφεια σε συνάρτηση με την ολίσθηση [[Barbosa \(2001\)](#), [Huang et al. \(1996\)](#), [Harajli \(1995\)](#)], ενώ πρότειναν ένα νέο εμπειρικό μοντέλο. Συνέκριναν την εγκυρότητα των παραπάνω μοντέλων μεταξύ



ΑΣΣ και ΣΣ. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν περιελάμβαναν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, τη διάμετρο των ράβδων, τον τύπο σκυροδέματος, τη μέθοδο συντήρησης, καθώς και τη θέση καθ' ύψος των υπό έλεγχο ράβδων, με σκοπό τη διερεύνηση του φαινομένου άνω ράβδων. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη και η μέση τάση συνάφειας είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση του ΑΣΣ, ενώ μεγαλύτερη είναι και η τοπική τάση συνάφειας σε υψηλότερες θέσεις καθ' ύψος (άνω ράβδοι). Μεγαλύτερες διαμέτροι ράβδων οδηγούν σε εγγύτερες τιμές συνάφειας μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ και μεγαλύτερες ολισθήσεις, ενώ για μικρότερης διαμέτρου ράβδους η διαφορά των τάσεων συνάφειας αυξάνεται υπέρ του ΑΣΣ. Οι ίδιες δοκιμές και τα ίδια μοντέλα των κανονισμών μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στο ΣΣ, όσο και στο ΑΣΣ. Τα περισσότερα μοντέλα για τη συνάφεια, ενώ περιγράφουν ικανοποιητικά την ανάπτυξη της συνάφειας (συνάφεια συναρτήσει της ολίσθησης) υποεκτιμούν την πειραματικώς αναπτυχθείσα μέγιστη συνάφεια, ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος, και, για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς πρότειναν ένα νέο εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της αντοχής σε συνάφεια.

Στο άρθρο των [Pop et al. \(2013\)](#) πραγματοποιήθηκαν 135 δοκιμές εξόλκευσης σε κυβικά δοκίμια, παρασκευασθέντα από τέσσερα ΑΣΣ τύπου σκόνης και δύο ΣΣ, με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν περιελάμβαναν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, τη διάμετρο των ράβδων, το μήκος συνάφειας και τον λόγο τσιμέντου προς ασβεστολιθικό φίλερ. Από την αξιολόγηση των δεδομένων προέκυψε ότι η μέγιστη τάση συνάφειας μπορεί να είναι μεγαλύτερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ για αντοχές έως  $50 \text{ N/mm}^2$ , διαφορά η οποία πάντως εξαλείφεται για αντοχές  $70 \text{ N/mm}^2$ . Για το ίδιο επίπεδο φόρτισης οι ράβδοι στο ΑΣΣ αναπτύσσουν μικρότερες ολισθήσεις από τις ράβδους στο ΣΣ, γεγονός που συνάγεται από την παρατήρηση ότι για πολύ μικρές ολισθήσεις, της τάξεως των  $0.01 \text{ mm}$ , η τάση συνάφειας είναι μεγαλύτερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ. Τόσο η διάμετρος των ράβδων, όσο και το μήκος συνάφειας φαίνεται να επηρεάζουν κατά τον ίδιο τρόπο τη συμπεριφορά σε συνάφεια, ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος, ΑΣΣ ή ΣΣ. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τάση συνάφειας μειώνεται για μεγαλύτερα μήκη συνάφειας και μεγαλύτερες διαμέτρους ράβδων και για τους δύο τύπους σκυροδέματος, αν και σημειώνεται ότι η μείωση της τάσης συνάφειας είναι ελαφρώς μικρότερη και συσχετίζεται περισσότερο γραμμικά με την αύξηση της διαμέτρου των ράβδων στο ΑΣΣ (**Σχήμα 41**). Ομοίως, η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας μειώνεται για μεγαλύτερες διαμέτρους ράβδων ελάχιστα λιγότερο στην περίπτωση του ΑΣΣ, αν και οι διαφορές με το ΣΣ είναι πρακτικώς ασήμαντες. Τέλος, ενώ ο λόγος τσιμέντου προς ασβεστολιθικό φίλερ επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική και την εφελκυστική αντοχή και, ως εκ τούτων, και την αντοχή σε συνάφεια, η κανονικοποιημένη αντοχή σε συνάφεια δε φαίνεται να επηρεάζεται.



**Σχήμα 41** Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας για διάφορες διαμέτρους ράβδων οπλισμού, ενεργά μήκη συνάφειας και για διάφορα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ [πηγή: Pop et al. (2013)]

Οι [Helincks et al. \(2013\)](#) εκπόνησαν ένα ευρύ πειραματικό πρόγραμμα, με σκοπό τη διερεύνηση, μεταξύ άλλων, της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα σε δοκίμια ΑΣΣ. Συνολικά, πραγματοποίησαν δοκιμές εξόλκευσης σε εβδομήντα δύο δοκίμια, παρασκευασμένα από διαφορετικά μίγματα σκυροδέματος και με διαφορετικές διαμέτρους ράβδων (8, 12, 16 και 20 mm). Παρατήρησαν ότι η κανονικοποιημένη στη θλιπτική αντοχή τάση συνάφειας στο ΑΣΣ είναι τουλάχιστον ίση ή υψηλότερη εν σχέσει προς το ΣΣ. Η αύξηση της κανονικοποιημένης μέσης τάσης συνάφειας έφτασε το 68 %, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για τη μέγιστη τάση συνάφειας το 39 %. Από το εύρος των εξεταζόμενων διαμέτρων των ράβδων, μεγαλύτερες αντοχές σε συνάφεια αναπτύχθηκαν στις μεσαίες διαμέτρους, 12 και 16 mm. Τέλος, συγκρίνοντας τη συμπεριφορά σε συνάφεια με τις κανονιστικές διατάξεις [[CEB-FIP MC2010 \(2010\)](#), [ACI 318/ 318R \(2008\)](#)] παρατηρήθηκε ότι οι τελευταίες (για συντελεστή ασφαλείας ίσο με τη μονάδα) υποεκτιμούν σημαντικά την πειραματική συμπεριφορά (ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο MC2010 εκτιμά τιμές συνάφειας μεταξύ 0.18 και 0.36 των πειραματικών).

### 1.3.1.5. Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Όπως είναι γνωστό, το ΑΣΣ τυγχάνει εφαρμογής σε σημαντικά έργα υποδομής, όπως σήραγγες, κατασκευές ανοιχτής θαλάσσης, καταστρώματα γεφυρών, βάσεις από σκυρόδεμα, τα οποία χαρακτηρίζονται από αυξημένη πιθανότητα τυχρηματικών δράσεων, μεταξύ των οποίων και οι υψηλές θερμοκρασίες, σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [[RILEM Report 38 \(2007\)](#), [EFNARC \(2005\)](#)], η ικανότητα αντίστασης του σκυροδέματος στην τυχρηματική δράση της πυρκαγιάς εξαρτάται σημαντικά από τη μικροδομή, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τον

τύπο τσιμεντοειδών υλικών του μίγματος, όπως η πυριτική παιπάλη, η ιπτάμενη τέφρα, ο μετακαολίνης, κ.ά. Ως εκ τούτου, η διαφορετική σύνθεση του ΑΣΣ αναμένεται να μεταβάλλει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι υψηλών θερμοκρασιών εν σχέσει προς την αντίστοιχη συμπεριφορά του ΣΣ. Συγκεκριμένα, η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος για καταπόνηση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις εσωτερικές ιδιότητες του υλικού. Πάντως, υπάρχουν αναφορές ότι αυτό δε συμβαίνει πάντα και ότι η πυραντοχή του ΑΣΣ θα μπορούσε, υπό συνθήκες που σχετίζονται με την αντοχή και τη διαπερατότητα, να θεωρηθεί παρόμοια με του ΣΣ [EFNARC (2005)]. Ως εκ τούτου, η απόκριση του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες θα πρέπει να εξετάζεται για τη σωστή αποτίμηση της επιρροής στις διάφορες ιδιότητες.

Οι περισσότερες μελέτες επί του θέματος των υψηλών θερμοκρασιών επικεντρώνονται στην επίδρασή τους στα μηχανικά χαρακτηριστικά και, ειδικότερα, στη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή. Πιο περιορισμένο είναι το πλήθος των διαθέσιμων ερευνητικών εργασιών σχετικά με την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών σε ιδιότητες που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα. Όπως έχει αναφερθεί [RILEM Report 38 (2007)], η απομένουσα αντοχή μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες (800 °C) είναι γενικώς μικρότερη εν σχέσει προς το ΣΣ, ειδικά για μίγματα ΑΣΣ με ενσωματωμένο ασβεστολιθικό φίλερ, φαινόμενο που αποδίδεται στην αποδόμηση του φίλερ σε θερμοκρασίες άνω των 750 °C. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η πιθανότητα εκρηκτικής αποφλοιώσης στο ΑΣΣ είναι αυξημένη [RILEM Report 38 (2007), EFNARC (2005), Anagnostopoulos et al. (2009)], ειδικά για μεγαλύτερα επίπεδα υγρασίας, καθώς η πυκνή μικροδομή του ΑΣΣ καθυστερεί σημαντικά την ξήρανση, με αποτέλεσμα το νερό που βρίσκεται στους πόρους να εξατμίζεται, αλλά και, ελλείψει ικανών διόδων διαφυγής, να διαστέλλεται και να οδηγεί σε εκρηκτικά φαινόμενα. Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και, κατά περίπτωση, να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα προστασίας (προστατευτική μόνωση σκυροδέματος, ίνες πολυπροπυλενίου στη σύνθεση, κ.λπ.). Η θετική δράση των ινών πολυπροπυλενίου στον περιορισμό του φαινομένου εκρηκτικών αποφλοιώσεων έχει αναδειχθεί σε πρόσφατες μελέτες [Uysal (2012), Sideris and Manita (2013)], αν και σημειώνεται ότι συνοδεύεται από μεγαλύτερες απώλειες στα μηχανικά χαρακτηριστικά (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή) και, συνεπώς, προτείνεται [Sideris and Manita (2013)] να συνδυάζεται και με άλλα μέτρα προστασίας (π.χ. προστατευτική μόνωση σκυροδέματος).

Ο Persson (2004) μελέτησε την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στην θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ. Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις λόγοι νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), 0.40, 0.55 και 0.70, ενώ ενσωματώθηκε και ασβεστολιθικό φίλερ. Η σύγκριση της επίδρασης υψηλών θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκε με μίγματα ΣΣ ίδιου λόγου  $w/b$ . Στα μίγματα ΑΣΣ παρατηρήθηκε εκτεταμένη εκρηκτική συμπεριφορά, φαινόμενο που περιορίστηκε αποτελεσματικά μέσω ενσωμάτωσης ινών πολυπροπυλενίου στο μίγμα. Η εκρηκτική αποφλοιώση παρατηρήθηκε ότι επηρεάζεται από τη θερμική καταπόνηση, τον λόγο τσιμέντου προς σκόνη ( $c/p$ ) και τον λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ). Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν εμφανίστηκαν φαινόμενα εκρηκτικής αποφλοιώσης, η συμπεριφορά μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ ήταν αρκετά παρόμοια. Συγκεκριμένα, η αντοχή του ΑΣΣ μειώνεται περίπου όπως στο ΣΣ, αλλά σε υψηλότερες θερμοκρασίες η μείωση αυτή είναι μικρότερη εν σχέσει προς το υψηλής αντοχής ΣΣ.

Δύο χρόνια αργότερα, οι [Reinhardt and Stegmaier \(2006\)](#) διερεύνησαν την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών σε μίγματα ΑΣΣ με διάφορες συνθέσεις και αντοχές μεταξύ 25 και 65 N/mm<sup>2</sup>. Παρατηρήθηκε ότι τα μίγματα ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν με χρήση πρόσμικτων (ιπτάμενη τέφρα, ασβεστολιθικό φίλερ ή συνδυασμός τους) παρουσίασαν εκρηκτική συμπεριφορά από την έναρξη της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες με μέσο βάθος αποφλοιώσης τα 20 mm, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μίγματα τα οποία παρουσίασαν μόνο έντονες ρηγματώσεις. Οι εκρηκτικές αποφλοιώσεις οδήγησαν σε απώλεια μάζας των δοκιμίων σε ποσοστά μεταξύ 40 και 55 %. Η απομένουσα θλιπτική αντοχή με επιτευχθείσα θερμοκρασία σκυροδέματος στον πυρήνα περίπου 750 °C κυμάνθηκε μεταξύ 68 και 74 % της αρχικής. Παρατηρήθηκε ότι η απομένουσα αντοχή συνδέεται με το τριχοειδές πορώδες, υπό την έννοια ότι υψηλές τιμές του πορώδους συνεπάγονται υψηλότερες απομένουσες θλιπτικές αντοχές μετά την θερμική καταπόνηση. Σημειώνεται ότι οι διαφορές μεταξύ ΑΣΣ και μίγματος αναφοράς ΣΣ, όσο αφορά το φαινόμενο εκρηκτικής αποφλοιώσης και την απομένουσα θλιπτική αντοχή, ήταν πρακτικώς ασήμαντες.

Ο [Sideris \(2007\)](#) πραγματοποίησε πειραματική μελέτη επί των μηχανικών χαρακτηριστικών τεσσάρων μιγμάτων ΑΣΣ και τεσσάρων μιγμάτων ΣΣ, κατόπιν έκθεσης σε θερμοκρασίες από 100 έως 700 °C. Μελετήθηκε η επιρροή της υψηλής θερμοκρασίας στην θλιπτική αντοχή, την έμμεση εφελκυστική αντοχή (σε διάρρηξη) και την ταχύτητα των υπερήχων. Παρατηρήθηκε ότι οι απώλειες στην αντοχή μετά από την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες ήταν σχεδόν παρόμοιες μεταξύ των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ, αν και για μίγματα ίδιας κατηγορίας αντοχής η απομένουσα θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ ήταν υψηλότερη εν σχέση με του ΣΣ. Η επίδραση της θερμοκρασίας ήταν γενικά πιο βλαβερή στην εφελκυστική αντοχή. Σε θερμοκρασίες άνω των 380 °C παρατηρήθηκαν φαινόμενα εκρηκτικής αποφλοιώσης στα μίγματα υψηλότερων αντοχών (C 50/60), ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος, ΑΣΣ ή ΣΣ. Για μικρότερες αντοχές (C 30/37) η εκρηκτική αποφλοιώση παρατηρήθηκε σε ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες, μεταξύ 500 και 580 °C, ενώ για ακόμη χαμηλότερες αντοχές δεν παρατηρήθηκαν αντίστοιχα φαινόμενα για θερμοκρασίες έως 700 °C.

Οι [Anagnostopoulos et al. \(2009\)](#) μελέτησαν συγκριτικά την επιρροή υψηλών θερμοκρασιών έως 600 °C στις ιδιότητες έξι μιγμάτων ΑΣΣ με ενσωμάτωση διαφόρων τύπων πρόσμικτων (σκωρία κάδων χαλυβουργίας, πληρωτικό γυαλιού, ασβεστολιθικό φίλερ) και δύο μιγμάτων ΣΣ. Τα μεγέθη που μετρήθηκαν περιελάμβαναν την θλιπτική και την εφελκυστική αντοχή, την τριχοειδή απορρόφηση και την ταχύτητα των υπερήχων. Στα περισσότερα δοκίμια υψηλότερης αντοχής παρατηρήθηκαν φαινόμενα εκρηκτικών αποφλοιώσεων, ειδικά για θερμοκρασίες κοντά στους 600 °C. Σημειώνεται ότι ειδικά για την κατηγορία αντοχής C 30/37, η τάση για εκρηκτική αποφλοιώση ήταν αυξημένη, ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος ή του χρησιμοποιούμενου πρόσμικτου.

Στην μελέτη των [Fares et al. \(2009\)](#) διερευνήθηκε η συμπεριφορά του ΑΣΣ που υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες έως 600 °C ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες της μικροδομής. Συγκεκριμένα, δύο μίγματα ΑΣΣ και ένα μίγμα ΣΣ ελέγχθηκαν πριν και μετά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες ως προς τη θλιπτική και την καμπτική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, το πορώδες και τη διαπερατότητα. Κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν φαινόμενα εκρηκτικής αποφλοιώσης στο ΑΣΣ, ακόμα και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (315 °C). Τα μηχανικά χαρακτηριστικά όλων των σκυροδεμάτων παρουσίασαν σημαντικές

απομειώσεις, ειδικά για μεγαλύτερες θερμοκρασίες έκθεσης. Παρατηρήθηκε ότι για χαμηλές θερμοκρασίες έκθεσης (από 20 έως 150 °C) το ελεύθερο νερό εξατμίζεται και οι πόροι διαστέλλονται, οδηγώντας σε αύξηση της διαπερατότητας και μικρή μείωση της αντοχής. Μεταξύ 150 και 300 °C παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ, φαινόμενο πάντως που δεν παρατηρήθηκε στα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά. Τέλος, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300 °C όλες οι ιδιότητες επιδεινώθηκαν με ταχείς ρυθμούς.

Ένα χρόνο αργότερα και σε συνέχεια της προηγούμενης δημοσίευσης, οι [Fares et al. \(2010\)](#) παρουσίασαν τα αποτελέσματα θερμοβαρυμετρικών και θερμοδιαφορικών αναλύσεων, διάθλασης ακτίνων X και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για τα ίδια μίγματα ΑΣΣ. Πέραν της διερεύνησης της γενικότερης συμπεριφοράς της μικροδομής υπό υψηλές θερμοκρασίες, ο σκοπός των αναλύσεων αυτών ήταν η αιτιολόγηση της αύξησης της θλιπτικής αντοχής που είχε παρατηρηθεί στο ΑΣΣ μεταξύ 150 και 300 °C. Για χαμηλές θερμοκρασίες έκθεσης (από 20 έως 150 °C) δεν παρατηρήθηκαν ουσιαστικές μεταβολές στη μικροδομή, παρά μόνον μια μικρή μεταβολή του πορώδους λόγω της εξάτμισης του ελεύθερου νερού και μέρος του χημικώς δεσμευμένου νερού των κρυστάλλων CHS. Οι πρώτες ρωγμές παρατηρήθηκαν στην πάστα, μεταξύ 150 και 300 °C, με συνέπεια την αύξηση του πορώδους. Οι μετακινήσεις υγρασίας εντός των ρωγμών αυτών οδήγησε σε μία συμπληρωματική ενυδάτωση μη ενυδατωμένων κόκκων τσιμέντου, γεγονός που θα μπορούσε να εξηγήσει την αύξηση της αντοχής στο εν λόγω διάστημα θερμοκρασιών. Τέλος, για θερμοκρασίες άνω των 300 °C, η φθορά της μικροδομής ήταν ταχεία και οδήγησε σε αύξηση του πορώδους έως 7 %.

Οι [Bamonte and Gambarova \(2012\)](#) μελέτησαν αρχικά την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών σε τρία μίγματα ΑΣΣ, παρασκευασμένων με ασβεστολιθικό φίλερ, με στοχευόμενες αντοχές 50, 80 και 95 N/mm<sup>2</sup>. Κατόπιν δοκιμών θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής των θερμικώς καταπονημένων μιγμάτων, συνέκριναν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων ερευνητών [[Persson \(2004\)](#), [Sideris \(2007\)](#), [Reinhardt and Stegmaier \(2006\)](#), [Noumowé et al. \(2006\)](#), [Fares et al. \(2009\)](#)] και συμπέραναν ότι η θερμική και μηχανική συμπεριφορά του ΑΣΣ είναι παρεμφερής με την αντίστοιχη συμπεριφορά του ΣΣ, αν και η πυκνότερη μικροδομή (λεπτότεροι και ασυνεχείς πόροι) του ΑΣΣ, το καθιστούν περισσότερο ευαίσθητο στις υψηλές θερμοκρασίες εν σχέσει προς το ΣΣ. Σημειώθηκε, πάντως, η συχνή ασυμβατότητα μεταξύ των διαφορετικών μελετών, λόγω των διαφορετικών ρυθμών θερμικής καταπόνησης, του τύπου των δοκιμών και των διαδικασιών ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Σε πρόσφατη μελέτη του [Uysal \(2012\)](#), διερευνήθηκε η επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στην απόδοση μιγμάτων ΑΣΣ, με αντικατάσταση του τσιμέντου από πρόσμικτα (ασβεστολιθικό φίλερ, σκόνη βασάλτη, μαρμαρόσκονη) σε διάφορα ποσοστά, στη συμπεριφορά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Σε μέρος των μιγμάτων μελετήθηκε και η επίδραση ενσωμάτωσης ινών πολυπροπυλενίου. Συνολικά μελετήθηκαν πειραματικά εννέα μίγματα ΑΣΣ, τα οποία εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες από 200 έως 800 °C, και συγκρίθηκαν με ένα μίγμα αναφοράς. Σημαντική απώλεια της απομένουσας αντοχής παρατηρήθηκε για θερμοκρασίες άνω των 600 °C, ενώ μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πρόσμικτα οδήγησαν σε ακόμα μεγαλύτερες απώλειες. Οι ίνες πολυπροπυλενίου

περιορίσαν τα φαινόμενα εκρηκτικής αποφλοιώσης, αν και οδήγησαν σε μεγαλύτερες απώλειες αντοχής.

### 1.3.2. Θέματα Ανθεκτικότητας

#### 1.3.2.1. Γενικά

##### Ορισμός ανθεκτικότητας

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός [ACI 201.2R (2008)], η ανθεκτικότητα είναι η ικανότητα του υλικού να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς να χάνει την αρχική του ποιότητα και λειτουργικότητα κάτω από ένα επιθυμητό όριο. Επιπλέον, στη βιβλιογραφία [Advanced Cement Technologies (2001)] τονίζεται ότι η ικανότητα αυτή αφορά ένα αναμενόμενο επίπεδο δυνητικών επιδεινούμενων περιβαλλοντικών συνθηκών (μηχανικών, φυσικών ή χημικών). Η ανθεκτικότητα, που μπορεί να προσφέρει στο υλικό μεγάλη διάρκεια ζωής, αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος με τις προϋποθέσεις του σωστού σχεδιασμού, της ανάμιξης, της διάστρωσης και της συντήρησης. Με προαπαιτούμενη την κατάλληλη διάστρωση, συμπίκνωση και βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη συντήρηση του σκυροδέματος, καθώς και την επαρκή επικάλυψη, η συμμόρφωση του σκυροδέματος με τα παραπάνω όρια θεωρείται ότι είναι επαρκής έναντι των απαιτήσεων ανθεκτικότητας για τη συγκεκριμένη χρήση στις συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος.

##### Κανονιστικό πλαίσιο

Η ενεργοποίηση του Ευρωπαϊκού Προτύπου Σκυροδέματος EN 206-1 (2000) εισήγαγε μία ενιαία, για όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τεχνική προδιαγραφή για την παραγωγή του σκυροδέματος. Το σκυροδέμα οφείλει να εναρμονιστεί με την Οδηγία του Συμβουλίου της Ευρώπης 106/CE (1989) που αφορά τα δομικά υλικά.

Η προτυποποίηση των υλικών (τσιμέντο, αδρανή, πρόσθετα, πρόσμικτα), ο υποχρεωτικός έλεγχος συμμόρφωσης αντοχών και λοιπών ιδιοτήτων με βάση αυστηρά κριτήρια συμμόρφωσης, αλλά και η υποχρέωση του παραγωγού για διαρκή έλεγχο της παραγωγής σκυροδέματος με βάση τις αρχές του Προτύπου Ποιότητας ISO 9001 (2008) είναι δυνατό να διασφαλίσουν την αναγκαία στάθμη επιτελεσματικότητας που θα απαιτούσε η παραγωγή ενός περισσότερο «ευαίσθητου» σκυροδέματος, όπως το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυροδέμα. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η ευαισθησία αυτή οφείλεται στην ανάγκη αξιόπιστου σχεδιασμού μίγματος, ώστε να επιτευχθούν οι ελάχιστες απαιτούμενες ή στοχευόμενες κατηγορίες ρευστότητας ανάλογα με το επίπεδο επιτελεσματικότητας.

Πέραν της σημαντικής καινοτομίας που αφορά στον προαναφερθέντα έλεγχο παραγωγής, τον έλεγχο συμμόρφωσης και την αξιολόγηση της συμμόρφωσης, η πρώτη και πλέον αξιολογημένη καινοτομία του νέου Ευρωπαϊκού Προτύπου Σκυροδέματος αποτελεί η υιοθέτηση κατηγοριών έκθεσης στο εξωτερικό περιβάλλον [Σακελλαρίου (2008)]. Η προσβολή του σκυροδέματος από περιβαλλοντικές δράσεις ταξινομείται σε κατηγορίες έκθεσης [EN 206-1 (2000)]. Συνοπτικά, οι κατηγορίες έκθεσης είναι οι ακόλουθες:

- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω ενανθράκωσης (XCi)
- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων εκτός θαλασσινού νερού (XD<sub>i</sub>)
- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων που προέρχονται από θαλασσινό νερό (XS<sub>i</sub>)
- Προσβολή από ψύξη-απόψυξη με ή χωρίς αντιπαγωτικά άλατα (XF<sub>i</sub>)
- Χημική προσβολή (XA<sub>i</sub>).

Ελλείπει ευρωπαϊκών ή εθνικών προτύπων που να περιλαμβάνουν ειδικές μεθόδους σχεδιασμού για ανθεκτικότητα για κάθε διαφορετική κατηγορία δράσης, το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο Σκυροδέματος περιορίζεται στο να αντιμετωπίζει τους παραπάνω κινδύνους μέσω περιοριστικών τιμών στη σύνθεση (μέγιστος λόγος  $w/c$ , ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ελάχιστη κατηγορία αντοχής, ελάχιστη περιεκτικότητα σε αέρα) που βασίζονται σε μακροχρόνια εμπειρία και, προφανώς, σχετίζονται ταυτόχρονα με τον επιθυμητό χρόνο ζωής της κατασκευής (**Πίνακας 15**).

**Πίνακας 15** Περίπτωση διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων [πηγή: EN 206-1 (2000)]

απαιτήσεις σκυροδέματος	κατηγορία έκθεσης διάβρωση λόγω χλωριόντων					
	χλωριόντα που προέρχονται από θαλασσινό νερό			χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό		
	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3
μέγιστος λόγος $w/c$	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45
ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 35/45
ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου ( $kg/m^3$ )	300	320	340	300	300	320

Οι κατασκευές από Ω.Σ., ενώ συχνά βρίσκονται σε δύσκολα περιβάλλοντα, έχουν προσδόκιμη διάρκεια ζωής, ανάλογα με τη σπουδαιότητά τους, από 50 έτη έως και περισσότερα από 100 έτη, με μικρές ή και καθόλου επεμβάσεις. Για τον λόγο αυτό απαιτείται οι κατασκευές αυτές να είναι ανθεκτικές. Ειδικά για παραθαλάσσιες κατασκευές, λιμενικές εγκαταστάσεις, φράγματα ή γέφυρες μία από τις κρισιμότερες περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι η διείσδυση χλωριόντων, η οποία οδηγεί σε διάβρωση του περιεχόμενου οπλισμού και, ως συνεπακόλουθο, τη μείωση της αντοχής, της λειτουργικότητας και της αισθητικής της κατασκευής. Όπως θα αναλυθεί διεξοδικότερα σε επόμενη παράγραφο, οι οπλισμοί που είναι ενσωματωμένοι στο σκυρόδεμα αποπαθητικοποιούνται όταν μία συγκεκριμένη ποσότητα χλωριόντων συγκεντρώνεται στην περιβάλλουσα περιοχή, αυξάνοντας τον κίνδυνο διάβρωσης που σχετίζεται με την περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Αυτό οδηγεί σε πρόωμη ανάγκη επισκευής.

Είναι γνωστό ότι ορισμένοι από τους προαναφερθέντες προαπαιτούμενους παράγοντες και, συγκεκριμένα, η διάστρωση και η συμπύκνωση του σκυροδέματος αποτελούν τα «ασθενή» σημεία μιας κατασκευής, καθώς συχνά δεν πραγματοποιούνται από εξειδικευμένο προσωπικό. Ως εκ τούτου, το προκύπτον σκυρόδεμα είναι πιθανό να έχει υποδεέστερη ποιότητα και να είναι λιγότερο ανθεκτικό από ότι σχεδιάστηκε. Το ΑΣΣ, με την κατάλληλη διασφάλιση της ποιότητας παραγωγής όπως σχολιάστηκε παραπάνω, είναι δυνατό να προσπελάσει τους δύο αυτούς κρίσιμους παράγοντες, οι οποίοι δεν απαιτούν την εμπλοκή εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού.

## Επιφανειακή στρώση

Η ανθεκτικότητα μίας κατασκευής από σκυρόδεμα είναι στενά συνδεδεμένη με την διαπερατότητα της επιφανειακής στρώσης, εκείνης δηλαδή που θα περιορίσει την εισροή ουσιών διαμέσου της μικροδομής των πόρων που μπορούν να ξεκινήσουν ή να επιδεινώσουν πιθανές επιβλαβείς διαδικασίες, τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για τον εγκιβωτισμένο χαλύβδινο οπλισμό ( $CO_2$ , χλωριούχα, θειικά, νερό, οξυγόνο, αλκάλια, οξέα, κ.λπ.). Στην πράξη, η ανθεκτικότητα εξαρτάται από την επιλογή υλικών, τη σύνθεση του σκυροδέματος, αλλά και από τον βαθμό επίβλεψης κατά τη διάστρωση, τη συμπύκνωση, την περάτωση και τη συντήρηση.

Η ελλιπής συμπύκνωση της επιφανειακής στρώσης, λόγω δυσκολιών στη δόνηση σε στενά τμήματα μεταξύ των καλουπιών, έχει χαρακτηριστεί ως πρωτεύων παράγοντας της χαμηλής ανθεκτικότητας κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα που εκτίθενται σε επιθετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου ήταν ένας από τους κύριους λόγους που οδήγησαν στην ανάπτυξη του ΑΣΣ στην Ιαπωνία. Το συμβατικό σκυρόδεμα συμπυκνώνεται μέσω μηχανικής δόνησης, που αποτελεί μία ασυνεχή διαδικασία. Στην περίπτωση της εσωτερικής δόνησης, ακόμα και στην περίπτωση που αυτή εκτελείται ορθά, ο όγκος του σκυροδέματος εντός της επιφάνειας επιρροής του δονητή δεν απολαμβάνει στο σύνολό του την ίδια ενέργεια συμπύκνωσης. Παρόμοια, στην περίπτωση της εξωτερικής δόνησης, η τελική συμπύκνωση είναι ουσιωδώς ετερογενής, εξαρτώμενη από την απόσταση από την πηγή δόνησης. Το αποτέλεσμα της δόνησης είναι, για τον λόγο αυτόν, ένα σκυρόδεμα στην κατασκευή με ανομοιογενή συμπύκνωση και, συνεπώς, με διαφορετική διαπερατότητα, γεγονός το οποίο εντείνει την επιλεκτική κατά τόπους εισροή των επιθετικών ουσιών. Όπως είναι φυσικό, οι συνέπειες της λανθασμένης δόνησης (κυψέλες, διαχωρισμός, δάκρυσμα, κ.λπ.) έχουν πολύ μεγαλύτερο αρνητικό αποτέλεσμα στη διαπερατότητα και, άρα, στην ανθεκτικότητα.

## Βλαπτικοί παράγοντες

Η διείδυση χλωριόντων αποτελεί ίσως τον βασικότερο βλαπτικό μηχανισμό [Sirivivatnanon and Khatri (1999)] και, για τον λόγο αυτόν, οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας συχνά βασίζονται σε παράγοντες που αφορούν την αντίσταση του σκυροδέματος σε διείδυση χλωριόντων.

Το νερό αποτελεί το κύριο μέσο μεταφοράς των χλωριόντων και άλλων βλαβερών παραγόντων που υπάρχουν στο περιβάλλον της κατασκευής στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, η μελέτη της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε νερό αποτελεί σημαντική παράμετρο για την εκτίμηση της ανθεκτικότητάς του.

Συνθήκες που να υποβοηθούν παράλληλα την ενανθράκωση και τη διείδυση χλωριόντων δε συνυπάρχουν συχνά. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί, ότι η παρουσία ιόντων χλωρίου σε ένα ενανθρακωμένο σκυρόδεμα, όταν αυτή συμβεί, οδηγεί σε πολύ υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται [Roper and Baweja (1991) κατά Sirivivatnanon and Khatri (1999)] ότι ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται κατά μία τάξη μεγέθους εν σχέσει προς το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα με ταυτόχρονη παρουσία νερού. Ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι γενικά χαμηλός σε περιβάλλοντα με μεγάλη σχετική υγρασία, όπως σε παραθαλάσσια περιβάλλοντα όπου υπάρχουν πολλά χλωριόντα. Επομένως, ενώ σε παραθαλάσσια περιβάλλοντα οι κατασκευές



κινδυνεύουν από διείσδυση χλωριόντων, συνήθως δεν κινδυνεύουν από ενανθράκωση.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι περιοριστικές τιμές για το κατάλληλο σχεδιασμό του μίγματος έναντι προβλημάτων ανθεκτικότητας στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στην μακρόχρονη εμπειρία. Ενώ στο ΣΣ υπάρχει σημαντική σχετική βιβλιογραφία, η διείσδυση χλωριόντων στο ΑΣΣ συναντάται σε περιορισμένες βιβλιογραφικές αναφορές, ενώ παράλληλα ιδιαίτερα περιορισμένη είναι και η εμπειρία από πραγματικές κατασκευές.

Η αξιόπιστη ανάλυση χλωριόντων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα αποτελεί μία ουσιώδη παράμετρο για την αποτίμηση των υφιστάμενων κατασκευών και για τον προσδιορισμό της μελλοντικής διάρκειας ζωής [RILEM TC 178-TMC (2002)]. Παρά το γεγονός ότι η μικροδομή του ΑΣΣ είναι διαφορετική από το ΣΣ, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποια ένδειξη ότι οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται στο ΣΣ για τον έλεγχο διείσδυσης χλωριόντων δεν μπορούν να εφαρμοστούν στο ΑΣΣ [RILEM TC 205-DSC Final Report (2008)]. Ίσως κάποια προσοχή πρέπει να δοθεί στις έμμεσες μεθόδους που βασίζονται στην ηλεκτρική αντίσταση (π.χ. ASTM C1202 (2009), AASHTO T277 (2007)), καθώς ο υψηλός όγκος της σκόνης και τα επιπλέον χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται στο ΑΣΣ μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικό όγκο πόρων και πιθανώς σε διαφορετικό τρόπο δέσμευσης χλωριόντων ως προς το ΣΣ.

## Πορώδες

Τόσο η ανάμιξη όσο και η διάστρωση του νωπού σκυροδέματος συμβάλλουν στη διαμόρφωση της τελικής διάταξης των πόρων. Η συνολική δομή των πόρων και η συσχέτιση αυτής με τους μηχανισμούς μεταφοράς, την διαπερατότητα και το πορώδες θα επηρεάσουν σημαντικά την ανθεκτικότητα και το βαθμό ικανοποιητικής συμπεριφοράς της κατασκευής σε σχέση με τις κλιματικές συνθήκες και τις εσωτερικές αντιδράσεις. Η μεταφορά βλαβερών ουσιών στο σκληρυμένο σκυρόδεμα και η μετακίνησή τους εντός των στοιχείων επηρεάζει σημαντικά την ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα. Ο ρυθμός, το εύρος και η επίδραση του μηχανισμού μεταφοράς εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τη δομή των πόρων στο σκυρόδεμα (ποσότητα, σχήμα, μέγεθος, διάταξη), την παρουσία ρωγμών και το μικροκλίμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [ACI 201.2R (2008)], το μέγεθος των πόρων ποικίλει στην τσιμεντόπαστα: (α) πόροι γέλης (gel pores) ( $< 3$  nm), (β) τριχοειδείς πόροι (3 έως 3000 nm) και (γ) κενά εγκλωβισμένου αέρα ( $> 3000$  nm). Η ανθεκτικότητα ουσιαστικά επηρεάζεται από τους μεγαλύτερους τριχοειδείς πόρους και τα κενά εγκλωβισμένου αέρα. Για απλές τσιμεντόπαστες (χωρίς πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά), για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου απαιτείται ένας λόγος  $w/cm$  περίπου ίσος με 0.4, εκ του οποίου το μισό περίπου νερό θα δεσμευθεί χημικά, ενώ το υπόλοιπο μισό θα απορροφηθεί φυσικά από τις επιφάνειες της γέλης. Σε αυτή την περίπτωση το τριχοειδές πορώδες θα καταστεί ασυνεχές εντός 3 ημερών. Για  $w/cm < 0.4$  θα παραμείνει ένα μέρος μη ενυδατωμένου τσιμέντου, λόγω της μη ύπαρξης επαρκούς ποσότητας νερού ανάμιξης για την δημιουργία των προϊόντων ενυδάτωσης. Για  $w/cm > 0.4$  θα δημιουργηθεί κενό τριχοειδούς μεγέθους. Για  $w/cm > 0.8$  το πορώδες θα παραμείνει για πάντα συνεχές.

**Πίνακας 16** Παράγοντες που επηρεάζουν τη χημική προσβολή του σκυροδέματος  
[πηγή: [ACI 201.2R \(2008\)](#)]

Παράγοντες που επιταχύνουν ή επιδεινώνουν την προσβολή	Παράγοντες που μετριάζουν ή καθυστερούν την προσβολή
1. Υψηλό πορώδες λόγω <ol style="list-style-type: none"> <li>υψηλής υδαταπορροφητικότητας</li> <li>διαπερατότητας</li> <li>κενών</li> </ol>	1. Πυκνό σκυρόδεμα που επιτυγχάνεται μέσω: <ol style="list-style-type: none"> <li>κατάλληλων αναλογιών συστατικών μίγματος*</li> <li>μειωμένης περιεκτικότητας σε νερό</li> <li>αυξημένης περιεκτικότητας σε τσιμεντοειδή</li> <li>περιεκτικότητας σε αέρα</li> <li>επαρκούς συμπίκνωσης</li> <li>αποτελεσματικής συντήρησης<sup>†</sup></li> </ol>
2. Ρωγμές και διαχωρισμοί λόγω: <ol style="list-style-type: none"> <li>συγκέντρωσης τάσεων</li> <li>θερμικών διαταραχών</li> </ol>	2. Μειωμένη εφελκυστική τάση στο σκυρόδεμα μέσω: <sup>‡</sup> <ol style="list-style-type: none"> <li>χρήσης εφελκυσμένου σπλισμού κατάλληλης διαμέτρου, ορθά τοποθετημένου</li> <li>προσθήκης ποζολάνης (για τον περιορισμό της αύξησης θερμοκρασίας)</li> <li>πρόβλεψη επαρκών αρμών συστολής</li> </ol>
3. Διήθηση και διείσδυση υγρών λόγω: <ol style="list-style-type: none"> <li>ρέοντος υγρού<sup>δ</sup></li> <li>συσσώρευσης υγρών (ponding)</li> <li>υδραυλικής πίεσης</li> </ol>	3. Δομικός σχεδιασμός: <ol style="list-style-type: none"> <li>περιορισμός περιοχών επαφής ή ανακύκλισης</li> <li>πρόβλεψη μεμβρανών και προστατευτικών συστημάτων<sup>  </sup> για τη μείωση της διείσδυσης</li> </ol>

\*Τα συστατικά του μίγματος, η αρχική ανάμειξη και η διαδικασία παρασκευής του νωπού σκυροδέματος προσδιορίζουν την ομοιογένεια και την πυκνότητά του

<sup>†</sup>Ανεπαρκείς διαδικασίες συντήρησης οδηγούν σε ελαττώματα και ρωγμές

<sup>‡</sup>Η αντίσταση στη ρηγμάτωση εξαρτάται από την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα

<sup>δ</sup>Η μετακίνηση του νερού που μεταφέρει επιβλαβείς ουσίες αυξάνει τις αντιδράσεις που εξαρτώνται από τόσο την ποσότητα όσο και την ταχύτητα της ροής

<sup>||</sup>Το σκυρόδεμα που θα εκτίθεται συχνά σε χημικά γνωστά για την ταχεία φθορά που προκαλούν θα πρέπει να προστατεύεται με ένα χημικά ανθεκτικό προστατευτικό σύστημα.

Από τον πίνακα που αφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν τη χημική προσβολή του σκυροδέματος (**Πίνακας 16**), μπορούμε θεωρητικώς να αποφανθούμε ότι το ΑΣΣ αναμένεται να οδηγεί σε ηπιότερες και πιο επιβραδυμένες διαδικασίες προσβολής, λόγω του μικρότερου πορώδους, της αυξημένης περιεκτικότητας σε τσιμεντοειδή και της επαρκούς ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης. Πάντως, η εφαρμογή ΑΣΣ θα μπορούσε να θεωρηθεί παρακινδυνευμένη λόγω των περιορισμένων γνώσεων σχετικά με την πραγματική ανθεκτικότητα των τσιμεντοειδών υλικών [[Audenaert et al. \(2007\)](#)].

### Σχόλια για το ΑΣΣ

Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες μεταφοράς (transport properties) υγρών στο ΑΣΣ είναι [[RILEM TC 205-DSC \(2008\)](#), [Stanish et al. \(1997\)](#)]:

- ο λόγος νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ).
- ο βαθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου (άρα και η ηλικία του σκυροδέματος).
- ο τύπος τσιμέντου (κανονικό/ σύνθετο, τύπος/ περιεκτικότητα προσμίξεων).
- τα χρησιμοποιούμενα πρόσμικτα, τόσο όσο αφορά στον τύπο τους (τύπου Ι ή ΙΙ) όσο και στην περιεκτικότητά τους στο μίγμα, και, ειδικότερα, ο τρόπος που αυτά επιδρούν στη συνέχεια του πορώδους και στη διάμετρο των πόρων, καθώς και στην καθυστέρηση ολοκλήρωσης της ενυδάτωσης. Ειδικότερα για τον ρυθμό διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, αυτός εξαρτάται από την ικανότητα χημικής ή φυσικής δέσμευσης (binding capacity) χλωριόντων από το σκυρόδεμα, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τα τσιμεντοειδή υλικά που περιέχονται στη σύσταση.
- η χρήση τροποποιητικού ιξώδους, η ενσωμάτωση του οποίου στο μίγμα οδηγεί σε μεγαλύτερη διαπερατότητα σε υγρά.

- η κοκκομετρική διαβάθμιση: μία ομαλή κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης οδηγεί σε βελτίωση του πορώδους και, συνεπώς, σε αντίσταση στη μεταφορά υγρών, ιδιαίτερα για μεγάλους λόγους  $w/c$ .

Τα μίγματα ΑΣΣ, λόγω των απαιτήσεων που σχετίζονται με την εργασιμότητά τους, έχουν συνήθως μεγάλη περιεκτικότητα αφενός σε λεπτόκοκκα υλικά ( $< 0.125\text{mm}$ ), δηλαδή τσιμέντο και αδρανή ή ποζολανικά πρόσμικτα (πρόσμικτα τύπου I ή II), και αφετέρου σε χημικά πρόσθετα. Τα επιπλέον αυτά συστατικά του ΑΣΣ εν σχέσει προς τη συνήθη σύνθεση του ΣΣ επηρεάζουν σημαντικά τον όγκο των πόρων, την χημική σύνθεση του υγρού των πόρων, αλλά και την ικανότητα δέσμευσης χλωριόντων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να επιδράσουν σημαντικά στην αποδοτικότητα και την ερμηνεία των συμβατικών ελέγχων δοκιμών χλωριόντων που εφαρμόζονται στο ΣΣ [Audenaert et al. (2005)]. Πάντως, έχει αναφερθεί [RILEM (2008), Loser and Leemann (2007), Audenaert and De Schutter (2003), RILEM Report 38 (2007)] ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις που να συνηγορούν στη μη δυνατότητα εφαρμογής των συμβατικών ελέγχων και στο ΑΣΣ.

Στο σημείο αυτό, αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ίδιες κατηγορίες αντοχής ή ίδιοι λόγοι νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ δεν αποτελούν παράγοντες που διασφαλίζουν αντιστοιχία και στην ικανότητα αντίστασης του μίγματος στα χλωριόντα [RILEM TC 205-DSC (2008)] και θα πρέπει να πραγματοποιείται μια πιο ευρεία αξιολόγηση των μιγμάτων.

### 1.3.2.2. Διαπερατότητα

#### Γενικά

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω της αξιολόγησης της ικανότητας υγρών ή αερίων να ρέουν διαμέσου του υλικού και, ως εκ τούτου, συνδέεται άμεσα με την υπάρχουσα δομή των πόρων. Υπάρχουν μέθοδοι ελέγχου, είτε διεθνώς προτυποποιημένες είτε προτεινόμενες από την RILEM, για τη μέτρηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, εργαστηριακές ή επιτόπου, ως δείκτες ανθεκτικότητας. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος ορίζεται ως η ικανότητα της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος να μεταφέρει αέρια ή υγρά στην εσωτερική μικροδομή του. Το δίκτυο πόρων, η δημιουργία του οποίου οφείλεται στην ετερογενή φύση του υλικού, επιτρέπει την μεταφορά των βλαβερών παραγόντων (νερό, άλατα, διοξείδιο του άνθρακα, κ.λπ.) μέσω ροής, διάχυσης ή απορρόφησης.

Η διαπερατότητα αποτελεί το συνδυασμένο αποτέλεσμα των παραπάνω τριών μεθόδων διεϊσδυσης. Τα δύο ευρωπαϊκά πρότυπα EN 1992-1-1 (2004) και EN 206-1 (2000) λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας, ορίζοντας κατηγορίες περιβάλλοντος, οριακές τιμές για τη σύνθεση του σκυροδέματος και ελάχιστες επικαλύψεις ράβδων οπλισμού.

#### Σπουδαιότητα νερού

Το νερό αποτελεί το κυριότερο φυσικό συστατικό και απαντάται στη φύση σε τρεις διαφορετικές φάσεις: υγρό (θαλασσινό νερό, νερό υπεδάφους, βροχή κ.λπ.), αέριο (υδρατμοί) ή στερεό (πάγος, χιόνι). Είναι γνωστό ότι τα μόρια του νερού έχουν πολύ μικρό μέγεθος και έχουν, συνεπώς, τη δυνατότητα να διεισδύουν εύκολα στις κοιλότητες ή τους πόρους του σκυροδέματος. Επιπλέον, σε συνδυασμό με την

ικανότητά του να διαλύει τις περισσότερες από τις επιθετικές ουσίες του περιβάλλοντος (χλωριούχα άλατα, θειικά άλατα, κ.λπ.), το νερό είναι ικανό να μεταφέρει τους εν λόγω επιθετικούς παράγοντες στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος και να δημιουργεί βλάβες σε τοπικό επίπεδο ή ακόμα και σε πιο εκτεταμένο βαθμό. Τέλος, η παραμονή του νερού στο δίκτυο πόρων του σκυροδέματος, σε συνδυασμό με έντονες εναλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί να οδηγήσει σε αυξομειώσεις του όγκου του (μετατροπή από υγρό σε στερεό) και να οδηγήσει σε τοπικές ή ευρείας κλίμακας ρηγματώσεις του σκυροδέματος

Όπως είναι γνωστό, το νερό έχει τη δυνατότητα να διεισδύει εύκολα σε μικρούς πόρους ή μικρορωγμές, εισχωρώντας στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Σε συνδυασμό με την ιδιότητά του να διαλύει μεγάλο πλήθος βλαβερών ουσιών, το νερό γίνεται ουσιαστικά διακομιστής των ουσιών αυτών στη μάζα του σκυροδέματος, οδηγώντας σταδιακά μέσω διαφόρων χημικών διεργασιών σε τοπικές ή εκτεταμένες φθορές, τόσο στο σκυρόδεμα (π.χ. αποπαθητικοποίηση) όσο και στον εγκιβωτισμένο χάλυβα οπλισμού (π.χ. διάβρωση). Ως εκ τούτου, προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας λιγότερο υδατοπερατών σκυροδεμάτων. Η αύξηση της ποσότητας του νερού σε μίγματα ΑΣΣ έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την υδατοπερατότητα, λόγω της συνεπακόλουθης αύξησης του όγκου του ανοιχτού πορώδους [Audenaert and De Schutter (2004)].

#### **Λεπτόκοκκα**

Η περιεκτικότητα και η προέλευση των λεπτόκοκκων, επιδρούν επίσης σημαντικά στην διαπερατότητα, καθώς επηρεάζουν το πορώδες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση τόσο αδρανών όσο και ποζολανικών λεπτόκοκκων υλικών (ασβεστολιθικό φίλερ, πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, μετακαολίνης, κ.λπ.) στη σύνθεση του ΑΣΣ αναμένεται να αναβαθμίσει την ομοιογένεια του μίγματος, βελτιώνοντας τη ζώνη μετάβασης μεταξύ τσιμεντόπαστας και αδρανών, να μειώσει το μέγεθος των πόρων και, συνεπώς, να καταστήσει το υλικό λιγότερο διαπερατό από επιθετικούς παράγοντες.

#### **Τριχοειδής απορρόφηση**

Η τριχοειδής απορρόφηση (capillary suction, capillary absorption) ή απορροφητικότητα (sorptivity) είναι η ιδιότητα ενός πορώδους υλικού, όπως το σκυρόδεμα, να απορροφά και να μεταφέρει νερό και εξαρτάται από την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία [Taha et al. (2001)]. Η τριχοειδής απορρόφηση αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς νερού στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα. Το νερό απορροφάται με αργό ρυθμό διαμέσου του δικτύου των τριχοειδών πόρων. Η απορρόφηση, η φορά της οποίας είναι αντίθετη από τη φορά της βαρύτητας, οφείλεται στις ισχυρές δυνάμεις πρόσφυσης των πολωμένων μορίων νερού, καθώς και στις μεγάλες δυνάμεις συνοχής των μορίων νερού (επιφανειακή τάση) [Στρογγύλης (2008)]. Το φαινόμενο εξελίσσεται έως τη στιγμή που οι δυνάμεις λόγω βαρύτητας υπερβούν τις δυνάμεις πρόσφυσης, χρονική στιγμή που σχετίζεται άμεσα με τη διάμετρο των πόρων (μεγαλύτερη διάμετρος πόρων, μεγαλύτερη απορροφούμενη ποσότητα νερού, μεγαλύτερες δυνάμεις λόγω βαρύτητας)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αρχική υγρασία του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην μετρούμενη απορροφητικότητα. Ως εκ τούτου, η προετοιμασία των δοκιμών οφείλει να ακολουθεί κάποιους ενιαίους κανόνες, ώστε να περιορίζεται η επιρροή διαφορετικού βαθμού υγρασίας (πλήρως ή μερικώς κορεσμένο) στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Αυτή η ομοιογενοποίηση των συνθηκών επιτυγχάνεται μέσω ξήρανσης σε σταθερή θερμοκρασία για το (μεταβλητό) διάστημα που απαιτείται, ώστε η διαφορά βάρους σε δύο διαδοχικές ημερήσιες μετρήσεις να μην ξεπερνά το 0.1 %. Σε σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας το διάστημα αυτό είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερο [Taha et al. (2001)]. Στο ΑΣΣ, έχει παρατηρηθεί [Assié et al. (2007)] ότι η απορροφητικότητα είναι υψηλότερη από ότι στο ΣΣ.

### 1.3.2.3. Χλωριόντα

#### Σπουδαιότητα χλωριόντων

Η διείδυση ιόντων χλωρίου ( $Cl^-$ ) στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα ανθεκτικότητας, καθώς σχετίζεται άμεσα με τον κίνδυνο διάβρωσης του εγκιβωτισμένου οπλισμού. Η μεταφορά των χλωριόντων διαμέσου του δικτύου πόρων οδηγεί στην αποαθητικοποίηση της προστατευτικής στρώσης οξειδίων του χάλυβα οπλισμού, επιταχύνοντας έτσι τις χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με το φαινόμενο της διάβρωσης, οδηγώντας τελικώς στην απώλεια μηχανικών αντοχών και ολκιμότητας. Δεδομένου ότι οι πηγές χλωριόντων που περιβάλλουν τις συνήθεις κατασκευές είναι αρκετές (παραθαλάσσιο περιβάλλον μέσω άμεσης επαφής ή αερομεταφοράς σταγονιδίων, αντιπαγωτικά άλατα προστασίας έναντι χιονοπτώσεων, πυρκαγιά σε χώρους αποθήκευσης υλικών από πολυβινύλιο, κ.λπ.), η ικανότητα του σκυροδέματος να ανθίσταται στη διείδυση χλωριόντων στο εσωτερικό του αποτελεί μία ιδιαίτερα ουσιαστική παράμετρο για τη βιωσιμότητά του.

#### Πηγές χλωριόντων

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα έρχονται συχνά σε επαφή με πηγές χλωριόντων, όπως το θαλάσσιο περιβάλλον, τα αντιπαγωτικά άλατα, τα άλατα των υπόγειων νερών ή των συστατικών υλικών (αδρανή ή νερό ανάμιξης με υψηλές περιεκτικότητες αλάτων). Τα χλωριόντα που επηρεάζουν τις κατασκευές εμπεριέχονται στο θαλασσινό νερό, τα αντιπαγωτικά άλατα και το υφάλμυρο νερό [Kim et al. (2007)]. Η παρουσία τους στο σκυρόδεμα οφείλεται σε πρωτογενή, αλλά και δευτερογενή αίτια [Σίδερης (2010)]. Πιο συγκεκριμένα:

Κατά τη φάση κατασκευής (πρωτογενή αίτια):

- Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα γινόταν ευρεία (σκόπιμη) χρήση επιταχυντών για γρήγορη και φθηνότερη σκυροδέτηση, που περιείχαν χλωριόντα υπό μορφή χλωριούχου ασβεστίου,  $CaCl_2$ .
- Χρήση μη καθαρών αδρανών υλικών (contaminated aggregates) από παραθαλάσσιες περιοχές, με περιεκτικότητα σε θαλασσινό νερό
- Χρήση μη καθαρού, θαλασσινού ή υφάλμυρου, νερού (contaminated water) κατά την ανάμειξη

Κατά τη φάση λειτουργίας (δευτερογενή αίτια):

- Υψηλή συγκέντρωση στην υγρασία περιβάλλοντος κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές, αερομεταφερόμενα άλατα (airborne salts)
- Άμεση επαφή ή ανακύκλιση θαλασσινού νερού (παφλασμός κυμάτων, παλίρροια)
- Άμεση επαφή με άλατα που περιέχονται στο υπέδαφος (ground salts)
- Χρήση αντιπαγωτικών αλάτων (de-icing salts) (χρήση στο οδικό δίκτυο κατά τους χειμερινούς μήνες για τήξη πάγων)
- Ειδικές κατασκευές (σιλό αποθήκευσης αλατιού)

### Μορφή χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Τα συνολικά χλωριόντα ( $Cl_{total}$ ) που εμπεριέχονται στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα ελεύθερα χλωριόντα ( $Cl_{free}$ ) που συναντώνται εντός του πορώδους του σκυροδέματος και τα δεσμευμένα στη σκληρυμένη φάση του σκυροδέματος χλωριόντα ( $Cl_{bound}$ ), τα οποία χωρίζονται με τη σειρά τους στα χημικώς δεσμευμένα και τα φυσικώς δεσμευμένα χλωριόντα [Σίδερης (2010)]. Τα συνολικά χλωριόντα (total chlorides) προσδιορίζονται μέσω διάλυσης του δείγματος σε οξέα, διαδικασία που απομακρύνει όλα τα χλωριόντα από το δείγμα με μόνη εξαίρεση τα χλωριόντα που μπορεί να αποτελούν μέρος της χημικής δομής ορισμένων μη όξινων διαλυτών οργανικών πολυμερών [Taylor et al. (1999)]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [RILEM TC 178-TMC (2002)], ως περιεκτικότητα σε ελεύθερα χλωριόντα (free chlorides) ορίζεται η ποσότητα εκείνη των χλωριόντων στο δείγμα σκυροδέματος, η οποία μπορεί να ανακτηθεί μέσω της εφαρμογής υψηλών πιέσεων στο δείγμα σκυροδέματος (π.χ. ACI 222.1 (1996)), ενώ ως περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά χλωριόντα (water-soluble) ορίζεται η ποσότητα των χλωριόντων που μπορούν να εξαχθούν σε θερμοκρασία δωματίου μέσω της διύλισης με νερό (π.χ. ASTM C1218 (2008)). Πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι η ποσότητα των υδατοδιαλυτών χλωριόντων συχνά συγχέεται εκ παραδρομής με την ποσότητα των χλωριόντων που βρίσκεται στους πόρους του σκυροδέματος, ποσότητα για την οποία δεν υπάρχει μέχρι στιγμής πρότυπη μέθοδος που να την καταγράφει [Taylor et al. (1999)]. Είναι γενικά παραδεκτό ότι η σχέση μεταξύ ελεύθερων, συνολικών και υδατοδιαλυτών χλωριόντων δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από την επιλογή του είδους και της διαβάθμισης των συστατικών του σκυροδέματος, καθώς και από το ιστορικό του δείγματος. Ο λόγος υδατοδιαλυτών προς τα συνολικά χλωριόντα έχει σημαντικό εύρος διακύμανσης.

### Επιτρεπτά όρια χλωριόντων

Η έννοια ενός επιτρεπτού ορίου χλωριόντων περιλαμβάνει μία εκτεταμένη αβεβαιότητα σχετικά με την καταλληλότητα της οριακής τιμής για διαφορετικά υλικά ή συνθήκες. Για τον λόγο αυτό η οριακή τιμή δεν πρέπει να ορίζεται μονοσήμαντα, αλλά για κάθε ξεχωριστή περίπτωση (υλικών, συνθηκών) πρέπει να λαμβάνει διαφορετικές τιμές [Taylor et al. (1999)]. Η έννοια μία οριακής τιμής διαθέτει δύο ξεχωριστά στάδια. Το πρώτο σχετίζεται με την ικανότητα του τσιμέντου Portland και των πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών (ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικαμίνων) να δεσμεύουν χημικώς τα χλωριόντα, αποκλείοντας τη συμμετοχή τους στην αντίδραση της διάβρωσης [Taylor et al. (1999)]. Όσα χλωριόντα δεν

δεσμευθούν χημικά, είναι ελεύθερα να συμβάλλουν στην διάβρωση του οπλισμού. Το δεύτερο στάδιο απαιτεί την παρουσία ενός ελάχιστου ποσοστού χλωριόντων, το οποίο σε περιβάλλον υψηλού pH θα καταστεί ικανό να προσπελάσει την παθητική στρώση και να ξεκινήσει την διάβρωση του οπλισμού.

Το εν λόγω ποσοστό χλωριόντων που θα ενεργοποιήσει τους μηχανισμούς διάβρωσης του οπλισμού, δίδεται από τον λόγο χλωριόντων προς τα ιόντα υδροξυλίου. Σύμφωνα με τον [Σίδηρη \(2010\)](#), η πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού του ελάχιστου ικανού ορίου συγκέντρωσης χλωριόντων πραγματοποιήθηκε από τον [Hausmann \(1967\)](#), ο οποίος εκτίμησε ως στιγμή έναρξης της διάβρωσης τη στιγμή όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων  $[Cl^-]$  ξεπεράσει το 60 % της συγκέντρωσης των ιόντων υδροξυλίου  $[OH^-]$ . Τονίζεται ότι το όριο αυτό σχετίζεται άμεσα με το pH, καθώς οποιαδήποτε έστω και μικρή διαφοροποίηση του pH θα οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στα  $[OH^-]$ . Η παραπάνω τιμή επηρεάζεται επιπλέον από τη θερμοκρασία και την υγρασία του σκυροδέματος. Για στοιχεία που δεν έχουν χάσει την αλκαλικότητά τους (pH 12.4), αυτό συμβαίνει όταν η συνολική περιεκτικότητα σε χλωριόντα  $[Cl^-]$  (πρωτογενή και δευτερογενή) προσεγγίζει το 0.40 % κ.β. του τσιμέντου. Άλλα μοντέλα που συναντώνται στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούν οριακή συγκέντρωση χλωριόντων για έναρξη της διάβρωσης ίση με το 1.00 % κ.β. του τσιμέντου.

### Μηχανισμοί προσβολής

Η γνώση των διάφορων μηχανισμών προσβολής από χλωριόντα θεωρείται κρίσιμη για το σωστό σχεδιασμό των κατασκευών. Η μεταφορά των χλωριόντων περιλαμβάνει τους ακόλουθους τρεις κύριους μηχανισμούς μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα, οι οποίοι μπορεί να δρουν είτε μεμονωμένα είτε ταυτόχρονα: (i) η διάχυση (diffusion), λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης, (ii) η τριχοειδής απορρόφηση (capillary absorption, capillary suction, capillary rise) και (iii) η διείσδυση, λόγω διαφοράς πίεσης, δηλαδή ροή υπό (υδροστατική) πίεση (permeability, permeation) [[ACI 201.2R-08 \(2008\)](#), [Stanish et al. \(1997\)](#), [Nunes et al. \(2009\)](#), [Σίδηρης Κ \(2010\)](#), [Audenaert et al. \(2010\)](#), [Lee and Chisholm \(2005\)](#), [Audenaert et al. \(2005\)](#)]. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί και ένας τέταρτος μηχανισμός μεταφοράς, που αφορά την μετακίνηση των χλωριόντων μετά την έναρξη της διάβρωσης. Ο μηχανισμός αυτός αφορά στη μετακίνηση (migration) των χλωριόντων, η οποία επιβάλλεται μέσω διαφοράς δυναμικού. Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται μεταξύ των διαβρωμένων περιοχών του οπλισμού προσελκύει τα αρνητικά φορτισμένα χλωριόντα, επιβαρύνοντας την ήδη «ασταθή» περιοχή.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [[Stanish et al. \(1997\)](#), [Sirivivatnanon and Khatri \(1999\)](#), [Audenaert et al. \(2010\)](#)], ο κυριότερος μηχανισμός προσβολής είναι αυτός της **διάχυσης**, ειδικά σε περιπτώσεις κορεσμένου περιβάλλοντος. Γενικά, όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος είναι εκτεθειμένη σε χλωριόντα, ο μηχανισμός της διάχυσης θα είναι ενεργός, λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού του σκυροδέματος.

Η **τριχοειδής απορρόφηση**, γνωστή και ως προσρόφηση μέσω τριχοειδών πόρων, αν και ένας από τους συνηθέστερους μηχανισμούς προσβολής σε περιπτώσεις κύκλων ύγρανσης και ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος (ειδικά σε περιπτώσεις στεγνών επιφανειών), δεν μπορεί από μόνη της να δημιουργήσει πρόβλημα στον οπλισμό. Μειώνει όμως την διαθέσιμη απόσταση που χρειάζεται να διανυθεί από τα

χλωριόντα ώστε αυτά να φθάσουν τη στάθμη του οπλισμού μέσω διάχυσης. Η διαδικασία της τριχοειδούς απορρόφησης προσεγγίζει το νόμο διάχυσης.

Ο τρίτος μηχανισμός, που αφορά στη **διείσδυση** χλωριόντων, ενεργοποιείται όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε μία μονόπλευρη πίεση νερού που περιέχει χλωριόντα. Στην περίπτωση αυτή, η είσοδος των χλωριόντων στο σκυρόδεμα πραγματοποιείται μέσω της ροής νερού, η οποία προκαλείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ των ελεύθερων επιφανειών του σκυροδέματος. Τα χλωριόντα μεταφέρονται και συγκεντρώνονται στην πλευρά μηδενικής πίεσης, ενώ το νερό εξατμίζεται. Αυτό έχει συνέπεια, η μεγαλύτερη συγκέντρωση να παρατηρείται τελικά στην πλευρά μηδενικής πίεσης και όχι στην εκτεθειμένη πλευρά, όπου τα χλωριόντα συνυπάρχουν με νερό και άρα έχουν χαμηλότερη συγκέντρωση.

Σημειώνεται ότι οι εν λόγω μηχανισμοί δρουν με σημαντικά αργούς ρυθμούς και, κατά συνέπεια, η μελέτη του φυσικού φαινομένου δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί σε πραγματικούς χρόνους παρά μόνο μέσω επιταχυνόμενων μεθόδων, όπως αυτές θα αναλυθούν στη συνέχεια.

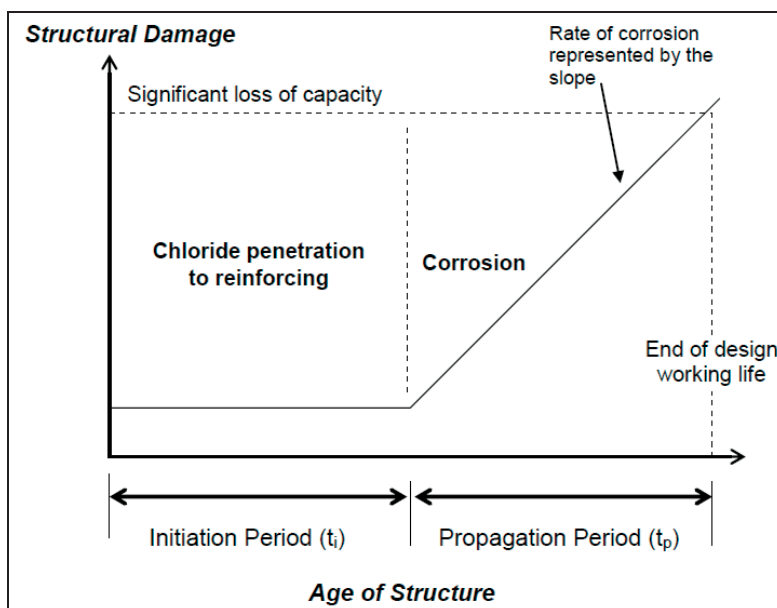
### **Μηχανισμός διάβρωσης**

Ως διάβρωση ορίζεται η ηλεκτροχημική διαδικασία που απαιτεί τη δημιουργία μίας ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση (oxidation), και μίας καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή (reduction). Η διάβρωση ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια: (α) έναρξη διάβρωσης (corrosion initiation), (β) εξέλιξη διάβρωσης (corrosion growth), (γ) καταστροφή οπλισμού ή εν γένει απώλεια λειτουργικότητας [ACI 201.2R (2008)].

Μία πολύ καλή απεικόνιση της διαδικασίας σταδιακής απώλειας της λειτουργικότητας και της στατικής επάρκειας των κατασκευών δίδεται στη βιβλιογραφία [Lee and Chisholm (2005)], με βάση το μοντέλο έναρξης-διασποράς του Tuutti (1982) (Initiation-Propagation Model), το οποίο περιγράφεται στο **Σχήμα 42**. Κατά τη φάση της έναρξης (initiation), τα χλωριόντα διεισδύουν στο σκυρόδεμα προς τον οπλισμό και δημιουργούν ικανή συγκέντρωση στη θέση των οπλισμών, η οποία τελικά διευκολύνει την διάβρωση. Κατά τη φάση της διασποράς (propagation), λαμβάνει χώρα η ενεργός διάβρωση του χάλυβα, ενώ η πίεση διαστολής που ασκείται διαμέσου των σχετικώς ογκοδέστερων ρωγμών λόγω διάβρωσης αποφλοιώνει το περιβάλλον σκυρόδεμα της επικάλυψης. Σε συνδυασμό με την απομείωση της διατομής του χάλυβα, η εν λόγω βλάβη είναι δυνατό να υποβαθμίσει σημαντικά τη λειτουργικότητα και, τελικώς, την στατική επάρκεια της κατασκευής. Το πέρας της φάσης αυτής συνεπάγεται τη διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής και απαιτεί την άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων (επεμβάσεις, ενισχύσεις).

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι ο χάλυβας δεν κινδυνεύει πάντοτε από διάβρωση, παρά το γεγονός ότι το πορώδες του σκυροδέματος επιτρέπει την απορρόφηση και τη συγκράτηση υγρασίας στο εσωτερικό του. Η προστασία του οπλισμού οφείλεται στην αλκαλικότητα του σκυροδέματος, στην ύπαρξη δηλαδή τριχοειδών πόρων με υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης σε οξείδια διαλυτού ασβεστίου, νατρίου και καλίου, τα οποία μέσω της διειδύουσας υγρασίας σχηματίζουν υδροξείδια. Τα οξείδια αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή αλκαλικότητα και δημιουργούν έντονες αλκαλικές συνθήκες σε τοπικό επίπεδο [Broomfield (1997)].



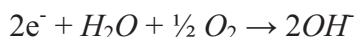


Σχήμα 42 Μοντέλο έναρξης-διασποράς διάβρωσης του Tuutti (Initiation-Propagation Model)  
[πηγή: Lee and Chisholm (2005)]

Κατά την έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα, τα προϊόντα της διάβρωσης (ιόντα σιδήρου) διαλύονται στο νερό των πόρων του σκυροδέματος, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ηλεκτρόνια, σύμφωνα με την ανοδική αντίδραση:

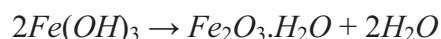
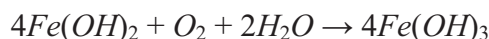
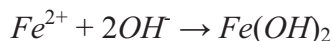


Τα δύο ηλεκτρόνια ( $e^{-}$ ) που απελευθερώνονται κατά την ανοδική αντίδραση πρέπει, για λόγους διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας, να καταναλωθούν σε κάποιο διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του χάλυβα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής αντίδρασης, μόνο με ταυτόχρονη παρουσία νερού και οξυγόνου:



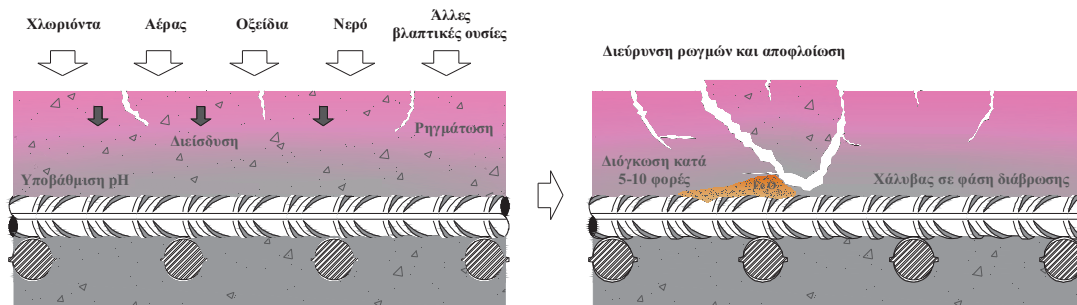
Ο σχηματισμός των ιόντων υδροξυλίου ( $OH^{-}$ ) αυξάνουν τοπικά την αλκαλικότητα, ενδυναμώνοντας έτσι την παθητική στρώση και αποτρέποντας τις επιδράσεις της ενανθράκωσης και των χλωριόντων στην κάθοδο.

Η δημιουργία σκωρίας πραγματοποιείται με την ακόλουθη πορεία: υδροξείδιο σιδήρου  $Fe(OH)_2 \rightarrow$  σιδηρικό υδροξείδιο  $Fe(OH)_3 \rightarrow$  ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (σκωρία)  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ , σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

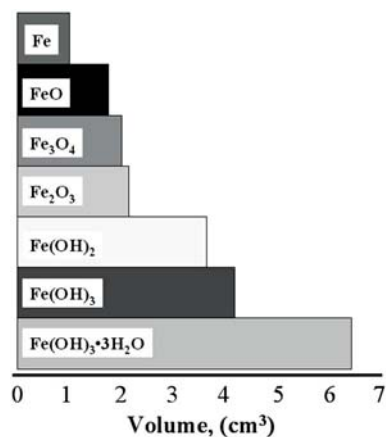


Το άνυδρο οξείδιο του σιδήρου  $Fe_2O_3$  έχει διπλάσιο όγκο από τον χάλυβα που αντικαθιστά. Όταν ενυδατώνεται μετατρέπεται σε πορώδες με αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη διόγκωσή του. Η συνολική τοπική αύξηση του όγκου κυμαίνεται μεταξύ δύο και δέκα φορές του αρχικού όγκου [Broomfield (1997), ACI 222R (2001)], με αποτέλεσμα οι αναπτυσσόμενες εσωτερικές τάσεις να οδηγούν σε ρηγμάτωση

(cracking) και συχνά σε αποφλοιώση (spalling) του σκυροδέματος (Σχήμα 43). Για την καλύτερη κατανόηση της μεταβολής του όγκου των προϊόντων των αντιδράσεων, ανηγμένου στον αρχικό (μοναδιαίο) όγκο του σιδήρου παρατίθεται το Σχήμα 44 [ACI 222R (2001)].



Σχήμα 43 Διαδικασία διάβρωσης: ρηγμάτωση και αποφλοιώση σκυροδέματος [πηγές: <http://www.cathodicprotectiontech.com/corrosion-process>, Broomfield (1997)]



Σχήμα 44 Όγκος προϊόντων διάβρωσης [πηγή: ACI 222R (2001)]

Είναι γνωστό ότι ο εγκιβωτισμένος χάλυβας σε μία κατασκευή ωπλισμένου σκυροδέματος προστατεύεται παθητικά («παθητική προστασία») από το φαινόμενο της διάβρωσης, μέσω ενός λεπτού στρώματος (φιλμ) οξειδίων του σιδήρου,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (γνωστό και ως «παθητική στρώση») γύρω από τον οπλισμό [Broomfield (1997), Lee and Chisholm (2005)], το οποίο δημιουργείται και διατηρείται στην επιφάνειά του λόγω της υψηλής αλκαλικότητας ( $\text{pH} \approx 13$ ) του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η για οποιοδήποτε λόγο καταστροφή του προστατευτικού στρώματος, γνωστή και ως αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού, οδηγεί στην έναρξη του φαινομένου της διάβρωσης.

Κατά την διείσδυση επαρκούς ποσότητας χλωριόντων (αλλά και κατά την ενανθράκωση) στη ζώνη επικάλυψης του οπλισμού, η παθητική αυτή στρώση προσβάλλεται και διαρρηγνύεται, με αποτέλεσμα την τοπική πτώση του pH (και όχι γενικευμένη πτώση όπως συμβαίνει στην περίπτωση της ενανθράκωσης) [Sirivatnanon and Khatri (1999), Σίδερης (2010)]. Σε συνδυασμό με την περιεχόμενη υγρασία και το οξυγόνο ξεκινά η διαδικασία της διάβρωσης, η οποία παρουσία επαρκούς συγκέντρωσης χλωριόντων επιταχύνεται (καταλυτική δράση χλωριόντων). Σημειώνεται ότι κατά την διαδικασία της οξείδωσης δεν καταναλώνεται το σύνολο των χλωριόντων, όταν αυτά είναι σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Αντίθετα ένα

μέρος παραμένει διαθέσιμο και η διαδικασία οξείδωσης του σιδήρου θα επαναληφθεί με την είσοδο νέων χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Οι δύο κυριότεροι λόγοι που οδηγούν στην αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, οι οποίοι δρουν μεμονωμένα ή και συνδυαστικά, συνίστανται αφενός στη διείσδυση χλωριόντων από εξωτερικές πηγές στο εσωτερικό του σκυροδέματος και έως τη στάθμη του οπλισμού μέσω του δικτύου πόρων και αφετέρου στη μείωση της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος σκυροδέματος ( $\text{pH} \leq 9$ ) που συντελείται λόγω της διείσδυσης του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας και της συνεπακόλουθης αντίδρασής του με το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Σημειώνεται, δε, ότι ο δεύτερος μηχανισμός είναι δυνατό να επιταχύνει την εξέλιξη του πρώτου μηχανισμού διάβρωσης. Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου της διάβρωσης εξαρτάται από την συνύπαρξη οξυγόνου ( $\text{O}_2$ ) και νερού ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Το κρίσιμο όριο έναρξης της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα έχει κατά το παρελθόν οριστεί ως ποσοστό συνολικής συγκέντρωσης χλωριόντων επί του βάρους του τσιμέντου και είναι ίσο με 0.4 % για τσιμέντα τύπου Portland και έως 1.0 % για ποζολανικά τσιμέντα [Papadakis (1999), Papadakis (2000), όπως αναφέρονται από τους Αποστολόπουλος κ.ά. (2009)]. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, σε αντίθεση με τα ελεύθερα χλωριόντα που εισέρχονται μέσω των πόρων στη μάζα του σκυροδέματος, τα χημικώς δεσμευμένα χλωριόντα που υπάρχουν στον τσιμεντοπολτό δεν εγκυμονούν κινδύνους για το σκυρόδεμα.

### Τρόποι προστασίας σκυροδέματος / οπλισμού

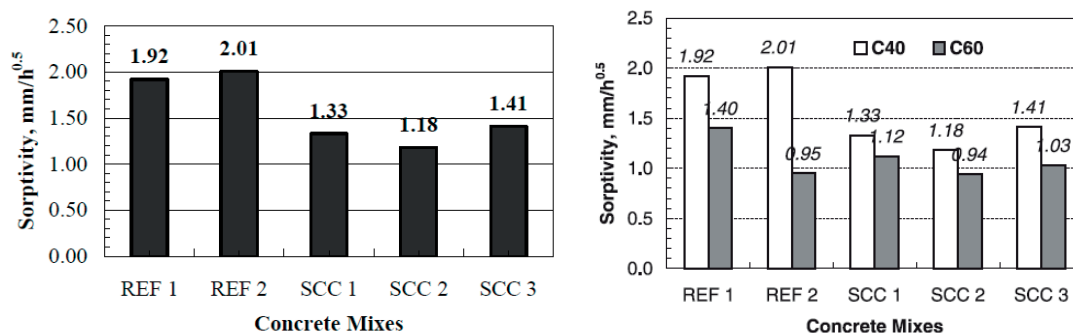
Οι τρόποι προστασίας του οπλισμού έναντι διαβρώσεως δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας Διατριβής, για τον λόγο αυτό αναφέρονται μόνο επιγραμματικά για λόγους πληρότητας. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στην προγενέστερη βιβλιογραφία. Οι τρόποι προστασίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που αφορούν (α) το σκυρόδεμα, ώστε αυτό να καταστεί λιγότερο διαπερατό και περισσότερο ανθεκτικό σε βλαπτικούς παράγοντες που θα οδηγήσουν σε φαινόμενα διάβρωσης του εγκιβωτισμένου οπλισμού και (β) τον χάλυβα, ώστε να έχει τη δυνατότητα να ανθίσταται ή να καθυστερεί σημαντικά τα φαινόμενα διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα:

- Μέθοδοι προστασίας σκυροδέματος:
  - Χρήση κατάλληλων τσιμέντων που περιορίζουν την ικανότητα του σκυροδέματος να δεσμεύει χλωριόντα, η οποία εξαρτάται από την περιεκτικότητα αργλικού άλατος,  $\text{C}_3\text{A}$ .
  - Χρήση ποζολανικών υλικών στο μίγμα, τα οποία συμβάλλουν αφενός στη μείωση του πορώδους, με συνέπεια να δυσχεραίνεται η διείσδυση των χλωριόντων, και αφετέρου στη δέσμευση χλωριόντων από τις ποζολάνες είτε (α) φυσικά, λόγω της προσρόφησης στα τοιχώματα των μικρότερων πόρων των ποζολανικών μιγμάτων είτε (β) χημικά, μέσω της δέσμευσης των χλωριόντων από δραστικά στοιχεία των ποζολάνων όπως το αργλικό υλικό. Σημειώνεται ότι η χρήση ποζολάνης απαιτεί επαρκή συντήρηση για την καλή απόδοση των ευεργετικών χαρακτηριστικών στο τελικό προϊόν. Η διάρκεια συντήρησης, λόγω και της αργής ποζολανικής δράσης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και να φτάνει έως και τις 28 – 90 ημέρες [Güneyisi et al.(2009)].

- επιφανειακή προστασία (πάχος επικάλυψης, πάχος και σύνθεση σοβά, ειδικές χρωστικές ουσίες)
- Μέθοδοι προστασίας οπλισμού:
  - καθοδική προστασία (εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού αντίθετου με το δυναμικό διάβρωσης που καθιστά τον οπλισμό μη οξειδώσιμο).
  - χρήση ειδικών χαλύβων (ανοξειδωτοι ή με επικάλυψη εποξικής ρητίνης).
  - αναστολείς διάβρωσης (κατά την παρασκευή σκυροδέματος).

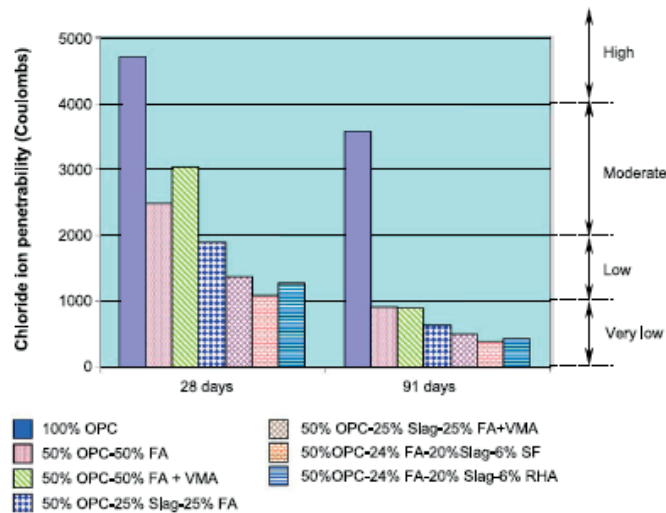
#### 1.3.2.4. Αναλυτική παρουσίαση της βιβλιογραφίας

Οι [Zhu et al. \(2002\)](#) διαπίστωσαν το περιορισμένο πλήθος βιβλιογραφικών αναφορών για την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ. Μελέτησαν την αεροπερατότητα, την τριχοειδή απορρόφηση και τη διάχυση χλωριόντων, ως αντιπροσωπευτικά μεγέθη της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος και συνέκριναν τα αποτελέσματα μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ. Επιπλέον, πραγματοποίησαν μία περιορισμένη διερεύνηση των ιδιοτήτων της μεταβατικής ζώνης μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Από τα αποτελέσματα της έρευνάς τους προέκυψε ότι τα μίγματα ΑΣΣ παρουσίασαν σημαντικά μικρότερη διαπερατότητα και τριχοειδή απορρόφηση (**Σχήμα 45α**), αλλά παρόμοια διάχυση χλωριόντων με μίγματα ΣΣ ίδιας κατηγορίας θλιπτικής αντοχής (C 40), ενώ διαπίστωσαν την θετική επιρροή των πληρωτικών υλικών (φίλερ) σε όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους ανθεκτικότητας του ΑΣΣ εν σχέσει προς μίγματα ΑΣΣ παρασκευασθέντα χωρίς πληρωτικά υλικά αλλά με πρόσθετα τροποποιητικά ιξώδους. Έναν χρόνο αργότερα, οι [Zhu and Bartos \(2003\)](#) δημοσίευσαν τα πλήρη πειραματικά αποτελέσματα από την συγκριτική μελέτη μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ δύο κατηγοριών αντοχής (C 40 και C 60), όπου επιβεβαίωσαν τα ίδια αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω (**Σχήμα 45β**).



**Σχήμα 45** Σύγκριση απορροφητικότητας μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ (α) κατηγορίας αντοχής C40 [πηγή: [Zhu et al. \(2002\)](#)] (β) κατηγοριών αντοχής C40 και C60 [πηγή: [Zhu and Bartos \(2003\)](#)]

Η μελέτη των [Nehdi et al. \(2004\)](#) αποσκοπούσε στην αξιολόγηση της ανθεκτικότητας μιγμάτων ΑΣΣ, παρασκευασθέντων με ανόργανα πρόσμικτα. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, την διείσδυση χλωριόντων σε μίγματα που περιελάμβαναν συνδυασμούς ιπτάμενης τέφρας, σκωρίας υψικαμίνου και πυριτικής παιπάλης, ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υψηλά ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου οδηγούν σε πολύ σημαντική μείωση της διείσδυσης χλωριόντων (**Σχήμα 46**).



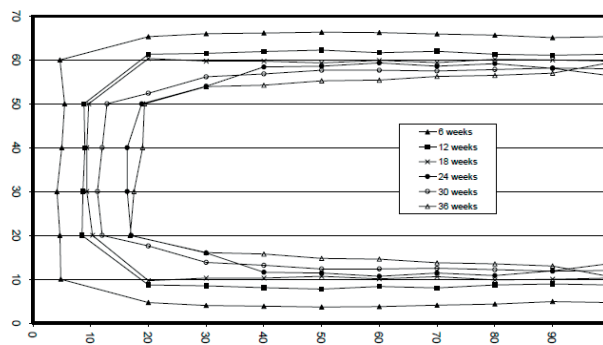
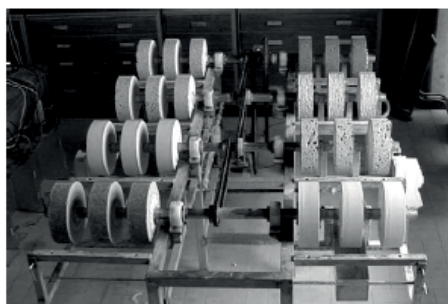
**Σχήμα 46** Διαπερατότητα σε χλωριόντα μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετικά πρόσμικτα σε δύο ηλικίες, 28 και 90 ημέρες [πηγή: Nehdi et al. (2004)]

Ο Persson (2004b) μελέτησε τη διείσδυση χλωριόντων μέσω της μεθόδου CTH (NordTest Build 492) συγκριτικά για το ΑΣΣ το ΣΣ, για τον ίδιο λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) και την ίδια περιεκτικότητα σε αέρα μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος. Συνολικά, ελέγχθηκαν έξι μίγματα ΑΣΣ και δύο μίγματα ΣΣ, με λόγο  $w/c = 0.39$ . Οι παράμετροι που εξετάστηκαν στο πλαίσιο των διεξαχθέντων πειραμάτων αφορούν τη σειρά ανάμιξης των συστατικών (εστιάζοντας στην κατάλληλη στιγμή προσθήκης του λεπτόκοκκου υλικού), την περιεκτικότητα και τον τύπο του λεπτόκοκκου υλικού, την περιεκτικότητα σε αέρα και την υδροστατική πίεση του σκυροδέματος. Από τα αποτελέσματα προέκυψε σημαντική αύξηση (+ 60 %) του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων για μίγματα ΑΣΣ με χρήση ασβεστολιθικού φίλερ εν σχέσει προς το ΣΣ, αλλά σημαντική βελτίωση (- 40 %) για την περίπτωση ενσωμάτωσης ποζολανικών πρόσμικτων. Σημαντική είναι επίσης η βελτίωση με την αύξηση της ηλικίας ελέγχου (- 40 %).

Στην ανακοίνωσή τους σε διεθνές συνέδριο της RILEM, οι Audenaert and De Schutter (2004) δημοσίευσαν τα αποτελέσματα από δοκιμές υδατοπερατότητας που διεξήγαγαν σε δεκαπέντε μίγματα ΑΣΣ και δύο μίγματα ΣΣ. Οι παράμετροι που διερεύνησαν περιελάμβαναν τον τύπο του τσιμέντου (τσιμέντο Πόρτλαντ δύο κατηγοριών αντοχής, συνθετικά τσιμέντα) και του λεπτόκοκκου υλικού (ιπτάμενη τέφρα και ασβεστολιθικό φίλερ δύο διαφορετικών κοκκομετριών), τους λόγους τσιμέντου προς σκόνη ( $c/p$ ) και νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), την περιεκτικότητα σε νερό και σε σκόνη (τσιμέντο και φίλερ). Παρατηρήθηκε ότι η υδατοπερατότητα αυξάνεται για υψηλότερες περιεκτικότητες νερού ή/ και χρήση ασβεστολιθικού φίλερ (έναντι ιπτάμενης τέφρας), ενώ το ΑΣΣ υπερέχει του ΣΣ. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκρίθηκαν με μοντέλα της βιβλιογραφίας που εφαρμόζονται στο ΣΣ [CEB-FIB MC90 (1993), Hedegaard and Hansen (1992), Wong et al. (2001), Tanahashi et al. (1987)] και που βασίζονται σε παραμέτρους, όπως ο λόγος  $w/c$  και η αντοχή του σκυροδέματος, τα οποία φαίνεται να είναι ανεπαρκή για την ορθή εκτίμηση της υδατοπερατότητας στο ΑΣΣ.

Ένα χρόνο αργότερα, οι Audenaert et al. (2005) μελέτησαν την αντοχή σε διείσδυση χλωριόντων του ΑΣΣ, συγκρίνοντας δεκαέξι μίγματα ΑΣΣ με τέσσερα μίγματα ΣΣ. Τα μίγματα ΑΣΣ είχαν διαφορετικές συνθέσεις ως προς τον τύπο τσιμέντου και τον

τύπο του φίλερ. Η πρωτοτυπία της εργασίας συνίσταται στη μεθοδολογία έκθεσης των δοκιμίων σκυροδέματος σε χλωριόντα. Συγκεκριμένα, κυλινδρικά δοκίμια ( $D = 230 \text{ mm}$ ,  $H = 70 \text{ mm}$ ) υπόκεινται σε εναλλασσόμενους κύκλους εμβάπτισης σε διάλυμα χλωριόντων και παραμονής σε αέρα, με διάρκεια κάθε κύκλου περίπου μία ώρα (Σχήμα 47).

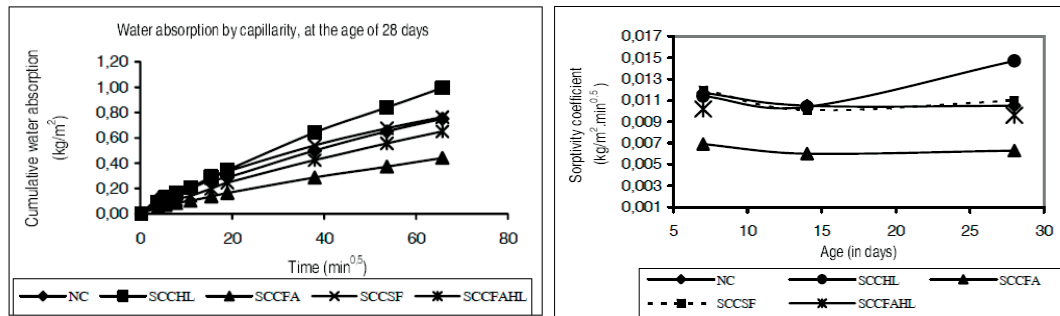


Σχήμα 47 (α) Πειραματική διάταξη κύκλων εμβάπτισης σε διάλυμα χλωριόντων, (β) τυπικό προφίλ βάθους διείσδυσης χλωριόντων σε δοκίμιο [πηγή: Audenaert et al. 2005]

Ο προσδιορισμός της διείσδυσης χλωριόντων πραγματοποιήθηκε σε διάφορες ηλικίες (6, 12, 18, 24, 30 και 36 εβδομάδες). Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν ως προς την επιρροή της περιεκτικότητας σε σκόνη και σε νερό, καθώς και ως προς τους λόγους νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) και τσιμέντου προς σκόνη ( $c/p$ ). Παρατηρήθηκε ότι μικρότεροι λόγοι  $w/c$  και  $c/p$  μειώνουν τη διείσδυση χλωριόντων, ενώ τα ΑΣΣ παρουσιάζουν εν γένει χαμηλότερα βάθη διείσδυσης από τα ΣΣ.

Στη μελέτη των Leemann et al. (2006) διερευνήθηκε η επιρροή της συμπύκνωσης στο πορώδες της μεταβατικής ζώνης, ως βασική παράμετρος για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, μέσω συγκριτικών δοκιμών σε ένα μίγμα ΑΣΣ και δύο μίγματα ΣΣ., με χρήση οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Επιπροσθέτως, διερευνήθηκαν η αεροπερατότητα και η υδατοπερατότητα. Παρατηρήθηκε ότι τόσο το πορώδες, όσο και το πάχος της μεταβατικής ζώνης ήταν μεγαλύτερα στην περίπτωση του ΣΣ, ενώ αντίστοιχα μετρήθηκαν υψηλότερες τιμές για την αεροπερατότητα και την υδατοπερατότητα εν σχέσει προς το ΑΣΣ.

Ως μέτρο εκτίμησης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, οι De Oliveira et al. (2006) μελέτησαν την απορροφητικότητα σε μίγματα ΑΣΣ, παρασκευασμένα με διαφορετικά πρόσμικτα, και συνέκριναν τα αποτελέσματα με το ΣΣ. Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν πρόσμικτα, όπως ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, υδραυλική άσβεστος και ένας συνδυασμός ιπτάμενης τέφρας και υδραυλικής ασβέστου. Ως πρόσθετη παράμετρος μελετήθηκε η ηλικία των δοκιμίων και, συγκεκριμένα, η απορροφητικότητα στις 7, 14 και 28 ημέρες. Η καλύτερη συμπεριφορά παρατηρήθηκε στα μίγματα ΑΣΣ με χρήση ιπτάμενης τέφρας, είτε αποκλειστικά είτε σε συνδυασμό με υδραυλική άσβεστο, με τη διαφορά ότι για τη δεύτερη περίπτωση η βελτίωση ήταν ορατή κυρίως στην ηλικία των 28 ημερών. Η χρήση πυριτικής παιπάλης στα μίγματα ΑΣΣ οδήγησε σε παρεμφερή απορροφητικότητα με το ΣΣ (Σχήμα 48), αποτέλεσμα που αποδόθηκε σε ασυμβατότητα του υπερρυστοποιητή με την πυριτική παιπάλη που δεν εξισορροπήθηκε, όπως θα έπρεπε κατά τους συγγραφείς, μέσω μιας απαιτούμενης αύξησης του λόγου νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) για την ίδια στάθμη εργασιμότητας.



**Σχήμα 48** (α) Αθροιστική υδαταπορρόφηση, (β) απορροφητικότητα συναρτήσει της ηλικίας για μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα διαφορετικών τύπων [πηγή: De Oliveira et al. (2006)]

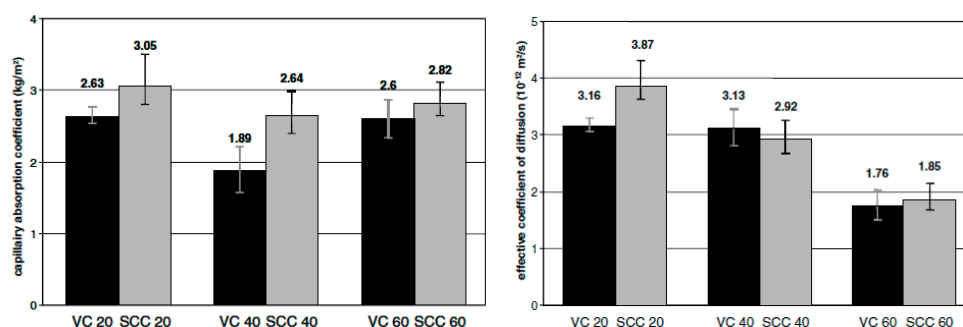
Οι Heirman et al. (2006) προσδιόρισαν πειραματικά τον συντελεστή διάχυσης χλωριόντων μέσω δοκιμών σταθερής και μη σταθερής κατάστασης και την ενανθράκωση σε οκτώ μίγματα ΑΣΣ και ένα μίγμα αναφοράς ΣΣ. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμών σταθερής και μη σταθερής κατάστασης για τον προσδιορισμό των χλωριόντων, που πραγματοποιήθηκαν βάσει των προτύπων NordTest Build 355 (1997) και NordTest Build 492 (1999) αντίστοιχα, προέκυψε ότι η δεύτερη μέθοδος είναι πολύ πιο αξιόπιστη και εμφανίζει σημαντικά πιο περιορισμένα προβλήματα εφαρμογής. Τα προβλήματα που παρουσίασε η πρώτη μέθοδος αφορούσαν είτε στην παρουσία διάβρωσης των ηλεκτροδίων είτε στην μη διείσδυση των χλωριόντων ακόμα και μετά από μεγάλο διάστημα και δεν κατέστη δυνατό να ερμηνευθούν τα αίτια που οδήγησαν σε αυτά. Ένα άλλο σημαντικό εύρημα σχετίζεται με την επιρροή της σύνθεσης στο συντελεστή διάχυσης και, συγκεκριμένα, της επίδρασης του λόγου νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), του τύπου σκυροδέματος και των αδρανών, καθώς και του τύπου πρόσμικτου που ενσωματώνεται στο μίγμα. Ειδικά για τον λόγο  $w/c$ , προέκυψε ότι μεγαλύτεροι λόγοι οδηγούν σε υψηλότερους συντελεστές διάχυσης χλωριόντων. Τέλος, σημειώθηκε ότι η υψηλή θλιπτική αντοχή μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη πυκνότερης μικροδομής και, συνεπώς, χαμηλότερου συντελεστή διάχυσης χλωριόντων.

Στο πλαίσιο της μελέτης των Loser and Leemann (2007) πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων σε μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση σε χλωριόντα εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου πρόσμικτου και από τον λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), συνεπώς και με τη θλιπτική αντοχή. Για την ίδια θλιπτική αντοχή τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές, οδηγώντας σε συντελεστές διάχυσης ίδιας τάξης μεγέθους, ενώ σημειώθηκε ότι οι διαδικασίες που εφαρμόζονται στο ΑΣΣ μπορούν να εφαρμοστούν και στο ΣΣ.

Το 2007, η Τεχνική Επιτροπή 205-DSC της RILEM δημοσίευσε την τελική έκθεση [RILEM Report 38 (2007)] που αφορά στην ανθεκτικότητα του ΑΣΣ, τα κυριότερα συμπεράσματα της οποίας δημοσιεύθηκαν σε έγκριτο επιστημονικό περιοδικό ένα χρόνο αργότερα [RILEM TC 205-DSC (2008)]. Ο σχολιασμός της Επιτροπής αφορά σε παραμέτρους, όπως η ενανθράκωση, η διείσδυση χλωριόντων, η αντίσταση σε παγετό, σε θειικά, σε πυρκαγιά, κ.λπ. και γίνεται υπό το πρίσμα της διαφορετικής σύνθεσης του ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ. Η δομή του ΑΣΣ διαφέρει από το ΣΣ ως προς την ενσωμάτωση λεπτόκοκκων υλικών (πρόσμικτα), την υψηλότερη περιεκτικότητα υπερρευστοποιητών και την απουσία μηχανικής συμπύκνωσης. Όπως

και στο ΣΣ, οι μηχανισμοί μεταφοράς επιθετικών ουσιών στο ΑΣΣ επηρεάζονται από τον λόγο νερού προς τσιμέντο, τον βαθμό ενυδάτωσης και τα πρόσμικτα. Η αεροπερατότητα και η υδατοπερατότητα είναι σημαντικά μικρότερες στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, για τον ίδιο λόγο  $w/c$  και για την ίδια κατηγορία αντοχής, αν και σημειώνεται ότι τα μεγέθη είναι πολύ ευαίσθητα στον τύπο του τσιμέντου και του πρόσμικτου που, κατά περίπτωση, χρησιμοποιούνται.

Οι Assié et al. (2007) διερεύνησαν το θέμα της ανθεκτικότητας του ΑΣΣ, ως προς τις φυσικοχημικές ιδιότητες του σκυροδέματος που θεωρούνται απαραίτητες για τον περιορισμό της πιθανότητας διάβρωσης των οπλισμών. Η σύγκριση της «δυνητικής» ανθεκτικότητας με το ΣΣ πραγματοποιήθηκε στη βάση ίδιας κατηγορίας αντοχής (από 20 έως 60 N/mm<sup>2</sup>), η οποία επετεύχθη χρησιμοποιώντας τις ίδιες πρώτες ύλες και σε παρόμοιες περιεκτικότητες και για τους δύο τύπους σκυροδέματος. Ως παράμετροι ανθεκτικότητας μελετήθηκαν, μεταξύ άλλων, το πορώδες, η τριχοειδής απορρόφηση και η διάχυση χλωριόντων. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε ότι οι εν λόγω δοκιμές οδηγούν σε παρεμφερή αποτελέσματα για τους δύο τύπους σκυροδέματος και, επομένως, η ανθεκτικότητα μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη μεταξύ του ΑΣΣ και του ΣΣ, ειδικά ως προς την απορροφητικότητα και την αντίσταση σε διάχυση χλωριόντων (Σχήμα 49).



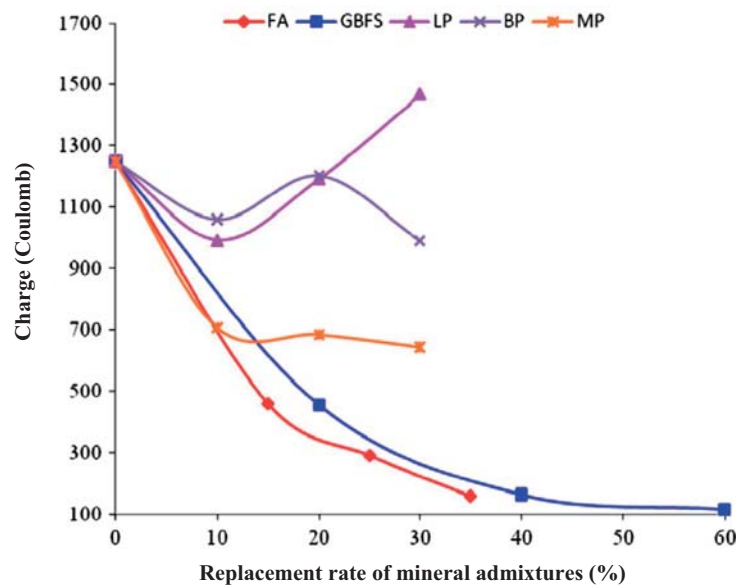
Σχήμα 49 (α) Απορροφητικότητα και (β) συντελεστής διάχυσης χλωριόντων συναρτήσει της κατηγορίας αντοχής μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ [πηγή: Assié et al. (2007)]

Σημειώνεται ότι η ισοδυναμία μεταξύ των μιγμάτων επιτυγχάνεται μέσω κοινού λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), ενώ ο αντίστοιχος λόγος νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) είναι αρκετά υψηλότερος στο ΑΣΣ.

Στο άρθρο των Boel et al. (2007) πραγματοποιείται μία διερεύνηση της ανθεκτικότητας μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ. Συγκεκριμένα, οκτώ μίγματα ΑΣΣ με χρήση ιπτάμενης τέφρας και ασβεστολιθικού φίλερ ελέγχθηκαν συγκριτικά με ένα μίγμα ΣΣ, μέσω δοκιμών που αφορούσαν στη μεταφορά αέρα ή νερού διαμέσου του δικτύου πόρων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν περιελάμβαναν τον λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), τον λόγο τσιμέντου προς σκόνη ( $c/p$ ), τον τύπο του χρησιμοποιούμενου πρόσμικτου (ιπτάμενη τέφρα ή ασβεστολιθικό φίλερ), τον τύπο των αδρανών και τον τύπο του τσιμέντου (με ή χωρίς ενσωμάτωση σκωρίας υψικαμίνου). Μέσω δοκιμών υδατοπερατότητας, τριχοειδούς απορρόφησης κ.ά., βελτιωμένη ανθεκτικότητα παρατηρήθηκε για χρήση ιπτάμενης τέφρας (έναντι ασβεστολιθικού φίλερ), για χαμηλότερους λόγους  $w/c$  και  $c/p$  (για σταθερό λόγο  $w/c$ ). Οι διαφορές αποδόθηκαν γενικώς στη διαφορετική δομή του πορώδους μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ.



Οι Audenaert et al. (2010) διερεύνησαν την επιρροή της ηλικίας του σκυροδέματος στον συντελεστή διάχυσης χλωριόντων, βάσει της μεθόδου NordTest Build 492 (1999). Συγκεκριμένα, μελέτησαν την επίδραση του τύπου και της περιεκτικότητας του τσιμέντου και του πρόσμικτου, καθώς και την περιεκτικότητα σε νερό, σε δεκαέξι μίγματα ΑΣΣ και τέσσερα μίγματα ΣΣ. Η διερεύνηση της επιρροής της σύνθεσης πραγματοποιήθηκε μέσω μετρήσεων του τριχοειδούς πορώδους, υψηλές τιμές του οποίου οδηγούν σε μειωμένους συντελεστές ηλικίας που συνεπάγονται υψηλούς συντελεστές διάχυσης χλωριόντων. Παρατηρήθηκε ότι για ίδιο τύπο τσιμέντου και λόγο νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ), τα μίγματα ΑΣΣ δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές με τα μίγματα ΣΣ ως προς τον συντελεστή διάχυσης. Συνολικά, παρατηρήθηκε ότι η σύνθεση παίζει σημαντικό ρόλο στον συντελεστή διάχυσης, η επιρροή όμως αυτή μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω του τριχοειδούς πορώδους.

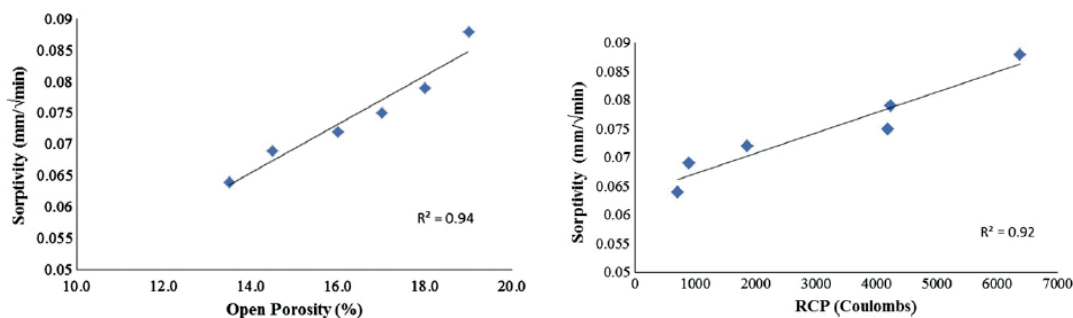


**Σχήμα 50** Ηλεκτρικό φορτίο, ως δείκτης ικανότητας αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από διάφορα πρόσμικτα [πηγή: Uysal et al. (2012)]

Στην μελέτη των Uysal et al. (2012) διερευνήθηκε η επιρροή των ανόργανων πρόσμικτων στις μηχανικές ιδιότητες, την διείσδυση χλωριόντων και τη διαπερατότητα του ΑΣΣ. Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, ασβεστολιθικό φίλερ, σκόνη βασάλτη και μαρμαρόσκονη. Παρατηρήθηκε ότι το πλέον δραστικό πρόσμικτο, το οποίο απέδωσε στο μίγμα σημαντικά βελτιωμένες ρεολογικές ιδιότητες και αυξημένη ανθεκτικότητα, ήταν η ιπτάμενη τέφρα, ενώ τα πλέον βελτιωμένα χαρακτηριστικά επετεύχθησαν μέσω συνδυασμών πρόσμικτων. Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων αυξήθηκε σημαντικά, ιδιαίτερα όμως για την περίπτωση χρήσης ποζολανικών πρόσμικτων (Σχήμα 50). Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η διαπερατότητα αυξανόταν για μεγαλύτερες περιεκτικότητες πρόσμικτων.

Οι Kanellopoulos et al. (2012) διερεύνησαν την ανθεκτικότητα ΑΣΣ μέσω δοκιμών τριχοειδούς απορρόφησης, εκτίμησης του πορώδους και την διαπερατότητας σε χλωριόντα, ενώ συνέκριναν τα αποτελέσματα με αντίστοιχες δοκιμές στο ΣΣ. Παρατηρήθηκε ότι υψηλές περιεκτικότητες λεπτόκκοκων υλικών στο ΑΣΣ βελτιώνουν τη δομή του πορώδους και βελτιώνουν την ανθεκτικότητα του υλικού, ακόμα και για μεγάλες περιεκτικότητες νερού. Η χρήση ποζολανικών πρόσμικτων

βελτιώνει περαιτέρω την ανθεκτικότητα, λόγω της καλύτερης στοίβαξης των προϊόντων της ποζολανικής αντίδρασης στη μικροδομή. Η πυριτική παιπάλη μειώνει λιγότερο το ανοιχτό πορώδες και την τριχοειδή απορρόφηση, σε αντίθεση με τη σημαντική μείωση που προκαλεί στην αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε η ύπαρξη γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τριών εξετασθεισών παραμέτρων ανθεκτικότητας (Σχήμα 51), γεγονός που επιτρέπει την ταχεία εκτίμηση της ανθεκτικότητας βάσει των απλούστερων και λιγότερο χρονοβόρων δοκιμών. Σημειώνεται, πάντως, ότι η χρήση διαφορετικού τύπου πρόσμικτων μπορεί να μεταβάλει αυτές τις συσχετίσεις.



Σχήμα 51 Συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών δεικτών ανθεκτικότητας  
[πηγή: Kanellopoulos et al. (2012)]

## Πυριτική παιπάλη

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στη διαθέσιμη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος διαθέσιμων τεχνικών οδηγιών και προδιαγραφών [ACI 237R (2007), ACI 234R (2006), *Advanced Concrete Technology 1* (2003)], οι οποίες περιγράφουν τις ιδιότητες της πυριτικής παιπάλης και την επιρροή της στο σκυρόδεμα.

Γενικώς, έχει αποδειχθεί ότι οι μικροί και σφαιρικοί κόκκοι της πυριτικής παιπάλης οδηγούν σε μια μείωση της τριβής μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων του τσιμεντού, με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως λιπαντικό της πάστας [ACI 237R (2007)]. Η θετική επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μηχανικά χαρακτηριστικά και την ανθεκτικότητα του ΣΣ έχει αναφερθεί σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες [Song et al. (2010), Khan and Siddique (2011)], ενώ ορισμένες αναφορές της βιβλιογραφίας είναι ιδιαίτερος προσανατολισμένες στο ΑΣΣ [Hassan et al. CCC (2012a), Mohamed (2011)]. Η θετική αυτή επίδραση συνίσταται στη βελτιωμένη δομή του πορώδους με λιγότερους και μικρότερους πόρους, λόγω της ποζολανικής αντίδρασης με το ελεύθερο ασβέστιο που προκύπτει από την ενυδάτωση του τσιμεντού, που οδηγεί σε μείωση του υδροξειδίου του ασβεστίου,  $Ca(OH)_2$  και τη δημιουργία ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH), βελτιώνοντας τη ζώνη μετάβασης μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των αδρανών [Song et al. (2010), Siddique and Khan (2011)]. Έτσι, η πυριτική παιπάλη οδηγεί σε ανθεκτικότερο και υψηλότερης αντοχής σκυρόδεμα με σημαντικά μειωμένη διαπερατότητα, μειωμένους ρυθμούς μεταφοράς νερού και επιθετικών παραγόντων (χλωριόντα, θειικά, διοξείδιο του άνθρακα, κ.ά.), καθώς και βελτιωμένη ηλεκτρική αντίσταση [ACI 234R (2006), *Advanced Concrete Technology 1* (2003), Song et al. (2010), Siddique and Khan (2011)], ειδικά για ποσοστά άνω του 5 %. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι η διαπερατότητα μειώνεται σημαντικά για ποσοστά αντικατάστασης του τσιμεντού από πυριτική παιπάλη μεταξύ 8 και 12 %. Για υψηλότερα ποσοστά, η διαπερατότητα είναι οριακά αποδεκτή και, σε κάποιες περιπτώσεις, αυξημένη, ειδικά για μεγάλους λόγους νερού προς συνδετικό

υλικό ( $w/b$ ). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η βέλτιστη απόδοση μιγμάτων με πυριτική παιπάλη μπορεί να επιτευχθεί μόνο ύστερα από καλή συντήρηση [Advanced Concrete Technology 1 (2003), Mohamed (2011)].

Στην εισήγησή τους, οι Perumal and Sundararajan (2004) μελέτησαν την επίδραση της πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου σε σκυρόδεμα υψηλής επιτελεσματικότητας, κατηγορίας αντοχής 60, 70 και 110 N/mm<sup>2</sup>, τόσο από την πλευρά των αντοχών όσο και από την πλευρά της ανθεκτικότητας. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν περιελάμβαναν τις αντοχές σε θλίψη, σε έμμεσο εφελκυσμό (από διάρρηξη) και σε κάμψη, το μέτρο ελαστικότητας, την υδαταπορροφητικότητα, και το πορώδες, σε ηλικία 28 ημερών. Παρατηρήθηκε ότι, για τη βελτιστοποίηση όλων των παραπάνω μεγεθών, το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη ήταν 10 %. Σημειώθηκε ότι, σε συνδυασμό με χαμηλό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), η πυριτική παιπάλη μείωσε σημαντικά την διαπερατότητα του σκυροδέματος. Η θετική επίδραση της πυριτικής παιπάλης αποδόθηκε τόσο στην ποζολανική της δράση, όσο και στην επίδρασή της ως λεπτόκοκκο υλικό (filler effect), χαρακτηριστικά τα οποία συνεισφέρουν στη δημιουργία μία κλειστής δομής πορώδους, με μικρούς και ασυνεχείς πόρους.

Οι Siddique and Khan (2011) περιέγραψαν αναλυτικά τις φυσικοχημικές ιδιότητες και τον τρόπο δράσης της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα. Ως κύρια πλεονεκτήματα που ανακύπτουν από τη χρήση της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα, αναφέρθηκαν η υψηλή θλιπτική αντοχή σε μικρές ηλικίες, η υψηλή εφελκυστική και καμπτική αντοχή, το υψηλό μέτρο ελαστικότητας και η υψηλή αντοχή σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Όσο αφορά σε θέματα ανθεκτικότητας, τονίστηκε η υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και η χαμηλή διαπερατότητα τόσο σε νερό, όσο και σε άλλους βλαβερούς παράγοντες, όπως χλωριόντα, οξέα, νιτρικά και θειικά.

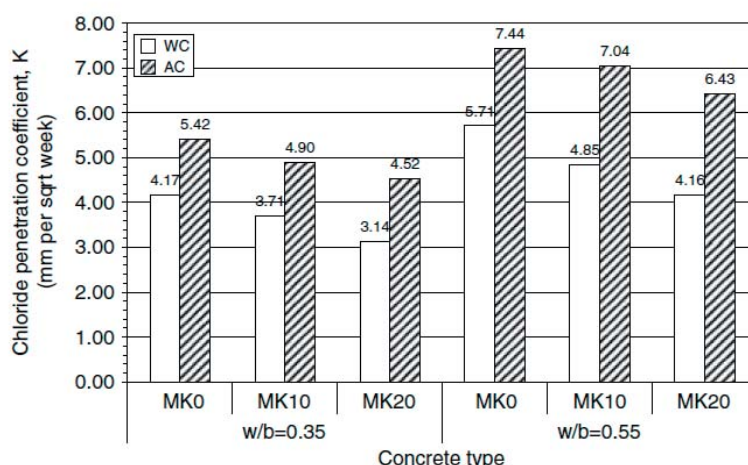
Σε άλλη δημοσίευσή τους, οι Khan and Siddique (2011) πραγματοποίησαν μία ανασκόπηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος που σχετίζονται ειδικά με την ανθεκτικότητα για μίγματα που περιλαμβάνουν πυριτική παιπάλη. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν η διαπερατότητα, η αντοχή σε κύκλους ψύξης και απόψυξης, η διάβρωση, η αντίσταση σε θειικά, η ενανθράκωση και η αντοχή στη χημική αντίδραση αλκαλίων και αδρανών του σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε ότι η σημαντικότερη συμβολή της πυριτικής παιπάλης συναντάται στην αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, γεγονός που αποδόθηκε στην βελτίωση της δομής των πόρων (σμίκρυνση μεγάλων πόρων) λόγω της ποζολανικής δράσης της πυριτικής παιπάλης. Με εξαίρεση το βάθος ενανθράκωσης, όλα τα υπόλοιπα μεγέθη που εξετάστηκαν βελτιώθηκαν.

## Μετακαολίνης

Ο μετακαολίνης είναι ένα σχετικά νέο πρόσμικτο που έχει, πάντως, χρησιμοποιηθεί επιτυχώς τα τελευταία χρόνια για την παρασκευή ΑΣΣ [Hassan et al. (2010), Mandandoust and Mousavi (2012)]. Ο μετακαολίνης είναι μια εξαιρετικά λεπτή ποζολάνη, η οποία παράγεται από την ξήρανση καθαρού καολινίτη με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (650 έως 800 °C), που αποσκοπεί στην καταστροφή της κρυσταλλικής δομής και την απομάκρυνση του χημικώς δεσμευμένου νερού. Η χρήση μετακαολίνης είναι γνωστό ότι βελτιώνει σημαντικά τη δομή των πόρων και μειώνει το υδροξείδιο του ασβεστίου,  $Ca(OH)_2$ , της τσιμεντόπαστας, λόγω του

υψηλότερου βαθμού καθαρότητάς του, της ποζολανικότητας και της λεπτότερης κοκκομετρίας. Ο μετακαολίνης αντιδρά με το  $Ca(OH)_2$  που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, δημιουργώντας πρόσθετα προϊόντα (δευτερεύουσα γέλη ένυδρου πυριτικού ασβεστίου CHS) [Siddique and Klaus (2009), Badogiannis et al. (2005), Badogiannis et al. (2004)] τα οποία μεταβάλλουν τη μικροδομή του σκυροδέματος και βελτιώνουν την ανθεκτικότητά του και, ειδικότερα, το πορώδες, την διαπερατότητα σε αέρα ή σε χλωριόντα, κ.λπ.. Περισσότερες και πιο λεπτομερείς πληροφορίες για τον μετακαολίνη μπορούν να βρεθούν στην Παρ. 1.2.2.2.

Σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες [Brooks and Johari (2001), Güneyisi et al. (2008), Qian and Li (2001), Li and Ding (2003), Poon et al. (2006), Ding and Li (2002), Badogiannis and Tsivilis (2009), Ramezaniapour and Jovein (2012), Sabir et al. (2001), Siddique and Klaus (2009)] έχει μελετηθεί η χρήση του μετακαολίνης στο ΣΣ, ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου. Αντίστοιχες εργασίες έχουν δημοσιευθεί για το ΑΣΣ [Melo and Carneiro (2010), Hassan et al. (2010), Hassan et al. (2012a), Madandoust and Mousavi (2012)]. Η χρήση του μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης άλλων συστατικών του σκυροδέματος, όπως η άμμος ή το ασβεστολιθικό φίλερ που συχνά χρησιμοποιείται στο ΑΣΣ, δεν έχουν επαρκώς διερευνηθεί.



**Σχήμα 52** Επιρροή διαφορετικών ποσοστών αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη για διαφορετικούς λόγους νερού προς συνδετικό υλικό και για διαφορετικές μεθόδους συντήρησης στον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων [πηγή: Güneyisi and Mermerdaş (2007)]

Οι Güneyisi and Mermerdaş (2007) πραγματοποίησαν μία συγκριτική μελέτη σε μίγματα ΣΣ με ενσωμάτωση μετακαολίνης, τα οποία είχαν συντηρηθεί είτε στον αέρα είτε σε νερό. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η θλιπτική αντοχή, η απορροφητικότητα και η διείσδυση χλωριόντων. Ο μετακαολίνης χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου, σε ποσοστά από 0 έως 20 %, ενώ χρησιμοποιήθηκαν δύο λόγοι νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), 0.35 και 0.55. Παρατηρήθηκε ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνης αύξησε σημαντικά τη θλιπτική αντοχή, ενώ μείωσε οριακά την απορροφητικότητα και τη διαπερατότητα σε χλωριόντα (Σχήμα 52). Διαπιστώθηκε ότι τα μεγέθη εξαρτώνται από το ποσοστό αντικατάστασης, τον λόγο  $w/b$ , τις συνθήκες συντήρησης και, ειδικά για την περίπτωση της διαπερατότητας σε χλωριόντα, τη διάρκεια έκθεσης. Σε συνθήκες ανεπαρκούς ή κακής συντήρησης, σημειώθηκε σημαντικότερη απώλεια αντοχής και ανθεκτικότητας στα μίγματα με μετακαολίνη.

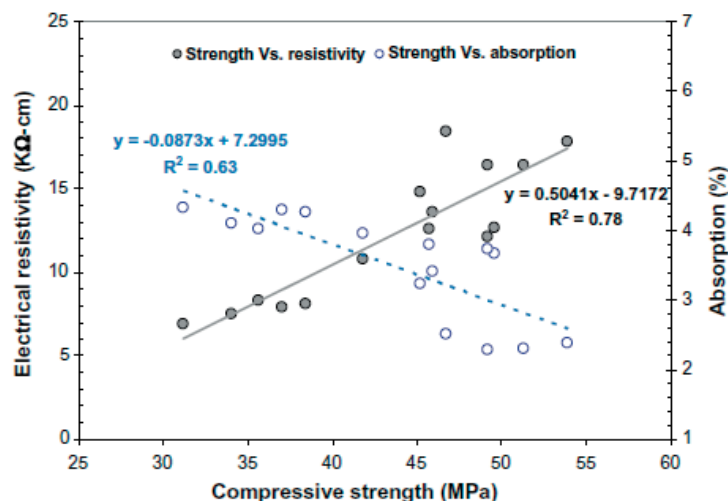
Μέσω της ενσωμάτωσης μετακαολίνη σε μίγματα σκυροδέματος, ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου, οι [Güneyisi et al. \(2008\)](#) πέτυχαν τη βελτίωση της αντοχής, της συστολής ξήρανσης και της δομής του πορώδους. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν δύο ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη, 10 και 20 %, σε μίγματα με δύο λόγους νερού προς τσιμεντοειδή υλικά ( $w/cm$ ), 0.35 και 0.55. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν περιελάμβαναν την θλιπτική και την έμμεση εφελκυστική (μέσω διάρρηξης) αντοχή, την υδαταπορροφητικότητα, τη συστολή ξήρανσης και το πορώδες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ηλικίες έως 120 ημέρες. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνη μειώνει σημαντικά τη συστολή ξήρανσης, ενώ αυξάνει τις αντοχές έως και 30 % εν σχέσει προς το μίγμα αναφοράς (χωρίς μετακαολίνη). Η εν λόγω αύξηση εξαρτάται από το ποσοστό αντικατάστασης, τον λόγο  $w/cm$  και την ηλικία. Παράλληλα, η δομή του πορώδους βελτιώνεται σημαντικά, μειώνοντας τον όγκο των μεγάλων πόρων, αλλά και το συνολικό πορώδες, καθιστώντας το σκυρόδεμα λιγότερο διαπερατό, ειδικά για το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 20 %.

Στο άρθρο των [Siddique and Klaus \(2009\)](#) πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση παλαιότερων εργασιών για την επιρροή της χρήσης μετακαολίνη στο ΣΣ, ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου. Τα θέματα που αξιολογήθηκαν περιελάμβαναν τις ιδιότητες νωπού σκυροδέματος και τις ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος (μέγεθος πόρων, υδαταπορροφητικότητα, θλιπτική, εφελκυστική και καμπτική αντοχή, ερπυσμός, συστολή, κ.ά.). Στο πλαίσιο της αξιολόγησης, μελετήθηκε επίσης η επιρροή σε θέματα ανθεκτικότητας (διάχυση χλωριόντων, αντοχή σε θειικά, αλκαλοπυριτική αντίδραση, αντοχή σε διάβρωση). Συνοψίζοντας τα ευρήματα από την εν λόγω μελέτη, βρέθηκε ότι ο μετακαολίνης βελτιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά σε μικρές ηλικίες, καθώς επίσης και τις αντοχές εν χρόνω. Η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου από μετακαολίνη εμφανίζει ευεργετική δράση, ως προς την διαπερατότητα του σκυροδέματος σε νερό ή βλαβερές ουσίες, γεγονός που αποδίδεται στην βελτιωμένη δομή του πορώδους. Γενικά, ως πιο αποδοτικά προτείνονται ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου μεταξύ 10 και 15 % κ.β.

Οι [Hassan et al. \(2012a\)](#) μελέτησαν την επίδραση του μετακαολίνη στην ανθεκτικότητα μιγμάτων ΑΣΣ και τη συνέκριναν με την αντίστοιχη επίδραση της πυριτικής παιπάλης. Ως παράμετροι ανθεκτικότητας ελέγχθηκαν η συστολή ξήρανσης, η επίδραση κύκλων ψύξης και απόψυξης και τα αντιπαγωτικά άλατα, καθώς και η διείδυση χλωριόντων. Παρατηρήθηκε ότι η ανθεκτικότητα του ΑΣΣ βελτιώνεται αισθητά με τη χρήση μεγαλύτερων ποσοστών αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη, με την θετική αυτή επίδραση να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της πυριτικής παιπάλης για τα περισσότερα μεγέθη. Η μέγιστη ανθεκτικότητα επετεύχθη για ποσοστά μετακαολίνη κοντά στο 20 %, όπου ειδικά για τη διείδυση χλωριόντων, παρατηρήθηκε μία μείωση κατά περίπου 90 %. Σημειώνεται, πάντως, ότι για ποσοστά αντικατάστασης μικρότερα του 11 % η πυριτική παιπάλη είχε θετικότερη επίδραση στη διείδυση χλωριόντων εν σχέσει με τον μετακαολίνη στα ίδια ποσοστά αντικατάστασης.

Στη μελέτη των [Madandoust and Mousavi \(2012\)](#) διερευνήθηκαν οι ιδιότητες μιγμάτων ΑΣΣ με χρήση μετακαολίνη. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν δεκαπέντε μίγματα ΑΣΣ με χρήση μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου, σε ποσοστά από 0 έως 20 %, με τρεις διαφορετικούς λόγους νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), 0.32, 0.38 και 0.45. Μεταξύ άλλων

δοκιμών που αφορούσαν τις ιδιότητες νωπού σκυροδέματος και τις αντοχές, εκτιμήθηκε η ανθεκτικότητα μέσω δοκιμών απορροφητικότητας και ηλεκτρικής αντίστασης. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προέκυψε ότι οι παράμετροι ανθεκτικότητας βελτιστοποιούνται για ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη ίσο με 10 %. Ειδικά για μικρούς λόγους  $w/b$ , παρατηρήθηκε ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνη μειώνει την απορροφητικότητα και αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η σχέση μεταξύ τόσο ηλεκτρικής αντίστασης όσο και της απορροφητικότητας με τη θλιπτική αντοχή είναι γραμμική (Σχήμα 53).



Σχήμα 53 Συσχετίσεις ηλεκτρικής αντίστασης και απορροφητικότητας με τη θλιπτική αντοχή [πηγή: Madandoust and Mousavi (2012)]

#### 1.4. Γενικά στοιχεία για επαναληψιμότητα - αναπαραγωγιμότητα

Η ευρωστία (robustness) ενός μίγματος μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του υλικού να διατηρεί τις ρεολογικές του ιδιότητες, ανεξαρτήτως των τυχόν μικρών αλλαγών στην περιεκτικότητα των συστατικών του μίγματος [ACBM (2007)]. Τα μίγματα ΑΣΣ, λόγω της πιο περίπλοκης σύνθεσής τους, που συνίσταται στην ενσωμάτωση συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών (supplementary cementitious materials, SCM) ή ανόργανων πρόσμικτων, καθώς επίσης στις υψηλές δόσεις χημικών πρόσθετων, μπορεί να είναι πιο ευάλωτα σε μεταβολές συμπεριφοράς εν σχέσει προς τα μίγματα ΣΣ.

Στο σημείο αυτό, τονίζεται ότι πριν την εφαρμογή του ευρωπαϊκού προτύπου EN 206-1 (2000), τα βασικά κριτήρια παραγωγής και αποδοχής μιγμάτων σκυροδέματος περιελάμβαναν την κατηγορία θλιπτικής αντοχής και κατηγορία κάθισης. Σήμερα, έχουν τεθεί πιο περίπλοκα κριτήρια, όπως η υδαταπορροφητικότητα και η διείδυση χλωριόντων. Ειδικά για την περίπτωση του ΑΣΣ, συμπληρωματικά κριτήρια που σχετίζονται με τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, όπως η ικανότητα ροής, η διελευσιμότητα και η απόμιξη, έχουν ενσωματωθεί στη διαδικασία σχεδιασμού του μίγματος, σύμφωνα με το πιο πρόσφατο μέρος 9 [EN 206-9 (2010)], το οποίο ενσωματώθηκε στη νέα έκδοση του κύριου μέρους [EN 206 (2013)]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ευαισθησία του ΑΣΣ σε όρους των συστατικών του υλικών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την διασφάλιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η ποιότητα αυτή μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο βασικές κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία αφορά στην επαναληψιμότητα των δοκιμών (repeatability) σε δείγμα που προκύπτει από το ίδιο μίγμα σκυροδέματος και συχνά αναφέρεται στα διάφορα πρότυπα που περιγράφουν τις δοκιμές ελέγχου. Η δεύτερη κατηγορία αφορά στην αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών (reproducibility) μεταξύ δειγμάτων που προκύπτουν από διαφορετικά μίγματα που παρήχθησαν βάσει της ίδιας σύνθεσης εντός του ίδιου εργαστηρίου ή παρεμφερούς σύνθεσης μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων. Είναι προφανές ότι, αν και δε γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των δύο περιπτώσεων, οι διαφορές τόσο στις ιδιότητες του νωπού, όσο και του σκληρυμένου ΑΣΣ αναμένεται να είναι σημαντικές. Όπως και στην επαναληψιμότητα, τα διάφορα πρότυπα δοκιμών ελέγχου αναφέρουν, αν και σπανιότερα, την αποδεκτή αναπαραγωγιμότητα.

Ένας σημαντικός προβληματισμός που ανακύπτει από την αναφορά αυτών των μεγεθών στα διάφορα πρότυπα σχετίζεται με την ουσιαστική δυνατότητα αναπαραγωγής μιγμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων ή ακόμα και χωρών, όπου πλήθος παραγόντων είναι διαφορετικοί. Τέτοιοι παράγοντες αποτελούν τα συστατικά υλικά, με έμφαση στα αδρανή (τύπος, προέλευση, κοκκομετρία, φυσικές και χημικές ιδιότητες), τα πρόσμικτα (λεπτότητα, δραστηκότητα) και τα χημικά πρόσθετα (δραστηκότητα), τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανών δοκιμών (μέγιστη δυναμικότητα, άλλες παράμετροι), αλλά και ο χειριστής (διαφορετικότητα εφαρμογής, σφάλμα παρατήρησης).

Σημειώνεται ότι τα περισσότερα πρότυπα που αφορούν σε δοκιμές ιδιοτήτων νωπού ΑΣΣ αναφέρουν συντελεστές επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας, όπως αυτοί προέκυψαν από σχετικό Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Έρευνας (European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580: Testing SCC), τα ευρήματα του οποίου δημοσιεύθηκαν ένα χρόνο αργότερα [De Schutter (2005), ACMC (2005)]. Όσο αφορά στο σκληρυμένο ΑΣΣ, τα ευρήματα είναι εξαιρετικά περιορισμένα. Ενώ η επαναληψιμότητα συχνά αναφέρεται ως διασπορά (scatter) μεταξύ αποτελεσμάτων που προκύπτουν από δίδυμα δοκίμια, η αναπαραγωγιμότητα του ΑΣΣ είτε εντός του ίδιου εργαστηρίου είτε μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων δε διαθέτει σημαντικό ερευνητικό υπόβαθρο.





# 2

---

## Υλικά, Συνθέσεις & Δοκιμές – Ρεολογικές Ιδιότητες & Μηχανικά Χαρακτηριστικά

### Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται αρχικά μία αναλυτική περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και των συνθέσεων Αυτοσυμπυκνούμενου και Συμβατικού Σκυροδέματος (ΑΣΣ και ΣΣ, αντίστοιχα) που παρασκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά οι εργαστηριακές δοκιμές που διεξήχθησαν, με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος και, συγκεκριμένα, οι δοκιμές που σχετίζονται με τις ρεολογικές ιδιότητες του υλικού (δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης, χρόνος πήξης), τα μηχανικά χαρακτηριστικά (θλιπτική, εφελκυστική & καμπτική αντοχή, αντοχή σε συνάφεια, θερμική συμπεριφορά) και την ανθεκτικότητα.

Πέραν των θεμάτων συνάφειας και ανθεκτικότητας, τα οποία θα μελετηθούν σε επόμενα, ξεχωριστά κεφάλαια, για τα υπόλοιπα μεγέθη παρατίθενται οι πίνακες των αποτελεσμάτων των δοκιμών και πραγματοποιούνται οι σχετικές παραμετρικές αναλύσεις με βάση τη σύνθεση του ΑΣΣ. Επιπροσθέτως, σχολιάζονται θέματα που αφορούν στην επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα των μιγμάτων.

## 2.1. Εισαγωγή

Το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ), όπως αναφέρεται στον ορισμό του που αποδόθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Παρ. 1.1.1), παρασκευάζεται γενικώς από τα ίδια υλικά με το Συμβατικό Σκυρόδεμα (ΣΣ), με την προσθήκη όμως μεγαλύτερων ποσοτήτων χημικών πρόσθετων ή/ και πρόσμικτων, τα οποία προσδίδουν στο νωπό μίγμα την επιδιωκόμενη αυξημένη ρευστότητα και την απαιτούμενη αντίσταση σε πιθανή απόμειξη.

Για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές σκυροδετήσεις με διαφορετικά συστατικά υλικά. Για τον σκοπό αυτό, στο πειραματικό μέρος της Διατριβής, δοκιμάστηκαν, σε διαφορετικές αναλογίες στο μίγμα, τσιμέντα διαφορετικών κατηγοριών αντοχής, διαφορετικά πρόσμικτα τύπου Ι και ΙΙ και αδρανή υλικά διαφορετικών κλασμάτων. Μετά από μεγάλο πλήθος δοκιμαστικών μιγμάτων, είτε μικρού όγκου για την εκτίμηση της ρεολογίας τους είτε μεγαλύτερου όγκου για την εξοικείωση με τις δοκιμές νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος και τη βελτίωση των μεθοδολογιών εφαρμογής τους, παρασκευάστηκαν υπο-ομάδες συνθέσεων με μοναδική μεταβλητή παράμετρο στη σύνθεση, ώστε να μελετηθεί η επιρροή της παραμέτρου αυτής στα ελεγχόμενα μεγέθη. Τέτοιες παράμετροι αποτέλεσαν ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), η περιεκτικότητα πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ ) και η περιεκτικότητα του μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ ) ή του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ ). Η επιλογή των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με βάση την προγενέστερη βιβλιογραφία, ώστε είτε να επιβεβαιωθούν είτε να συμπληρωθούν προηγούμενα συμπεράσματα για τη δράση των διαφόρων συστατικών στις διάφορες ιδιότητες που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της Διατριβής.

Στα θέματα που εξετάστηκαν περιλαμβάνονται θέματα νωπού σκυροδέματος (ρεολογικές ιδιότητες, χρόνος πήξης) και σκληρυμένου σκυροδέματος (μηχανικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες ανθεκτικότητας).

Πιο αναλυτικά, όσο αφορά στο *νωπό σκυρόδεμα*, τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ που παρασκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής ελέγχθηκαν ως προς τις ρεολογικές τους ιδιότητες και, στη συνέχεια, κατατάχθηκαν σε κατηγορίες ρεολογίας. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο νωπό σκυρόδεμα, εκτιμήθηκε η επίδραση των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά, ενώ πραγματοποιήθηκαν και γενικές συσχετίσεις για το σύνολο των αποτελεσμάτων, ώστε να εκτιμηθεί η γενική ρεολογική συμπεριφορά του ΑΣΣ, ανεξαρτήτως της σύνθεσης. Σε μέρος των μιγμάτων, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον δοκιμές που αφορούν στην εξέλιξη της πήξης του σκυροδέματος.

Όσο αφορά στο *σκληρυμένο σκυρόδεμα*, που αποτελεί και το κύριο προσανατολισμό της παρούσας Διατριβής, εξετάστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ανθεκτικότητας των παρασκευασθέντων μιγμάτων ΑΣΣ, τα οποία στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά και ιδιότητες μιγμάτων ΣΣ. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επιρροή των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στη θλιπτική, στην εφελκυστική και στην καμπτική αντοχή, στη συνάφεια με το χάλυβα οπλισμού και σε θέματα ανθεκτικότητας, όπως το ανοιχτό πορώδες, η

απορροφητικότητα, η υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση και η αντίσταση σε χλωριόντα. Σημειώνεται ότι τόσο τα θέματα συνάφειας, όσο και τα θέματα ανθεκτικότητας, λόγω του εύρους των πειραματικών δοκιμών και αποτελεσμάτων, θα παρουσιαστούν σε ξεχωριστά κεφάλαια. Επιπροσθέτως, για τις διάφορες υπο-ομάδες μιγμάτων μελετήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της εφελκυστικής και της θλιπτικής αντοχής, ενώ σε μέρος των μιγμάτων διερευνήθηκε η συμπεριφορά του σκυροδέματος κατόπιν θερμικής καταπόνησης υπό υψηλές θερμοκρασίες.

Ένα πρόσθετο αντικείμενο μελέτης της παρούσας Διατριβής, που διέπει όλα τα παραπάνω θέματα, αποτέλεσε και η διερεύνηση της επαναληψιμότητας (repeatability) των διαφόρων δοκιμών νωπού ή σκληρυμένου σκυροδέματος, καθώς και της αναπαραγωγισιμότητας (reproducibility) των μιγμάτων σε ενδοεργαστηριακό ή διεργαστηριακό επίπεδο. Όπως αναφέρθηκε ήδη στο πρώτο Κεφάλαιο (Παρ. 1.4), η χρήση περισσότερων συστατικών υλικών για την παρασκευή του μίγματος εν σχέσει προς το ΣΣ, όπως πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών, ανόργανων πρόσμικτων και χημικών πρόσθετων, καθιστούν το ΑΣΣ περισσότερο ευαίσθητο σε μεταβολές της συμπεριφοράς του, τόσο στη νωπή, όσο και στη σκληρυμένη φάση. Η μελέτη του παραπάνω φαινομένου, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, στηρίχθηκε κυρίως σε επαναληπτικές δοκιμές σε δίδυμα δοκίμια που παρασκευάζονταν από το ίδιο ανάμιγμα ΑΣΣ (έλεγχοι επαναληψιμότητας) ή σε δοκιμές που επαναλαμβάνονταν σε νέα μίγματα ΑΣΣ, στηριζόμενα σε ίδιες συνθέσεις (έλεγχοι ενδοεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας). Επιπροσθέτως, σε μία υπο-ομάδα μιγμάτων, που περιλάμβανε μίγματα αφενός με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ) και αφετέρου με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική πιαπάλη ( $sf/b$ ), πραγματοποιήθηκε διεργαστηριακή σύγκριση για τη διερεύνηση της δυνατότητας αναπαραγωγής των μιγμάτων, με υλικά συμμορφούμενα στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, ώστε αυτά να έχουν ίδιες ή παρεμφερείς ιδιότητες (έλεγχοι διεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας). Η εν λόγω διεργαστηριακή συνεργασία πραγματοποιήθηκε με το Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου της Κύπρου και, συγκεκριμένα, με Επιστημονικό Υπεύθυνο τον Καθ. Μ. Πέτρου και Επιστημονικό Συνεργάτη τον Α. Κανελλόπουλο.

Το παρόν Κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη:

(α) το *πρώτο* μέρος (Παρ. 2.2) περιλαμβάνει, αρχικά, τις αναλυτικές περιγραφές των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ, αλλά και το χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τους ελέγχους εξόλκευσης (Παρ. 2.2.1). Στην ίδια Παράγραφο περιγράφονται οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι οποίες ομαδοποιούνται περαιτέρω σε υπο-ομάδες συνθέσεων. Τέλος, περιγράφονται αναλυτικά ο τρόπος εργαστηριακής παρασκευής, δειγματοληψίας και συντήρησης των δοκιμών (Παρ. 2.2.2).

(β) το *δεύτερο* μέρος (Παρ. 2.3) αποτελείται από την περιγραφή των δοκιμών σκυροδέματος, ειδικά όπου αυτές διαφέρουν από τις επισήμως εφαρμοζόμενες μεθόδους, συμπληρωμένες με επαρκή σχολιασμό γύρω από τις αναγκαίες ή αναπόφευκτες παραλλαγές τους, καθώς και την παρουσίαση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τόσο για το νωπό (Παρ. 2.3.1), όσο και για το σκληρυμένο σκυρόδεμα (Παρ. 2.3.2 και 2.3.3).

## 2.2. Περιγραφή Υλικών & Συνθέσεων

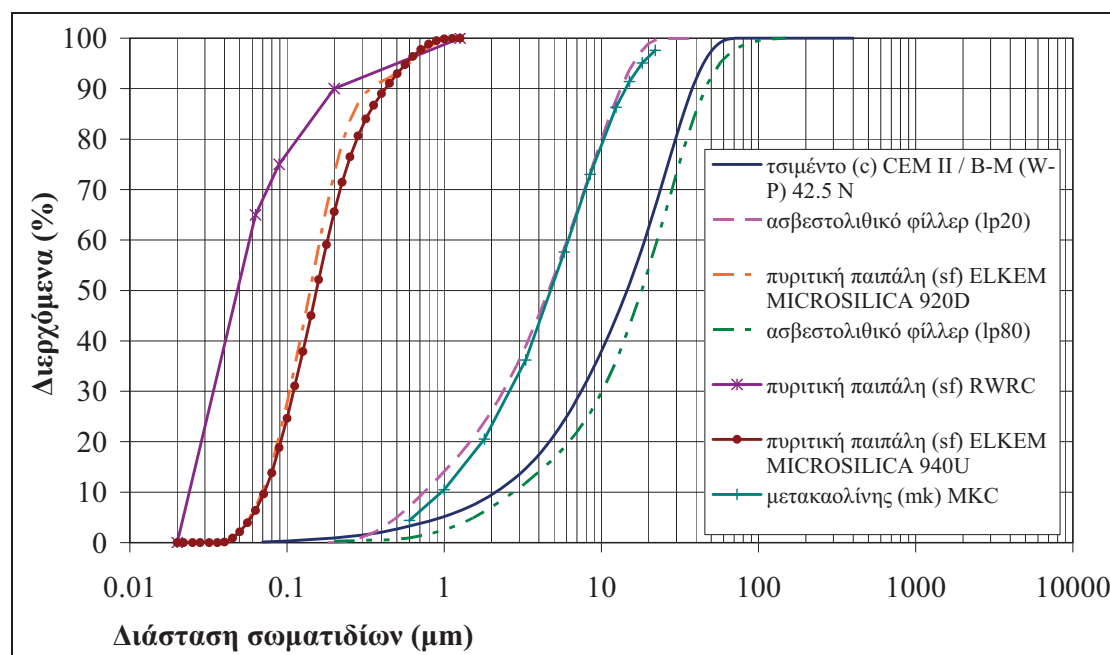
### 2.2.1. Υλικά παρασκευής μιγμάτων

#### 2.2.1.1. Τσιμέντο

Στη συντριπτική πλειοψηφία των μιγμάτων που παρασκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής χρησιμοποιήθηκε σύνθετο τσιμέντο Portland του εμπορίου με κατηγορία αντοχής  $42.5 \text{ N/mm}^2$ , ανθεκτικό σε θειικά και με χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης (Lafarge 'Basis': CEM II/B-M(W-P) 42.5N), που συμμορφώνεται με τα κριτήρια και τις απαιτήσεις του [EN 197-1 (2000)]. Η τυπική κοκκομετρία του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου, όπως αυτή υπολογίστηκε από το Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου (EKET) της Lafarge, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 54**, συγκριτικά με τα πρόσμικτα, όπως αυτά θα περιγραφούν στην Παράγραφο 2.2.1.2. Η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου υπολογίστηκε από την κοκκομετρική ανάλυση ίση με  $0.70 \text{ m}^2/\text{g}$ . Σε ορισμένες συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε εμπορικό τσιμέντο με κατηγορία αντοχής  $32.5 \text{ N/mm}^2$  (Τιτάν: CEM II/B-M(W-P-LL) 32.5N) ή συνδυασμός τσιμέντων κατηγοριών αντοχής 32.5 και  $22.5 \text{ N/mm}^2$ . Σημειώνεται ότι το τελευταίο τσιμέντο δεν προορίζεται για χρήση σε σκυρόδεμα και χρησιμοποιήθηκε μόνο δοκιμαστικά. Για τα τελευταία δύο τσιμέντα δεν διατίθενται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κοκκομετρία τους. Ο **Πίνακας 17** περιλαμβάνει την αντιστοίχιση των συνθέσεων με τους τύπους τσιμέντου. Γενικότερες πληροφορίες για τα τσιμέντα που χρησιμοποιούνται στο ΑΣΣ μπορούν να αναζητηθούν στην Παρ. 1.2.2.1.

**Πίνακας 17** Αντιστοίχιση τύπου τσιμέντου με πραγματοποιηθείσες συνθέσεις

τύπος τσιμέντου	CEM II/B-M (W-P-LL) 32.5N	CEM II 42.5	CEM II/B-M (W-P) 42.5N	22.5
εταιρεία παραγωγής	Τιτάν	Τιτάν	Lafarge	Lafarge
Σ001-Σ022	x	x		
Σ023-Σ150	x		x	x



**Σχήμα 54** Κοκκομετρικές καμπύλες λεπτόκοκκων υλικών (τσιμέντο, πυριτική παιπάλη, μετακαολίνης, ασβεστολιθικό φίλλερ) [πηγές: EKET, BASF, ELKEM, Μάρμαρα Διονύσου, Μπαδογιάννης (2003)]

### 2.2.1.2. Πρόσμικτα

#### Ανόργανα ασβεστολιθικά πληρωτικά (πρόσμικτα τύπου I)

*Ασβεστολιθικό φίλερ (lp)* – Για τις ανάγκες των πειραμάτων της παρούσας Διατριβής και στοχεύοντας στην βελτίωση του πλαστικού ιξώδους και την επίτευξη ικανοποιητικής σταθερότητας των μιγμάτων, όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 1.2.2.2 του Κεφαλαίου 1, χρησιμοποιήθηκε εμπορικό ασβεστολιθικό φίλερ (limestone powder, *lp*), προελεύσεως Διονύσου Αττικής (Μάρμαρα Διονύσου Α.Ε.Β.Ε.), δύο διαφορετικών ονομαστικών λεπτοτήτων, 20 και 80  $\mu\text{m}$  (*lp20* και *lp80*, αντίστοιχα). Ο Πίνακας 18 περιλαμβάνει τις φυσικές ιδιότητες και τη χημική σύσταση του χρησιμοποιούμενου φίλερ. Οι τιμές του Πίνακα αποτελούν μέσες τιμές από τον Έλεγχο Ποιότητας του εργοστασίου παραγωγής κατά το διάστημα προμήθειας του φίλερ, ενώ στο Σχήμα 54 παρουσιάζονται οι μέσες κοκκομετρικές καμπύλες, εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα λεπτόκοκκα υλικά (τσιμέντο, πρόσμικτα τύπου II).

**Πίνακας 18** Φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση (% w/w) ασβεστολιθικού φίλερ [πηγή: Μάρμαρα Διονύσου Α.Ε.Β.Ε.]

φυσικές ιδιότητες μέσο μέγεθος κόκκων $\mu\text{m}$	λεπτότητα	πυκνότητα	ειδική επιφάνεια* $\text{m}^2/\text{g}$	δεσμευμένο νερό %	χημική σύσταση (% w/w)					
					$\text{CaCO}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$		
<i>lp20</i>	5	$< 18 \pm 2$ $\mu\text{m}$	15 %	2.70	1.27	0.21	97.60	0.83	0.76	0.09
<i>lp80</i>	21	$< 80 \pm 2$ $\mu\text{m}$	5 %	2.70	0.28	0.21	96.50	1.57	1.14	0.13

\*υπολογισμένη από κοκκομετρική ανάλυση

Στο πλαίσιο της διεργαστηριακής σύγκρισης παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ ή NTUA) και του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου της Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ ή UCY), χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθικό φίλερ ως πληρωτικό υλικό του σκυροδέματος. Ο Πίνακας 19 περιλαμβάνει μια συγκριτική παρουσίαση της χημικής σύστασης και των φυσικών ιδιοτήτων του ασβεστολιθικού φίλερ που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε εργαστήριο. Επισημαίνεται ότι, για το σκοπό αυτό, στο ΕΩΣ/ΕΜΠ χρησιμοποιήθηκε το ασβεστολιθικό φίλερ *lp20*.

**Πίνακας 19** Σύγκριση φυσικών ιδιοτήτων και χημικής σύστασης ασβεστολιθικού φίλερ που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του ΕΔΥ/ΠΚ

φυσικές ιδιότητες	λεπτότητα		ΕΩΣ/ΕΜΠ	ΕΔΥ/ΠΚ
		$< 18\mu\text{m}$	97%	96%
		$< 2\mu\text{m}$	15%	7%
	πυκνότητα ( $\text{t}/\text{m}^3$ )		2.70	2.80
χημική σύσταση	καθαρότητα $\text{CaCO}_3$ (% w/w)		97.6	96

#### Πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά (πρόσμικτα τύπου II)

*Πυριτική παιπάλη (sf)* – Για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής χρησιμοποιήθηκε πυριτική παιπάλη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου σε διάφορα ποσοστά, από 4.9 έως 14.0 % κ.β. των τσιμεντοειδών υλικών. Γενικότερες πληροφορίες για την πυριτική παιπάλη μπορούν να αναζητηθούν στην Παρ. 1.2.2.2 του Κεφαλαίου 1.

Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές παιπάλες του εμπορίου (**Πίνακας 20**), αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο πρώτες αφορούσαν αποκλειστικώς δοκιμαστικά μίγματα που δεν ελέγχθηκαν εις βάθος. Ο **Πίνακας 21** περιλαμβάνει τις φυσικές ιδιότητες και τη χημική σύσταση της κυρίως χρησιμοποιηθείσας πυριτικής παιπάλης (ELKEM MICROSILICA 920D, προμηθευθείσα από την BASF Hellas). Η κοκκομετρία της εν λόγω πυριτικής παιπάλης παρουσιάζεται στο Σχήμα 54, συγκριτικά με τα υπόλοιπα λεπτόκοκκα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα μίγματα.

**Πίνακας 20** Αντιστοίχιση τύπου πυριτικής παιπάλης με παρασκευασθείσα σύνθεση

τύπος πυριτικής παιπάλης εταιρεία παραγωγής	άγνωστης προέλευσης BASF	RWRC BASF	MICROSILICA 920D ELKEM
Σ001-Σ103	x		
Σ104-Σ121		x	
Σ122-Σ172			x

**Πίνακας 21** Φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση πυριτικής παιπάλης [πηγή: BASF]

φυσικές ιδιότητες		χημική σύσταση (% w/w)								
πυκνότητα (t/m <sup>3</sup> )	ειδική επι- φάνεια* (m <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	L.O.I.
2.20	24.6	96.40	0.75	0.35	0.05	0.01	0.56	0.43	0.04	3.01

\*υπολογισμένη από κοκκομετρική ανάλυση

Στο πλαίσιο της διεργαστηριακής σύγκρισης παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ ή NTUA) και του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου της Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ ή UCY), χρησιμοποιήθηκε πυριτική παιπάλη ως πρόσθετο τσιμεντοειδές υλικό του σκυροδέματος. Ο **Πίνακας 22** περιλαμβάνει μια συγκριτική παρουσίαση της χημικής σύστασης και των φυσικών ιδιοτήτων της πυριτικής παιπάλης που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή σκυροδέματος σε κάθε εργαστήριο.

**Πίνακας 22** Σύγκριση φυσικών ιδιοτήτων και χημικής σύστασης πυριτικής παιπάλης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του ΕΔΥ/ΠΚ

		ΕΩΣ/ΕΜΠ	ΕΔΥ/ΠΚ
Φυσικές ιδιότητες	πυκνότητα (t/m <sup>3</sup> )	2.20	2.20
	ειδική επιφάνεια* (m <sup>2</sup> /g)	24.6	20-30
	λεπτότητα <200 μm	90%	66%
	<90 μm	75%	19%
	<63 μm	65%	6%
Χημική σύσταση	SiO <sub>2</sub> (% w/w)	96	95

\*υπολογισμένη από κοκκομετρική ανάλυση

**Πίνακας 23** Χημική ανάλυση (% w/w) καολίνη (*k*) και φυσικές ιδιότητες μετακαολίνη (*mk*)

χημική σύσταση καολίνη (% w/w)						φυσικές ιδιότητες μετακαολίνη	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L.O.I.	πυκνότητα (t/m <sup>3</sup> )	ειδική επιφάνεια* (m <sup>2</sup> /g)
47.85	38.20	0.03	0.04	1.29	12.30	2.5	1.41

\*υπολογισμένη από κοκκομετρική ανάλυση

**Μετακαολίνης (*mk*)** – Για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης εμπορικής προέλευσης (από την εταιρεία Imerys Minerals) ως υλικού αντικατάστασης είτε (**α**) του τσιμέντου σε διάφορα ποσοστά, από 6.9 έως 20.0 % κ.β. των συνολικών τσιμεντοειδών υλικών που απαρτίζουν το συνδετικό υλικό (*binder*, *b*), ή (**β**) του ασβεστολιθικού φίλερ (*lp*) σε διάφορα ποσοστά, από 13.7 έως 40.0 % κ.β.

της συνολικής περιεκτικότητας μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $\{mk+lp\}$ . Γενικότερες πληροφορίες για τον μετακαολίνη μπορούν να αναζητηθούν στην Παρ. 1.2.2.2 του Κεφαλαίου 1. Ο **Πίνακας 23** περιλαμβάνει τη χημική σύσταση του καολίνη ( $k$ ), από τον οποίον παρήχθη ο μετακαολίνης, καθώς και τις φυσικές ιδιότητες του χρησιμοποιηθέντος μετακαολίνης. Η κοκκομετρία του μετακαολίνης παρουσιάζεται στο Σχήμα 54, συγκριτικά με τα υπόλοιπα λεπτόκοκκα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, στα μίγματα.

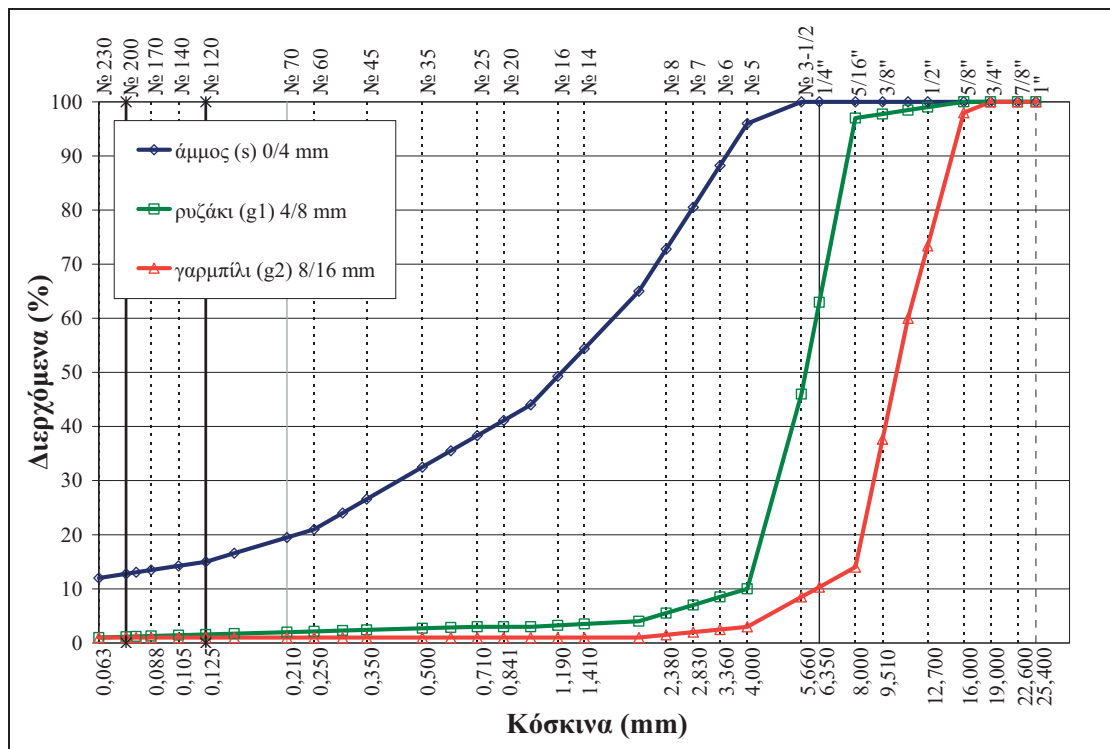
### 2.2.1.3. Αδρανή

Για τις ανάγκες των πειραμάτων της παρούσας Διατριβής χρησιμοποιήθηκαν αδρανή εμπορίου σταθερής προέλευσης (Interbeton Δομικά Υλικά Α.Ε., Λατομείο Ξηρορέματος). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρία κλάσματα θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών: (**α**) άμμος ( $s$ ) 0/4 mm, (**β**) ρυζάκι ( $g1$ ) 4/8 mm και (**γ**) γαρμπίλι ( $g2$ ) 8/16 mm. Στο σημείο αυτό θα πρέπει επίσης να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή σκυροδέματος στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου της Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ), με σκοπό τη διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, από το Πανεπιστήμιο Κύπρου χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κλάσματα ασβεστολιθικών αδρανών: (**α**) λεπτή άμμος ( $fs$ ) 0/2 mm, (**β**) άμμος ( $s$ ) 0/4 mm, (**γ**) ρυζάκι ( $g1$ ) 4/10 mm και (**δ**) γαρμπίλι ( $g2$ ) 8/16 mm. Ο **Πίνακας 24** περιλαμβάνει τις φυσικές ιδιότητες των αδρανών, όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά τον Έλεγχο Ποιότητας της εταιρείας παραγωγής κατά την περίοδο προμήθειάς τους, σύμφωνα με το σχετικό Ευρωπαϊκό Πρότυπο **EN 1097-6 (2000)**. Γενικότερες πληροφορίες για τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο ΑΣΣ μπορούν να αναζητηθούν στην Παρ. 1.2.2.3 του Κεφαλαίου 1.

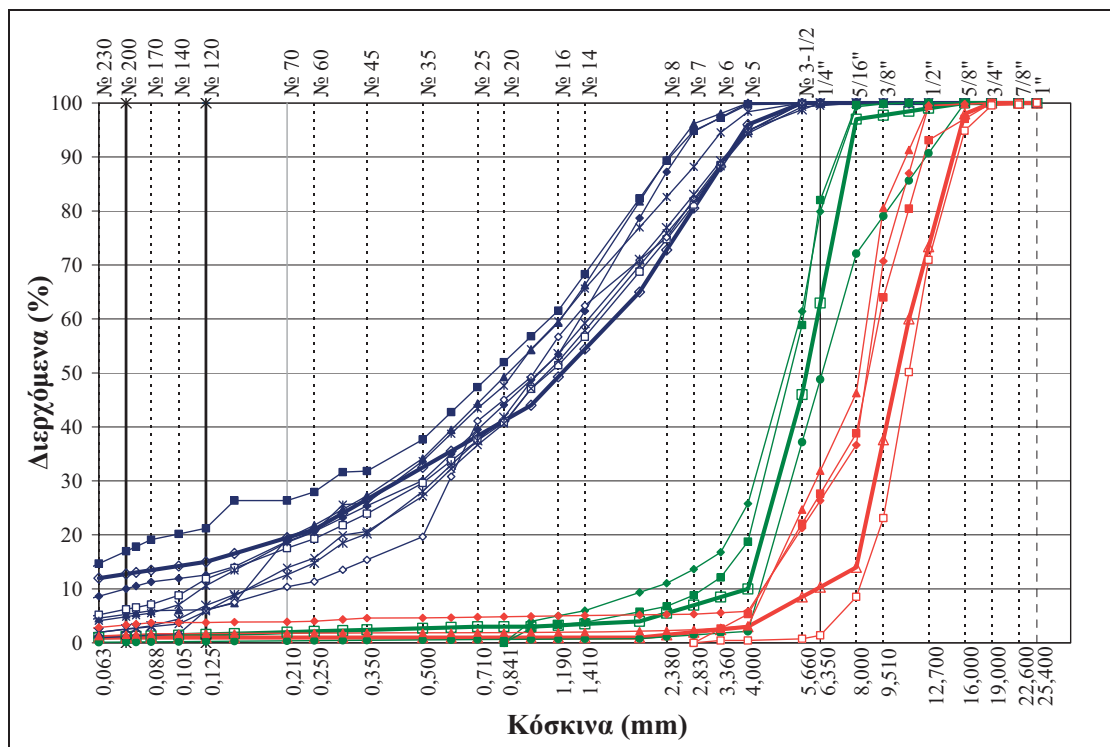
**Πίνακας 24** Φυσικές ιδιότητες αδρανών [υπολογισμένες βάσει **EN 1097-6 (2000)**]

κλάσμα	σύμβολο	ονομαστική κοκκομετρία mm		φαινόμενη πυκνότητα ξηρού υλικού ( $t/m^3$ )		υδαταπορροφητικότητα (%)	
		ΕΩΣ/ΕΜΠ	ΕΔΥ/ΠΚ	ΕΩΣ/ΕΜΠ	ΕΔΥ/ΠΚ	ΕΩΣ/ΕΜΠ	ΕΔΥ/ΠΚ
λεπτή άμμος	$fs$	-	0/2	-	2.76	-	2.0
άμμος	$s$	0/4	0/4	2.66	2.80	0.9	0.6
ρυζάκι	$g1$	4/8	4/10	2.66	2.70	1.1	4.5
γαρμπίλι	$g2$	8/16	8/16	2.65	2.70	1.0	4.0

Οι μέσες κοκκομετρικές καμπύλες για κάθε κλάσμα αδρανών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 55**, ενώ οι καμπύλες, όπως αυτές προέκυψαν από εργαστηριακές κοκκομετρήσεις στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ), παρουσιάζονται στο **Σχήμα 56**. Ειδικά για τις παρτίδες αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διεργαστηριακής σύγκρισης ιδιοτήτων μιγμάτων με το Πανεπιστήμιο της Κύπρου, οι κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών των δύο εργαστηρίων παρουσιάζονται συγκριτικά στο **Σχήμα 57**. Σημειώνεται ότι κατά τον σχεδιασμό των μιγμάτων υιοθετήθηκαν όλες οι απαραίτητες μεταβολές των ποσοτήτων (λόγω υγρασίας και υδαταπορροφητικότητας), έτσι ώστε τα αδρανή να φτάσουν σε κατάσταση κορεσμένη επιφανειακά στεγνή (saturated surface dry, SSD). Επομένως, εφεξής, οι ποσότητες των αδρανών που αναφέρονται αφορούν ξηρά αδρανή και σε τυχόν επανάληψη των συνθέσεων θα πρέπει να υπολογίζεται πρόσθετο νερό, ανάλογα με την απορροφητικότητά τους.

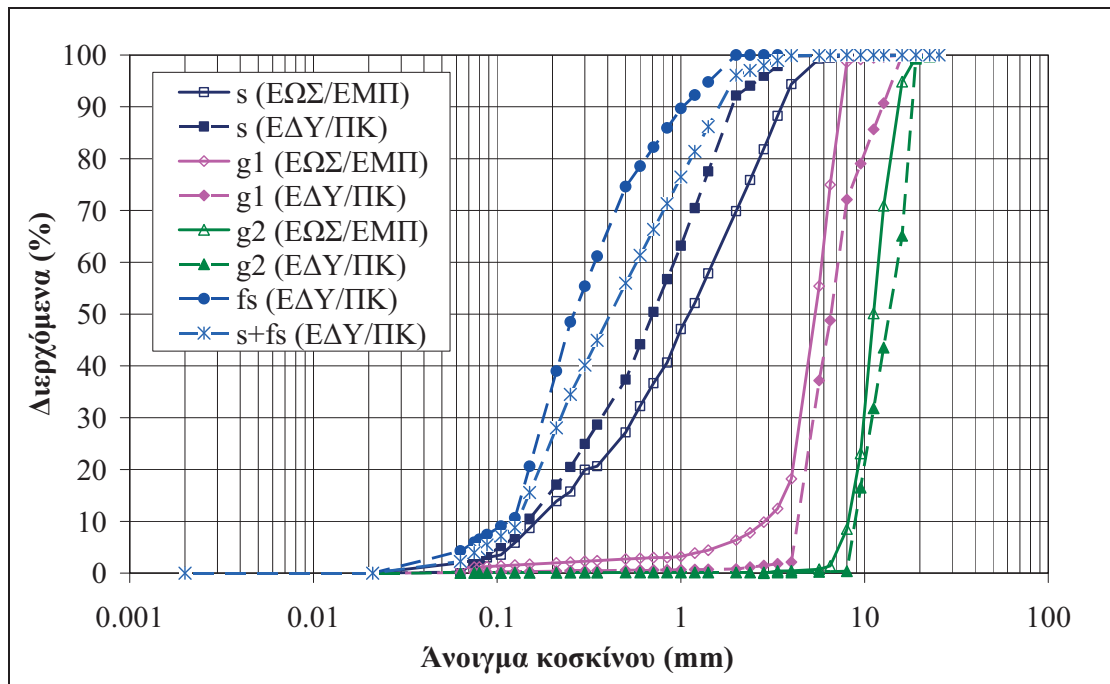


Σχήμα 55 Μέσες κοκκομετρικές καμπύλες κλασμάτων αδρανών



Σχήμα 56 Πραγματικές κοκκομετρικές καμπύλες κλασμάτων αδρανών





**Σχήμα 57** Σύγκριση αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του ΕΔΥ/ΠΚ

#### 2.2.1.4. Νερό αναμίξεως

Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε νερό από το δίκτυο ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Κατόπιν προφορικής διαβεβαίωσης από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., το χρησιμοποιούμενο νερό αναμίξεως είναι κατάλληλο για την παρασκευή σκυροδέματος.

#### 2.2.1.5. Χημικά πρόσθετα

Για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν υπερρυστοποιητές 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> γενιάς (η ακριβής περιγραφή της διαφοράς τους στον τρόπο χημικής δράσης ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας Διατριβής και για το λόγο αυτό δεν εξετάζεται περαιτέρω) με βάση τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (polycarboxilic ether), που συμμορφώνονται στις γενικές προδιαγραφές των Πίν. 11.1 & 11.2 του EN 934-2 (2001). Στη συντριπτική πλειοψηφία των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, τα εμπορικά χημικά πρόσθετα: BASF GleniumSKY 628, BASF Glenium C347, ενώ σε μέρος των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε το τροποποιητικό ιξώδους (viscosity modifying agent, VMA) BASF Rheomatrix 150. Σε δοκιμαστικά μίγματα χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα χημικά πρόσθετα: SIKA Viscocrete 4000, MAPEI Dynamon SR1, Axim Cimfluid Adagio 2019, MAPEI Viscofluid SCC-10<sup>1</sup>. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι, ανά ομάδα μιγμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος υπερρυστοποιητής για την παρασκευή τόσο των ΑΣΣ όσο και των ΣΣ, έτσι ώστε να

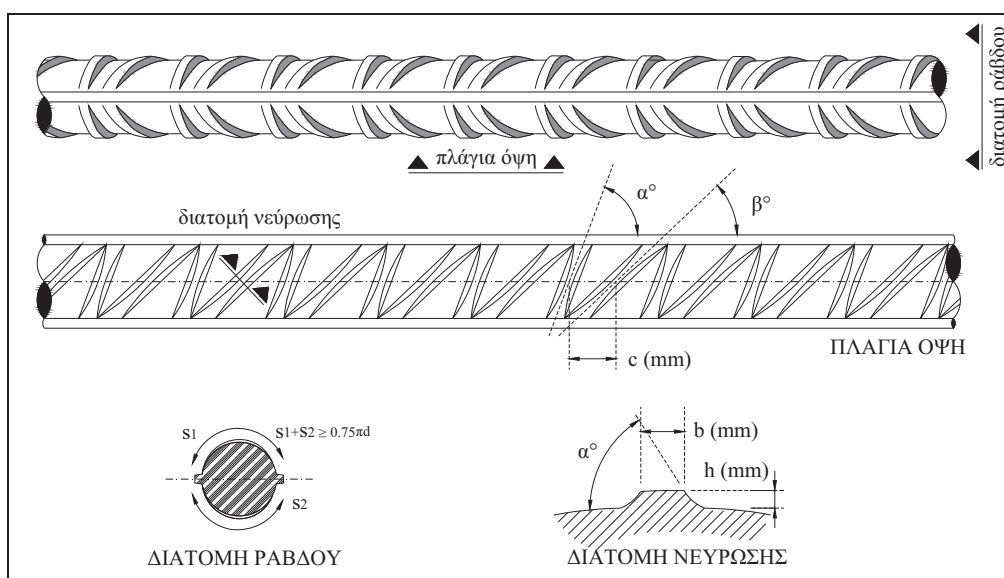
<sup>1</sup> Θα πρέπει ρητώς να τονιστεί ότι η παρούσα Διατριβή σε καμία περίπτωση δε στοχεύει στη σύγκριση της αποτελεσματικότητας των χημικών πρόσθετων των διαφορετικών εταιρειών παρασκευής. Η επιλογή των χρησιμοποιούμενων προσθέτων ήταν τυχαία και δεν έγινε με επιστημονικά κριτήρια. Από τα δοκιμαστικά μίγματα που πραγματοποιήθηκαν με όλους τους τύπους χημικών πρόσθετων παρατηρήθηκε ότι, μέσω της κατάλληλης ρύθμισης των αναλογιών τους στο σκυρόδεμα, όλα τα πρόσθετα είναι ικανά να προσδώσουν την επιθυμητή ή απαιτούμενη ρεολογία.

περιοριστούν οι πιθανές επιδράσεις της χρήσης διαφορετικών ρευστοποιητών στις ιδιότητες που ελέγχθηκαν.

### 2.2.1.6. Χάλυβας οπλισμών

Στο πλαίσιο των πειραμάτων της παρούσας Διατριβής και, συγκεκριμένα, για τα πειράματα συνάφειας σκυροδέματος, όπως αυτά θα περιγραφούν και θα σχολιαστούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιήθηκε εμπορικός νευροχάλυβας κλάσης B500C (Χαλυβουργική Α.Ε.), συμμορφούμενος στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 10080 (2005).

Όλες οι ράβδοι οπλισμού που εγκιβωτίστηκαν στα δοκίμια προέρχονταν από την ίδια παρτίδα και είχαν ονομαστική διάμετρο  $d = d_{nom} = 16$  mm, η οποία αντιπροσωπεύει «μεσαίες διαμέτρους» (ονομαστικές διαμέτρους από 10 έως 20 mm), σύμφωνα με τον Πίν. D.1 του EN 10080 (2005).



Σχήμα 58 Τυπικό σκαρίφημα ράβδου και συμβολισμοί [πηγές: KTX (2008), EN 10080 (2005)]



Σχήμα 59 Τυπική ράβδος οπλισμού B500C, ονομαστικής διαμέτρου  $d_{nom} = 16$  mm

Στο Σχήμα 58 (σκαρίφημα) και στο Σχήμα 59 (φωτογραφία) παρουσιάζεται μία τυπική ράβδος, η οποία διαθέτει δύο σειρές εγκάρσιων νευρώσεων, οι οποίες είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα στην περίμετρο και έχουν ίσες αποστάσεις κατά το μήκος της ράβδου. Οι εγκάρσιες νευρώσεις προσομοιάζουν το σχήμα μισοφέγγαρου και σταδιακά χωνεύονται στον πυρήνα της μεταλλικής ράβδου. Η προβολή των

εγκάρσιων νευρώσεων εκτείνεται σε μήκος τουλάχιστον 75% γύρω από την περίμετρο της ράβδου.

Συνολικά πέντε τυχαία δοκίμια ράβδων εξετάστηκαν στο εργαστήριο, ώστε να επιβεβαιωθούν οι τεχνικές προδιαγραφές του παρασκευαστή, που αφορούν στην διάμετρο, τη διατομή και τη μάζα του οπλισμού (**Πίνακας 25**), καθώς και στα μηχανικά του χαρακτηριστικά (**Πίνακας 26**). Η γεωμετρία της επιφάνειας και των εγκάρσιων νευρώσεων (**Πίνακας 27**) ελέγχθηκε σε τρία δοκίμια ράβδων (οι τιμές αποτελούν μέσους όρους δώδεκα μετρήσεων, ήτοι τεσσάρων μετρήσεων σε κάθε ράβδο). Ο εργαστηριακός έλεγχος των ράβδων έδειξε ότι η τάση διαρροής,  $f_y$ , και η τάση θραύσης (εφελκυστική αντοχή),  $f_t$ , ανήλθαν σε 553 N/mm<sup>2</sup> και 650 N/mm<sup>2</sup>, αντιστοίχως, ενώ η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο,  $\varepsilon_{u,k}$  (%), ανήλθε σε 10.58 %.

**Πίνακας 25** Διάμετρος, διατομή και μάζα ράβδων οπλισμού (ονομαστικής διαμέτρου  $d_{nom} = 16$  mm)

μέγεθος	σύμβολο	μονάδες	ονομαστικές τιμές		πειραματικές τιμές	
			μέση	ανοχή	μέση τιμή	τυπ. απόκλιση
διάμετρος	$d$	mm	16	-	15.93	0.06
διατομή	$A_n$	mm <sup>2</sup>	201	4.5%	199.33	1.53
μάζα		kg/m	1.58	-	1.56	0.01

**Πίνακας 26** Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα ράβδων οπλισμού (κατηγορίας B500C)

μέγεθος	σύμβολο	μονάδες	όριο παραγωγού	πειραματικές τιμές	
				μέση τιμή	τυπ. απόκλιση
τάση διαρροής	$f_y$	N/mm <sup>2</sup>	≥ 500	553.00	3.81
εφελκυστική αντοχή	$f_t$	N/mm <sup>2</sup>	≥ 550	650.60	16.27
λόγος εφελκυστικής αντοχής προς τάση διαρροής	$f_t/f_y$	-	≥ 1.15	1.18	0.02
συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο	$\varepsilon_{u,k}$	%	≥ 8.0	10.58	0.79
λόγος πραγματικής προς ονομαστική τάση διαρροής	$f_{y,act}/f_{y,nom}$	-	≤ 1.25	1.11	0.01

**Πίνακας 27** Γεωμετρία επιφανειακών και εγκάρσιων νευρώσεων ράβδων οπλισμού (ονομαστικής διαμέτρου  $d_{nom} = 16$  mm)

μέγεθος	σύμβολο	μονάδες	όριο παραγωγού	πειραματικές τιμές	
				μέση τιμή	τυπ. απόκλιση
γωνία κλίσης	$\alpha$	μοίρες	≥ 45°	53.9°	1.0°
	$\beta$	μοίρες	≥ 35°	38.4°	1.2°
		μοίρες	≤ 75°		
ύψος	$h$	mm	≥ 0.03 $d = 0.48$ ≤ 0.15 $d = 2.40^*$	1.10	0.2
απόσταση	$c$	mm	≥ 0.4 $d = 6.40$ ≤ 1.2 $d = 19.20$	11.00	0.5
πλάτος	$b$	mm	0.1 $d = 1.60$	1.6	0.0

\*ισχύει επίσης για τις διαμήκεις νευρώσεις

## 2.2.2. Συνθέσεις

### 2.2.2.1. Γενικές πληροφορίες

Το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 206-1 (2000)** ορίζει ότι η σύνθεση ενός μίγματος σκυροδέματος και τα συστατικά του υλικά πρέπει να επιλέγονται με κριτήριο τις επιθυμητές ή απαραίτητες απαιτήσεις του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος,

μεταξύ των οποίων η σταθερότητα, η πυκνότητα, η αντοχή και η ανθεκτικότητα, δεδομένων των διαδικασιών παρασκευής και των μεθόδων διάστρωσης και εφαρμογής.

Ο σχεδιασμός των συνθέσεων της παρούσας Διατριβής δεν είχε κάποιο σταθερό στόχο για όλα τα μίγματα. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν διερευνητικές συνθέσεις, με σκοπό την ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων ή των περισσότερων ρεολογικών δοκιμών, αλλά και την εξοικείωση με τις διαδικασίες ελέγχου του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος και τη βελτίωση των εφαρμοζόμενων μεθοδολογιών, αλλά και των πειραματικών διατάξεων. Στη συνέχεια, παρασκευάζονταν υπο-ομάδες μιγμάτων με σταθερή (ανά ομάδα) σύνθεση, μεταβάλλοντας μόνο ένα συστατικό (περιεκτικότητα νερού, πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ή της άμμου), ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής αυτής στα μηχανικά, κυρίως, χαρακτηριστικά ή/ και στις ιδιότητες ανθεκτικότητας.

### 2.2.2.2. Περιγραφή συνθέσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, παρασκευάστηκαν εργαστηριακώς συνολικά 162 μίγματα 150 διαφορετικών συνθέσεων (Σ023-Σ172), συνολικού όγκου 8.0 m<sup>3</sup> περίπου. Η αρίθμηση (Σ001-Σ022) αναφέρεται σε μίγματα που είχαν προηγηθεί (2006-2008) στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του συντάκτη της παρούσας Διατριβής (Σ001-Σ016) [Σφήκας (2007)] και διπλωματικής εργασίας συναφούς αντικείμενου του Μεταπτυχιακού Φοιτητή, Πολ. Μηχανικού Δ. Παύλου (Σ017-Σ022) [Παύλου (2008)]. Πάντως, σημειώνεται ότι στις αναλύσεις που ακολουθούν θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα όλων των συνθέσεων (που αντιστοιχούν σε 217 μίγματα). Σημειώνεται ότι εφεξής, για την κωδικοποίηση των μιγμάτων, θα χρησιμοποιούνται τα αγγλικά αρκτικόλεξα: SCC (Self-Compacting Concrete) και NVC (Normally Vibrated Concrete) για το ΑΣΣ και το ΣΣ, αντιστοίχως.

Οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής σχεδιάστηκαν με βάση:

- διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις (διαφορετική περιεκτικότητα συνολικών αδρανών και διαφορετικές επιμέρους αναλογίες κλασμάτων αδρανών)
- την προσθήκη ασβεστολιθικού φίλερ με δύο διαφορετικές κοκκομετρικές, συμπληρωματικά ή σε διάφορα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου
- διαφορετικούς λόγους νερού προς συνδετικό υλικό<sup>2</sup> ( $w/b$ )
- διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη ( $sf/b$ )
- διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη ( $mk/b$ )
- διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη ( $mk/\{mk+lp\}$ )
- διαφορετικές ποσότητες χημικών πρόσθετων (ρευστοποιητές, τροποποιητικό ιξώδους).
- την επιδιωκόμενη ισοδυναμία κοκκομετρίας κατά τη διεργαστηριακή παρασκευή μιγμάτων στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ, με δεδομένες κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών.

<sup>2</sup> Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του λόγου  $w/b$  δεν ελήφθησαν υπόψη οι συντελεστές ενεργότητας (k-factors, σύμφωνα με EN 206 (2013)) για τα πρόσμικτα τύπου Ι ή ΙΙ, λόγω της, κατά περίπτωση, μη διαθεσιμότητάς τους στα τεχνικά φυλλάδια των παρασκευαστών/ παραγωγών.

Από τις 172 συνθέσεις (217 μίγματα), οι 54 ικανοποιούσαν τις ελάχιστες ρεολογικές απαιτήσεις που τίθενται από τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα [EFNARC (2005)] και κωδικοποιήθηκαν ως συνθέσεις ΑΣΣ (SCC01 έως SCC54), ενώ σε 22 από αυτές πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικά μίγματα (με ίδιες αναλογίες συστατικών) με στόχο τον έλεγχο της ενδοεργαστηριακής αναπαραγωγιμότητας μιγμάτων όσο αφορά συγκεκριμένες δοκιμές ή τη διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών. Επίσης, τα μίγματα 16 διαφορετικών συνθέσεων κωδικοποιήθηκαν ως ΣΣ (NVC01 έως NVC16), εκ των οποίων τα 4 αφορούν έτοιμο σκυρόδεμα (NVC01, NVC02, NVC05, NVC06). Ομοίως, πραγματοποιήθηκαν 10 επαναληπτικά μίγματα συνθέσεων ΣΣ. Τέλος, τα υπόλοιπα 115 μίγματα αφορούν δοκιμαστικά μίγματα μικρού όγκου (έως 15-25 lt), τα οποία παρασκευάστηκαν σε αναμικτήρα χωρητικότητας 30 lt αποκλειστικώς για την αξιολόγηση της ρεολογίας τους. Ο **Πίνακας 28** περιλαμβάνει μια συνοπτική παρουσίαση των συνθέσεων ανά τύπο σκυροδέματος, ταξινομημένες σε πρωτογενείς και επαναληπτικές.

**Πίνακας 28** Συνοπτική παρουσίαση πραγματοποιηθέντων μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC)

Περιγραφή Μιγμάτων	Μίγματα ΑΣΣ (SCC)				Μίγματα ΣΣ (NVC)	
	Πρωτογενή			Επαναληπτικά	Πρωτογενή	Επαναληπτικά
Κωδικοί	SCC-01	SCC-19	SCC-37	2xSCC-02	NVC-03	3xNVC-03
Μιγμάτων	SCC-02	SCC-20	SCC-38	2xSCC-04	NVC-04	3xNVC-04
(βλ. Πίνακας	SCC-03	SCC-21	SCC-39	SCC-05	NVC-07	NVC-11
29 έως	SCC-04	SCC-22	SCC-40	2xSCC-06	NVC-08	NVC-12
Πίνακας 35)	SCC-05	SCC-23	SCC-41	SCC-07	NVC-09	NVC-13
	SCC-06	SCC-24	SCC-42	SCC-08	NVC-10	NVC-14
	SCC-07	SCC-25	SCC-43	SCC-09	NVC-11	
	SCC-08	SCC-26	SCC-44	2xSCC-10	NVC-12	
	SCC-09	SCC-27	SCC-45	SCC-11	NVC-13	
	SCC-10	SCC-28	SCC-46	SCC-12	NVC-14	
	SCC-11	SCC-29	SCC-47	SCC-26	NVC-15	
	SCC-12	SCC-30	SCC-48	SCC-27	NVC-16	
	SCC-13	SCC-31	SCC-49	SCC-28	Έτοιμο Σκ.	
	SCC-14	SCC-32	SCC-50	SCC-29	NVC-01	
	SCC-15	SCC-33	SCC-51	SCC-31	NVC-02	
	SCC-16	SCC-34	SCC-52	SCC-34	NVC-05	
	SCC-17	SCC-35	SCC-53	SCC-35	NVC-06	
	SCC-18	SCC-36	SCC-54	SCC-36		
<b>102*</b>	<b>54</b>			<b>22</b>	<b>12+4</b>	<b>10</b>

\*επιπλέον, παρασκευάστηκαν 115 δοκιμαστικά μίγματα, επομένως συνολικά: 102 + 115 = 217 μίγματα

### 2.2.2.3. Αναλυτικοί πίνακες συνθέσεων

Στους Πίνακες που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά τα συστατικά υλικά των συνθέσεων για τα μίγματα ΑΣΣ (**Πίνακας 29** έως **Πίνακας 33**) και ΣΣ (**Πίνακας 34** και **Πίνακας 35**). Για κάθε μίγμα καταγράφονται οι λόγοι νερού προς τσιμέντο ( $w/c$ ) και προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), οι μηχανικές αντοχές (θλιπτική, εφελκυστική & καμπτική αντοχή, όπου αυτές μετρήθηκαν), ο συντελεστής μοναδιαίου βάρους (ΣΜΒ, Παρ. 2.3.1.3) και το κόστος παρασκευής των μιγμάτων ανά κυβικό μέτρο ( $K$  σε €)<sup>3</sup>. Οι μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος,  $T_{περ}$  (°C), και οι μέσες σχετικές υγρασίες,  $RH$  (%), που περιλαμβάνονται στους Πίνακες αφορούν μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού του ΕΜΠ<sup>4</sup>, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Η θερμοκρασία του σκυροδέματος δε μετρήθηκε. Σημειώνεται ότι όλες οι σκυροδετήσεις και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε προστατευμένες περιβαλλοντικές συνθήκες εργαστηρίου.

<sup>3</sup> Για την εκτίμηση του κόστους παρασκευής χρησιμοποιήθηκαν τρέχουσες μέσες τιμές χονδρικής αγοράς των πρώτων υλών, ενώ δεν περιλαμβάνονται το ενεργειακό και το εργατικό κόστος.

<sup>4</sup> <http://openmeteo.org/stations/d/1334/>









**Πίνακας 35** Συστατικά (kg/m<sup>3</sup>), λόγοι νερού προς τσιμέντο και προς συνδετικό υλικό (-), αντοχές (N/mm<sup>2</sup>), συντελεστές μοναδιαίου βάρους (-) και κόστος (€/m<sup>3</sup>) συνθέσεων ΣΣ (NVC-11 έως 16).

τύπος	NVC		NVC		NVC		NVC		NVC	
a/a	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
σύνθεση	130	131	132	133	140	141	143	144	171	172
T <sub>exp</sub> (°C)	14.4	15.7	25.0	25.7	28.0	28.6	26.0	24.0	21.0	21.5
RH (%)	60	62	58	58	56	58	74	75	77	78
c <sub>1</sub> 42.5	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
c <sub>2</sub> 32.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
c <sub>3</sub> 22.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
τύπος lp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
lp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
sf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
mk	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
s 0/4	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
g <sub>1</sub> 4/8	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
g <sub>2</sub> 8/16	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375
g <sub>3</sub> 16/32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w	204	204	204	204	204	204	204	204	192	192
τύπος PCE	-	-	C347	C347	C347	C347	C347	C347	-	C347
pce	-	-	1.0	1.0	0.5	0.5	2.0	2.0	-	2.5
τύπος VMA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w <sub>tot</sub>	2229	2229	2230	2230	2229	2229	2231	2231	2217	2220
w/c	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.48	0.48
w/b	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.48	0.48
f <sub>cc</sub>	50.2	49.3	45.8	42.2	51.5	49.9	49.4	47.8	62.4	70.4
f <sub>ct</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0	3.1
f <sub>fl</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΣMB	1.03	1.03	1.03	1.03	1.07	1.07	1.05	1.05	1.04	1.06
K	87	87	88	88	87	87	90	90	87	90

T<sub>exp</sub> (°C): θερμοκρασία περιβάλλοντος, RH (%): σχετική υγρασία, c: τσιμέντο CEM II A/L 42.5N or 32.5N or 22.5, sf: πυριτική παιπάλη, mk: μετακαολίνη, lp: ανθρακικό ασβέστιο (lp80: καθαρότητα 96.5 % CaCO<sub>3</sub>, λεπτότητα 97% < 80 μm, 5 % < 2 μm, lp20: καθαρότητα 97.6% CaCO<sub>3</sub>, λεπτότητα 97 % < 18 μm, 15 % < 2 μm), s: άμμος 0/4, g<sub>1</sub>: ριζάκι 4/8, g<sub>2</sub>: γαρμπύλι 8/16, g<sub>3</sub>: σκόρα 16/32, w: ωφέλιμο νερό, pce: υπερρευστοποιητής πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (C347: BASF Glenium C347), vma: τροποποιητικό ιζώδους, b: συνδετικό υλικό (c+sf+mk), w<sub>tot</sub>: συνολικό βάρος μίγματος (ανά m<sup>3</sup>), f<sub>cc</sub>, f<sub>ct</sub>, f<sub>fl</sub>: θλιπτική, εφελκυστική & καμπτική αντοχή, ΣMB: συντελεστής μοναδιαίου βάρους, K: κόστος παρασκευής (ανά m<sup>3</sup>)

#### 2.2.2.4. Υπο-ομάδες συνθέσεων

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν οι υπο-ομάδες των συνθέσεων που ελέγχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, οι οποίες συντίθενται από συνθέσεις με κοινά συστατικά υλικά και μεταβολή μίας παραμέτρου, η επιρροή της οποίας διερευνάται. Τα πλήρη στοιχεία των συνθέσεων μπορούν να αναζητηθούν στους πίνακες που προηγήθηκαν βάσει του αύξοντα αριθμού της σύνθεσης, στη δεύτερη σειρά κάθε πίνακα. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν επτά ομάδες συνθέσεων, σύμφωνα με τον ακόλουθο Πίνακα (**Πίνακας 36**):

**Πίνακας 36** Συνοπτική περιγραφή υπο-ομάδων συνθέσεων

υπο-ομάδα	περιγραφή	πλήθος συνθέσεων	a/a συνοπτικού Πίνακα
A	επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό σε μίγματα ΑΣΣ	5	<b>Πίνακας 37</b>
B1 & B2	επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε μίγματα ΑΣΣ	7	<b>Πίνακας 38</b> <b>Πίνακας 39</b>
Γ	επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη σε μίγματα ΑΣΣ	5	<b>Πίνακας 40</b>
Δ	επιρροή ποσοστού αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη σε μίγματα ΑΣΣ	5	<b>Πίνακας 41</b>
E	επιρροή ποσοστού υπερρευστοποιητή κ.β. συνδετικού υλικού σε μίγματα ΣΣ	4	<b>Πίνακας 42</b>
Z1 & Z2	μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή	9	<b>Πίνακας 43</b> <b>Πίνακας 44</b>
H1 & H2	μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρασκευασθέντα στο ΕΩΣ/ΕΜΠ (H1) και στο ΕΔΥ/ΠΚ (H2)	8*	<b>Πίνακας 45</b> <b>Πίνακας 46</b>

\* ανά εργαστήριο

**Πίνακας 37** Υπο-ομάδα συνθέσεων Α: επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό σε μίγματα ΑΣΣ

κωδικός σύνθεση	SCCWB1 SCC29	SCCWB2 SCC27	SCCWB3 SCC26	SCCWB4 SCC28	SCCWB5 SCC31
<b>w/b</b>	<b>0.41</b>	<b>0.46</b>	<b>0.51</b>	<b>0.56</b>	<b>0.61</b>
c 42.5	350	350	350	350	350
lp20	175	175	175	175	175
w	142	160	177	195	212
s 0/4	1050	1050	1050	1050	1050
g1 4/8	150	150	150	150	150
g2 8/16	350	350	350	350	350
pce	11.7	8.9	6.9	3.8	3.2

**Πίνακας 38** Υπο-ομάδα συνθέσεων Β1: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε μίγματα ΑΣΣ

κωδικός σύνθεση	SCCSF1 SCC26	SCCSF2 SCC34	SCCSF3 SCC30	SCCSF4 SCC32	SCCSF5 SCC35	SCCSF6 SCC33	SCCSF7 SCC36
<b>sf/b</b>	<b>0.0 %</b>	<b>4.9 %</b>	<b>6.9 %</b>	<b>8.9 %</b>	<b>10.6 %</b>	<b>12.3 %</b>	<b>14.0 %</b>
c 42.5	350	333	326	319	313	307	301
sf	-	17	24	31	37	43	49
lp20	175	175	175	175	175	175	175
w	177	176	176	176	176	176	176
s 0/4	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
g1 4/8	150	150	150	150	150	150	150
g2 8/16	350	350	350	350	350	350	350
pce	6.9	7.3	5.1	5.2	6.8	6.1	8.8

**Πίνακας 39** Υπο-ομάδα συνθέσεων Β2: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε μίγματα ΑΣΣ & μίγμα αναφοράς ΣΣ

κωδικός σύνθεση	SCCSF8 SCC16	SCCSF9 SCC17	SCCSF10 SCC18	SCCSF11 SCC19	NVCSF NVC08
<b>sf/b</b>	<b>0.0 %</b>	<b>2.5 %</b>	<b>5.0 %</b>	<b>10.0 %</b>	<b>0.0 %</b>
c 42.5	340	332	323	306	340
sf	-	9	17	34	-
w	211	211	211	211	211
s 0/4	1163	1163	1163	1163	1163
g1 4/8	306	306	306	306	306
g2 8/16	286	286	286	286	286
pce	3.9	3.9	3.9	4.8	0.0

**Πίνακας 40** Υπο-ομάδα συνθέσεων Γ: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη σε μίγματα ΑΣΣ

κωδικός σύνθεση	SCCMKB1 SCC54	SCCMKB2 SCC45	SCCMKB3 SCC48	SCCMKB4 SCC47	SCCMKB5 SCC49
<b>mk/b</b>	<b>0.0 %</b>	<b>6.9 %</b>	<b>10.6 %</b>	<b>14.0 %</b>	<b>20.0 %</b>
c 42.5	350	326	313	301	280
mk	-	24	37	49	70
lp20	175	175	175	175	175
w	210	210	210	210	210
s 0/4	1050	1050	1050	1050	1050
g1 4/8	150	150	150	150	150
g2 8/16	350	350	350	350	350
pce	4.5	6.0	5.0	4.9	6.0

**Πίνακας 41** Υπο-ομάδα συνθέσεων Δ: επιρροή ποσοστού αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη σε μίγματα ΑΣΣ

κωδικός σύνθεση	SCCMKLP1 SCC54	SCCMKLP2 SCC50	SCCMKLP3 SCC52	SCCMKLP4 SCC51	SCCMKLP5 SCC53
<b><math>mk/\{mk+lp\}</math></b>	<b>0.0 %</b>	<b>13.7 %</b>	<b>21.1 %</b>	<b>28.0 %</b>	<b>40.0 %</b>
<i>c</i> 42.5	350	350	350	350	350
<i>mk</i>	-	24	37	49	70
<i>lp</i> 20	175	151	138	126	105
<i>w</i>	210	210	210	210	210
<i>s</i> 0/4	1050	1050	1050	1050	1050
<i>g</i> 1 4/8	150	150	150	150	150
<i>g</i> 2 8/16	350	350	350	350	350
<i>pce</i>	4.5	4.5	5.5	5.5	6.3

**Πίνακας 42** Υπο-ομάδα συνθέσεων Ε: επιρροή ποσοστού υπερρευστοποιητή κ.β. συνδετικού υλικού σε μίγματα ΣΣ

κωδικός σύνθεση	NVC000 NVC11	NVC013 NVC13	NVC025 NVC12	NVC050 NVC14
<b><i>pce/b</i></b>	<b>0.00 %</b>	<b>0.13 %</b>	<b>0.25 %</b>	<b>0.50 %</b>
<i>c</i> 42.5	400	400	400	400
<i>w</i>	204	204	204.0	204
<i>s</i> 0/4	1050	1050	1050	1050
<i>g</i> 1 4/8	200	200	200	200
<i>g</i> 2 8/16	375	375	375	375
<i>pce</i>	0.0	0.5	1.0	2.0

**Πίνακας 43** Υπο-ομάδα συνθέσεων Ζ1: μίγματα ΑΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή

κωδικός σύνθεση	SCC46/255 SCC27	SCC51/198 SCC26	SCC56/109 SCC28
<b><i>w/b</i></b>	<b>0.46</b>	<b>0.51</b>	<b>0.56</b>
<b><i>pce/b</i></b>	<b>2.55 %</b>	<b>1.98 %</b>	<b>1.09 %</b>
<i>c</i> 42.5	350	350	350
<i>lp</i> 20	175	175	175
<i>w</i>	160	177	195
<i>s</i> 0/4	1050	1050	1050
<i>g</i> 1 4/8	150	150	150
<i>g</i> 2 8/16	350	350	350
<i>pce</i>	8.9	6.9	3.8

**Πίνακας 44** Υπο-ομάδα συνθέσεων Ζ2: μίγματα ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή

κωδικός σύνθεση	NVC48/000 NC15	NVC48/063 NC16	NVC51/000 NC11	NVC51/013 NC13	NVC51/025 NC12	NVC51/050 NC14
<b><i>w/b</i></b>	<b>0.48</b>	<b>0.48</b>	<b>0.51</b>	<b>0.51</b>	<b>0.51</b>	<b>0.51</b>
<b><i>pce/b</i></b>	<b>0.00 %</b>	<b>0.63 %</b>	<b>0.00 %</b>	<b>0.13 %</b>	<b>0.25 %</b>	<b>0.50 %</b>
<i>c</i> 42.5	400	400	400	400	400	400
<i>w</i>	192	192	204	204	204	204
<i>s</i> 0/4	1050	1050	1050	1050	1050	1050
<i>g</i> 1 4/8	200	200	200	200	200	200
<i>g</i> 2 8/16	375	375	375	375	375	375
<i>pce</i>	0.0	2.5	0.0	0.5	1.0	2.0

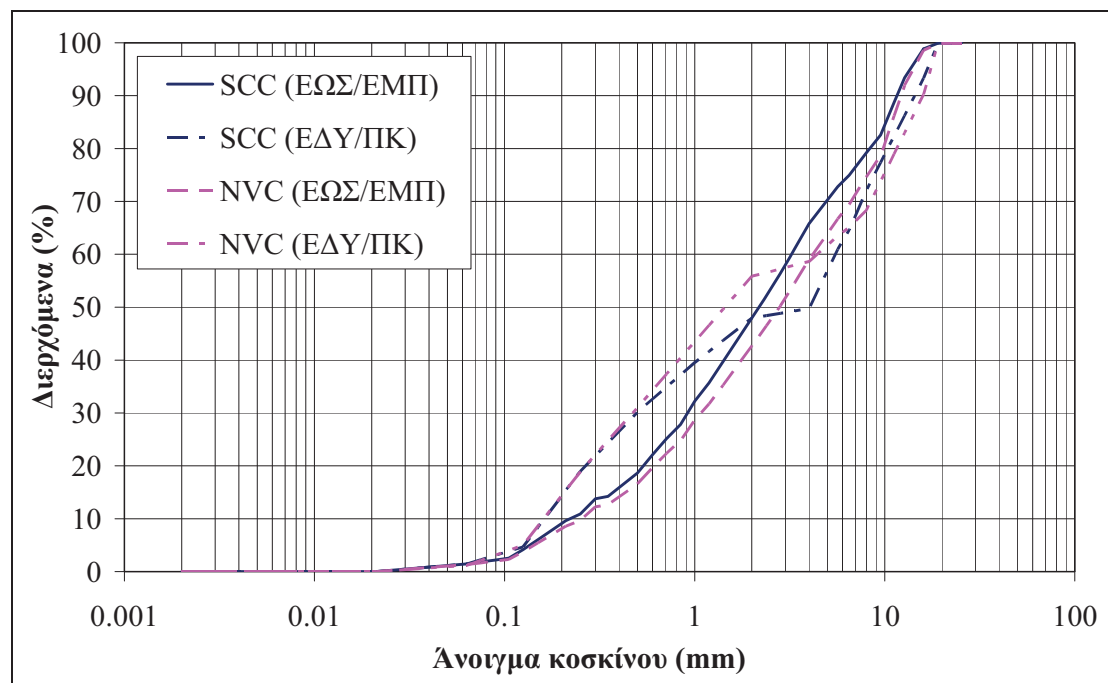
**Πίνακας 45** Υπο-ομάδα συνθέσεων Η1: μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρασκευασθέντα στο ΕΩΣ/ΕΜΠ

κωδικός	NTUA- SCCWB1	NTUA- SCCWB2	NTUA- SCCWB3	NTUA- SCCSF1	NTUA- SCCSF2	NTUA- SCCSF3	NTUA- NVC1	NTUA- NVC2
σύνθεση	SCC22	SCC20	SCC21	SCC23	SCC24	SCC25	NVC09	NVC10
<i>w/b</i>	<b>0.60</b>	<b>0.50</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.56</b>	<b>0.56</b>
<i>sf/b</i>	-	<b>0.0 %</b>	-	<b>4.9 %</b>	<b>10.6 %</b>	<b>14.0 %</b>	-	-
<i>c</i> 42.5	350	350	350	333	313	301	360	360
<i>sf</i>	-	-	-	17	37	49	-	-
<i>lp</i> 20	175	175	175	175	175	175	-	-
<i>w</i>	210	175	157	175	175	175	200	200
<i>s</i> 0/4	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1080	1080
<i>g</i> 1 4/8	150	150	150	150	150	150	225	225
<i>g</i> 2 8/16	350	350	350	350	350	350	495	495
<i>pce</i>	3.4	6.1	10.8	4.5	6.8	7.3	-	2.2

**Πίνακας 46** Υπο-ομάδα συνθέσεων Η2: μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρασκευασθέντα στο ΕΔΥ/ΠΚ

κωδικός	UCY- SCCWB1	UCY- SCCWB2	UCY- SCCWB3	UCY- SCCSF1	UCY- SCCSF2	UCY- SCCSF3	UCY- NVC1	UCY- NVC2
<i>w/b</i>	<b>0.60</b>	<b>0.50</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>
<i>sf/b</i>	-	<b>0.0 %</b>	-	<b>4.9 %</b>	<b>10.6 %</b>	<b>14.0 %</b>	-	-
<i>c</i> 42.5	350	350	350	333	313	301	400	400
<i>sf</i>	-	-	-	17	37	49	-	-
<i>lp</i> 20	175	175	175	175	175	175	-	-
<i>w</i>	210	175	157	175	175	175	200	200
<i>fs</i> 0/2	491	491	491	491	491	491	491	491
<i>s</i> 0/4	280	280	280	280	280	280	280	280
<i>g</i> 1 4/10	500	500	500	500	500	500	500	500
<i>g</i> 2 8/16	300	300	300	300	300	300	300	300
<i>pce</i>	6.1	7.2	13.0	8.0	8.0	9.3	-	6.4*

\*χρησιμοποιήθηκε, εναλλακτικώς, ρευστοποιητής βάσεως πολυαφθαλίνης (*pn*)



**Σχήμα 60** Σύγκριση μιγμάτων αδρανών που εφαρμόστηκαν κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση ιδιοτήτων μιγμάτων σκυροδέματος μεταξύ του ΕΩΣ/ΕΜΠ και του Πανεπιστημίου της Κύπρου

Στο **Σχήμα 60**, παρατίθενται συγκριτικά οι κοκκομετρικές καμπύλες των μιγμάτων των αδρανών, μεταξύ των παρεμφερών μιγμάτων που παρασκευάστηκαν στο

ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ. Υπενθυμίζεται ότι, δεδομένων των κοκκομετρικών καμπυλών των επιμέρους κλασμάτων, επιδιώχθηκε η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ισοδυναμία μεταξύ των κοκκομετρικών καμπυλών των μιγμάτων αδρανών. Είναι προφανές ότι μεταξύ των μιγμάτων αδρανών υπάρχουν διαφορές, οι οποίες θα μπορούσαν να είχαν αντιμετωπιστεί με κατάλληλη κοσκίνιση των επιμέρους αδρανών, ώστε να επιτευχθεί πιο όμοια κοκκομετρία. Ο σκοπός, όμως, της διεργαστηριακής αυτής σύγκρισης ήταν να εξεταστεί η δυνατότητα αναπαραγωγής παρεμφερών μιγμάτων με δεδομένα αδρανή και να συνυπολογιστεί, έτσι, η διαφορετικότητα μεταξύ αδρανών διαφορετικών χωρών. Ως εκ τούτου, η διαφορά αυτή τονίζεται, ώστε να αποτελέσει βάση ερμηνείας για πιθανές διαφορές μεταξύ των ιδιοτήτων που εκτιμήθηκαν.

### 2.2.2.5. Παρασκευή, Δειγματοληψία & Συντήρηση

#### Παρασκευή

Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε περιστρεφόμενος κυλινδρικός αναμκτήρας, χωρητικότητας 100 lt. Ο όγκος των παρασκευαζόμενων μιγμάτων κυμαινόταν μεταξύ 15 και 25 lt για τα δοκιμαστικά μίγματα και 70 και 95 lt για τα υπόλοιπα μίγματα. Σημειώνεται ότι σε ορισμένες συνθέσεις κρίθηκε απαραίτητο να παρασκευαστούν δύο διαδοχικά αναμίγματα για την επάρκεια του υλικού για την πλήρωση των δοκιμίων, αναμίγματα πάντως που αριθμήθηκαν, κατά κανόνα, με διαδοχική και όχι την ίδια αρίθμηση. Η ίδια διαδικασία ανάμιξης χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή όλων των μιγμάτων. Αρχικά, τα αδρανή ομογενοποιούνταν (ξηρή ανάμιξη) και στη συνέχεια προστίθετο το ασβεστολιθικό φίλερ. Στη συνέχεια, γινόταν η προσθήκη του τσιμέντου και τυχόν προκαθορισμένων πρόσμικτων τύπου II (πυριτική παιπάλη, μετακαολίνη) στο ομογενοποιημένο ξηρό μίγμα. Το μίγμα υποβαλλόταν σε μια αρχική υγρή ανάμιξη με το 80 % της συνολικής ποσότητας του νερού, ενώ στη συνέχεια προστιόταν το υπόλοιπο νερό, μαζί με την απαιτούμενη ποσότητα χημικού πρόσθετου.

#### Δειγματοληψία

Μετά από την εκτέλεση των δοκιμών νωπού σκυροδέματος, για τις οποίες θα πραγματοποιηθεί αναλυτική παρουσίαση στην Παρ. 2.3.1, λαμβάνονταν τα προκαθορισμένα δοκίμια. Τα δοκίμια σκυροδετούνταν σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)] για τα μίγματα ΑΣΣ και σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12390-2 (2009) και EN 13670 (2009) για τα μίγματα ΣΣ. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια ΑΣΣ δεν συμπυκνώνονταν μηχανικά κατά τη λήψη τους και πληρώνονταν με αδιάκοπη ροή σκυροδέματος (κατευθείαν από την καταπακτή στη βάση του αναμκτήρα όσο αυτός ήταν εν λειτουργία ή με χρήση σέσουλας, ανάλογα με το δοκίμιο). Αντίθετα, τα δοκίμια ΣΣ πληρώνονταν εν γένει πάνω σε ηλεκτρική δονητική τράπεζα σε δύο στρώσεις, καθεμία εκ των οποίων ακολουθείται από επαρκή μηχανική συμπύκνωση (περίπου 12 s). Για τις περιπτώσεις μεγάλων δοκιμίων, για τα οποία δεν ήταν δυνατή η χρήση της δονητικής τράπεζας, χρησιμοποιούταν χειροκίνητος δονητής μάζας, ενώ δινόταν ιδιαίτερη προσοχή για την εφαρμογή ομοιόμορφης και επαρκούς συμπύκνωσης.

## Συντήρηση

Τα δοκίμια παρέμεναν στις μεταλλικές μήτρες ή τους ξυλότυπους για διάστημα μεταξύ 18 και 24 ωρών μετά τη σκυροδέτησή τους, ενώ τα μεγαλύτερα δοκίμια παρέμεναν στους ξυλότυπους έως και 2 ημέρες. Αναλόγως του σκοπούμενου ελέγχου, τα πρότυπα δοκίμια συντηρούνταν σε δεξαμενή νερού ή σε κανονικές συνθήκες (περιβάλλον εργαστηρίου) έως την ηλικία ελέγχου.

### 2.3. Περιγραφή Δοκιμών – Αποτελέσματα & Σχολιασμός

#### 2.3.1. Δοκιμές νωπού σκυροδέματος

##### 2.3.1.1. Συνοπτική παρουσίαση

Σε όλα τα μίγματα που παρασκευάστηκαν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που αφορούν στις ρεολογικές ιδιότητες και την εργασιμότητα των μιγμάτων (Παρ. 2.3.1.2). Ο Πίνακας 47 συνοψίζει το πλήθος των δοκιμών σε νωπό σκυρόδεμα που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής. Στον Πίνακα αναφέρονται οι μετρούμενες, κάθε φορά, ιδιότητες και η πρότυπη μέθοδος που εφαρμόστηκε.

**Πίνακας 47** Πλήθος μετρήσεων, μετρούμενη κύρια ιδιότητα και πρότυπη μέθοδος ανά πραγματοποιηθείσα δοκιμή νωπού σκυροδέματος

περιγραφή δόκιμης	αγγλικός όρος	μετρούμενη κύρια ιδιότητα	πρότυπη μέθοδος	πλήθος μιγμάτων			
				ΑΣΣ	ΣΣ	Δοκ.	Συν.
κάθιση	slump	εργασιμότητα	EN 12350-2 (2009)	69	22	101	<b>192</b>
εξάπλωση	slump-flow	ικανότητα πλήρωσης, σταθερότητα, ιξώδες	EN 12350-8 (2010)	69	-	55	<b>124</b>
οπτική σταθερότητα	visual stability	(α) δυναμική απόμιξη	ASTM C 1611 (2009)	64	-	43	<b>107</b>
		(β) στατική απόμιξη		28	9	10	<b>47</b>
δακτύλιος J	J-ring	ικανότητα πλήρωσης ικανότητα διέλευσης	EN 12350-12 (2010)	31	-	44	<b>75</b>
χοάνη V	V-funnel	ικανότητα πλήρωσης ικανότητα διέλευσης σταθερότητα	EN 12350-9 (2010)	56	-	11	<b>67</b>
δοχείο L	L-box	ικανότητα πλήρωσης ικανότητα διέλευσης	EN 12350-10 (2010)	63	-	10	<b>73</b>
δοχείο U	U-box	ικανότητα πλήρωσης ικανότητα διέλευσης	μη διαθέσιμη	21	-	6	<b>27</b>
συντελεστής μοναδιαίου βάρους	unit weight coefficient	πυκνότητα νωπού σκυροδέματος	ASTM C 138 (2001)	51	18	-	<b>138</b>
χρόνος πήξης	setting time	έναρξη και λήξη πήξης	ASTM C 403 (1999)	4	3	-	<b>7</b>

Επιπλέον των δοκιμών αυτών, σε μέρος ή στο σύνολο των μιγμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που αφορούν άλλα χαρακτηριστικά του μίγματος στη νωπή του φάση και, ειδικότερα:

- Προσδιορισμός συντελεστή μοναδιαίου βάρους (ΣΜΒ) (Παρ. 2.3.1.3): υπολογισμός συντελεστή αναγωγής συνολικού βάρους μίγματος ανά κυβικό μέτρο, με αναγωγή από πρότυπη μήτρα γνωστού όγκου, σύμφωνα με την πρότυπη

μέθοδο [ASTM C 138 \(2001\)](#). Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε όλα τα μίγματα ΑΣΣ.

- Προσδιορισμός χρόνου πήξης: υπολογισμός απαιτούμενου χρόνου για την έναρξη και τη λήξη της πήξης [παραλλαγή της δοκιμής κατά [ASTM C 403 \(1999\)](#), Παρ. 2.3.1.4]. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε μόνο σε μέρος των μιγμάτων ΑΣΣ.

### 2.3.1.2. Δοκιμές ρεολογίας<sup>5</sup>

#### Συνοπτική περιγραφή ρεολογικών δοκιμών

Για την εκτίμηση της εργασιμότητας των μιγμάτων ΣΣ, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο [EN 12350-2 \(2009\)](#). Για την εκτίμηση των νωπών ιδιοτήτων και την αξιολόγηση της ρεολογικής συμπεριφοράς των μιγμάτων ΑΣΣ, πραγματοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση τουλάχιστον τρεις δοκιμές που αφορούν τις ισάριθμες κύριες ιδιότητες του ΑΣΣ (Παρ. 1.2.1.2 του Κεφαλαίου 1), ενώ σε μέρος των μιγμάτων πραγματοποιήθηκαν επιπλέον δοκιμές (οι πλήρεις περιγραφές που αφορούν τις ειδικές δοκιμές για το ΑΣΣ περιλαμβάνονται στην Παρ. 1.2.1.3 του Κεφαλαίου 1). Στη συνέχεια, και βάσει των αποτελεσμάτων των παραπάνω ελέγχων, τα μίγματα ΣΣ και ΑΣΣ κατατάχθηκαν σε κατηγορίες ρεολογίας, σύμφωνα με Ευρωπαϊκό πρότυπο [EN 206-1 \(2000\)](#) και τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ [[EFNARC \(2005\)](#)], αντιστοίχως. Πραγματοποιήθηκαν οι εξής δοκιμές:

- δοκιμή εξάπλωσης (slump-flow): ανεμπόδιστη εξάπλωση  $SF$ , χρόνος ροής  $t_{500}$  [[EN 12350-8 \(2010\)](#)]. Επιπλέον, κατά την εκτέλεση της δοκιμής εξάπλωσης, μετρήθηκε και η κάθιση  $S$  [[EN 12350-2 \(2009\)](#)]. Σημειώνεται ότι η δοκιμή κάθισης αφορά κυρίως το ΣΣ, αν και στο ΑΣΣ βοηθά στην έμμεση εκτίμηση της απόμιξης του μίγματος (καθίσεις μικρότερες από το συνολικό ύψος του κώνου του Abrams μείον δύο φορές τη διάσταση του μέγιστου κόκκου αδρανούς συνεπάγονται πιθανότητα απομικτικών τάσεων). Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε όλα τα μίγματα ΑΣΣ.
- εκτίμηση σταθερότητας νωπού σκυροδέματος: οπτικός δείκτης σταθερότητας νωπού σκυροδέματος, ΟΔΣ (fresh visual stability index, FVSI) [[ASTM C 1611 \(2009\)](#), [Daczko and Kurtz \(2001\)](#)]. Η εκτίμηση του ΟΔΣ νωπού σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε σε όλα τα μίγματα ΑΣΣ.
- εκτίμηση σταθερότητας σκληρυμένου σκυροδέματος: οπτικός δείκτης σταθερότητας σκληρυμένου σκυροδέματος, ΟΔΣ (hardened visual stability index, HVSI) [[Strube \(2007\)](#)]. Ο προσδιορισμός του εν λόγω δείκτη, παρότι πραγματοποιείται στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, σχετίζεται με τη στατική απόμιξη του σκυροδέματος κατά τη διαδικασία πήξης του, τη μετακίνηση δηλαδή των αδρανών λόγω της βαρύτητας. Η εκτίμηση του ΟΔΣ σκληρυμένου σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε μόνο σε μέρος των μιγμάτων ΑΣΣ.
- δοκιμή δακτυλίου J (J-Ring): εμποδιζόμενη εξάπλωση  $SF_J$ , υψομετρική διαφορά  $PJ$  [[EN 12350-12 \(2010\)](#)]. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε μόνο σε μέρος των μιγμάτων ΑΣΣ.

<sup>5</sup> Σημειώνεται ότι στο πλαίσιο της Διατριβής, λόγω εργαστηριακών περιορισμών (έλλειψη κατάλληλου εξοπλισμού), δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστούν οι παράμετροι του ρεολογικού μοντέλου (τάση διαρροής  $\tau_0$ , πλαστικό ιξώδες  $\mu_p$ , Παρ. 1.2.1.1) Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούν δοκιμές εκτίμησης των χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης που μέσω συνδυαστικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων τους συνδέονται εμμέσως με την εκτίμηση της ρεολογίας των μιγμάτων (Παρ. 1.2.1.3). Για τον λόγο αυτό αναφέρονται εφεξής ως «δοκιμές ρεολογίας».

- δοκιμή χοάνης V (V-funnel): χρόνοι εκροής  $t_v$  και  $t_v 5 \text{ min}$  [EN 12350-9 (2010)]. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε όλα τα μίγματα ΑΣΣ.
- δοκιμή δοχείου L (L-box): χρόνοι ροής  $t_{L,200}$ ,  $t_{L,400}$  και λόγος υψών  $PL$  [EN 12350-10 (2010)]. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε όλα τα μίγματα ΑΣΣ.
- δοκιμή δοχείου U (U-box): χρόνος ροής  $t_u$ , υψομετρική διαφορά  $HU$ . Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε μόνο σε μέρος των μιγμάτων ΑΣΣ.

### Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και ρεολογική κατάταξη μιγμάτων

Στους Πίνακες που ακολουθούν δίδονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών που αφορούν στις ρεολογικές ιδιότητες των μιγμάτων ΑΣΣ<sup>6</sup> και ΣΣ, καθώς και η κατάταξή τους σε κατηγορίες ρεολογίας. Υπενθυμίζεται ότι για τα μίγματα ΑΣΣ (Πίνακας 48 έως Πίνακας 52), η ρεολογική κατάταξη πραγματοποιήθηκε βάσει των Ευρωπαϊκών Οδηγιών για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)], ενώ τα μίγματα ΣΣ (Πίνακας 53 και Πίνακας 54) κατατάχθηκαν σε κατηγορίες εργασιμότητας βάσει του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 206-1 (2000).

**Πίνακας 48** Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC (2005) για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-01 έως SCC-07)\*

τύπος	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC			
<i>a/a</i>	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15			
σύνθεση	016	017	086 <sup>A</sup>	086 <sup>B</sup>	020	022	088 <sup>A</sup>	088 <sup>B</sup>	027	090	039	094	100	043	096			
Slump-flow	<i>S</i>	mm	275	270	250	270	280	270	265	273	275	265	265	265	280	270	265	
	<i>SF</i>	mm	810	780	733	758	700	670	674	708	700	595	665	641	644	643	671	
	<i>SF</i>	-	<b>SF3</b>	<b>SF3</b>	<b>SF2</b>	<b>SF3</b>	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	
	$t_{500}$	s	3.0	7.0	3.7	3.4	4.8	5.0	3.8	2.1	2.7	0.5	1.7	2.8	3.7	3.0	1.4	
	$t_F$	s	20.0	27.0	50.4	37.7	34.1	25.0	38.9	29.8	19.2	41.0	31.1	28.3	26.0	40.3		
	<i>VS</i>	-	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	
J-Ring	<i>SF<sub>J</sub></i>	mm	855	750	-	685	750	620	660	694	670	576	600	638	636	690	669	
	<i>SF/SF<sub>J</sub></i>	-	0.95	1.04	-	1.11	0.93	1.08	1.02	1.02	1.05	1.03	1.11	1.01	1.01	0.93	1.00	
	<i>PJ</i>	mm	12.5	8.8	-	15	3.8	9	10	11.3	11.3	10	25	5	10	10	3.8	
V-funnel	$t_v$	s	41.0	19.1	-	35.6	6.5	11.7	-	8.7	8.2	7.5	6.9	7.1	8.9	4.8	3.3	
	$t_v 5 \text{ min}$	s	48.0	24.9	-	44.2	8.0	14.8	-	10.4	14.6	9.0	9.1	8.1	9.3	5.2	4.0	
	<i>VF</i>	-	<b>&gt;25 s</b>	<b>VF2</b>	-	<b>&gt;25 s</b>	<b>VF1</b>	<b>VF2</b>	-	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	
L-box	$t_{L,200}$	s	1.0	3.5	-	1.6	1.2	1.9	-	0.8	0.5	1.3	0.8	0.6	1.0	1.0	0.8	
	$t_{L,400}$	s	2.0	6.0	-	3.5	2.3	4.2	-	1.4	1.1	1.9	1.3	1.3	2.0	1.7	2.3	
	$\lambda_{H,L}$	%	0.94	0.85	-	0.86	0.97	0.84	-	1.00	0.95	0.94	0.95	0.89	0.89	0.94	0.95	
	<i>PL</i>	-	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	-	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	-	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	
U-box	$t_u$	s	12.0	15.6	-	28.0	98.0	24.3	-	10.9	8.6	-	11.0	6.3	21.8	3.5	4.1	
	<i>HU</i>	mm	0	0	-	305	0	120	-	75	18	-	20	15	40	5	0	
VSI	<i>FVSI</i>	0-4	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	<i>HVSI</i>	0-4	-	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

\*A, B: αναμίγματα κοινής σύνθεσης, S: κατηγορία ικανότητας ροής με βάση την κάθιση (S1:  $10 \leq S \leq 40 \text{ mm}$ , S2:  $50 \leq S \leq 90 \text{ mm}$ , S3:  $100 \leq S \leq 150 \text{ mm}$ , S4:  $160 \leq S \leq 210 \text{ mm}$ , S5:  $S \geq 220 \text{ mm}$ ), SF: ανεμπόδιστη εξάπλωση / κατηγορία ικανότητας ροής με βάση την εξάπλωση (SF1:  $550 \leq SF \leq 650 \text{ mm}$ , SF2:  $660 < SF \leq 750 \text{ mm}$ , SF3:  $760 < SF \leq 850 \text{ mm}$ ),  $t_{500}$ : χρόνος ροής μέχρι τη διάμετρο 500 mm,  $t_F$ : χρόνος ροής μέχρι την αποκατάσταση ηρεμίας, VS: κατηγορία ιξώδους με βάση τον χρόνο ροής  $t_{500}$  (VS1:  $t_{500} \leq 2.0 \text{ s}$ , VS2:  $t_{500} > 2.0 \text{ s}$ ), *SF<sub>J</sub>*: εμποδιζόμενη εξάπλωση, *SF/SF<sub>J</sub>*: λόγος εξάπλωσεων ανεμπόδιστης προς εμποδιζόμενης ροής, *PJ*: υψομετρική διαφορά εσωτερικά και εξωτερικά του δακτυλίου J,  $t_v$ : χρόνος εκροής από τη χοάνη,  $t_v 5 \text{ min}$ : χρόνος εκροής από τη χοάνη μετά από παραμονή υλικού σε κατάσταση ηρεμίας για 5 min, *VF*: κατηγορία ιξώδους με βάση τον χρόνο εκροής από τη χοάνη V (VF1:  $t_v \leq 9.0 \text{ s}$ , VF2:  $9.0 < t_v \leq 25.0 \text{ s}$ ),  $t_{L,200}$ ,  $t_{L,400}$ : χρόνοι ροής εντός του οριζόντιου στελέχους του δοχείου L μέχρι απόστασης 200 και 400 mm, αντιστοίχως,  $\lambda_{H,L}$ : λόγος υψών υλικού στα άκρα του οριζόντιου στελέχους του δοχείου L, *PL*: κατηγορία διειλευσιμότητας με βάση την ικανότητα διέλευσης από το δοχείο L (PL1:  $\lambda_{H,L} \geq 0.80$  με δύο ράβδους, PL2:  $\lambda_{H,L} \geq 0.80$  με τρεις ράβδους),  $t_u$ : χρόνος αποκατάστασης ηρεμίας εντός του δοχείου U, *HU*: υψομετρική διαφορά υλικού στα δύο διαμερίσματα του δοχείου U, *FVSI*: δείκτης οπτικής σταθερότητας νοπού σκυροδέματος (με βάση την εξαπλωμένη πίτα κατά τον έλεγχο ανεμπόδιστης εξάπλωσης), *HVSI*: δείκτης οπτικής σταθερότητας σκληρυμένου σκυροδέματος (με βάση την κατανομή κονιάματος και χονδρόκοκκων αδρανών στα σκληρυμένα κυλινδρικά δοκίμια σε ηλικία 28 d).

<sup>6</sup> Η τιμή της κάθισης, *S* (mm), μετρήθηκε με σκοπό τη διαπίστωση (πέραν της οπτικής) τυχόν προβλημάτων απόμιξης στο κέντρο της εξαπλωμένης μάζας σκυροδέματος (για τιμές άνω της διπλάσιας τιμής της διαμέτρου μέγιστου αδρανούς).





**Πίνακας 51** Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της **EFNARC (2005)** για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-32 έως SCC-46) \*

τύπος		SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC		
α/α		32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	
σύνθεση		139	142	145	147	149	151	152	155	156	157	158	159	160	161	162	
Slump-flow	S	mm	285	275	260	265	275	265	270	260	285	265	265	270	275	290	260
	SF	mm	720	685	589	623	684	555	600	565	735	588	669	589	645	762	610
	SF	-	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF3</b>	<b>SF1</b>
	t <sub>500</sub>	s	0.9	0.5	1.6	1.4	1.6	1.6	0.7	2.4	0.4	1.7	1.4	2.6	1.5	1.1	1.6
	t <sub>F</sub>	s	19.3	10.9	15.6	15.3	15.7	1.7	5.4	8.3	1.4	11.2	7.1	9.1	10.3	16.2	10.1
	VS	-	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>
J-Ring	SF <sub>J</sub>	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SF/SF <sub>J</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	PJ	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
V-funnel	t <sub>v</sub>	s	1.8	1.2	5.3	5.0	5.3	-	-	-	-	-	-	-	4.0	5.9	
	t <sub>v</sub> 5 min	s	1.9	2.0	7.9	5.8	6.6	-	-	-	-	-	-	-	4.5	7.5	
	VF	-	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	-	-	-	-	-	-	-	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	
L-box	t <sub>L,200</sub>	s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	t <sub>L,400</sub>	s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	λ <sub>H,L</sub>	%	1.00	1.00	0.79	0.80	0.94	-	-	-	-	-	-	-	0.95	0.62	
	PL	-	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL1</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	-	-	-	-	-	-	-	<b>PL2</b>	<b>&lt;0,75</b>	
U-box	t <sub>U</sub>	s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	HU	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
VSI	FVSI	0-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	HVSI	0-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

**Πίνακας 52** Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη σύμφωνα με τις οδηγίες της **EFNARC (2005)** για τα μίγματα ΑΣΣ (SCC-47 έως SCC-54) \*

τύπος		SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	
α/α		47	48	49	50	51	52	53	54	
σύνθεση		163	164	165	166	167	168	169	170	
Slump-flow	S	mm	260	270	275	275	285	270	270	275
	SF	mm	595	653	649	624	678	673	610	716
	SF	-	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>
	t <sub>500</sub>	s	1.5	1.5	1.8	3.1	1.7	1.5	2.8	2.1
	t <sub>F</sub>	s	8.9	10.3	6.9	10.8	8.2	8.2	10.5	7.1
	VS	-	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>
J-Ring	SF <sub>J</sub>	mm	-	-	-	-	-	-	-	
	SF/SF <sub>J</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	
	PJ	mm	-	-	-	-	-	-	-	
V-funnel	t <sub>v</sub>	s	6.1	5.2	6.0	7.4	6.6	5.3	7.0	4.8
	t <sub>v</sub> 5 min	s	6.6	7.4	7.4	11.5	8.6	7.1	9.0	5.7
	VF	-	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>
L-box	t <sub>L,200</sub>	s	-	-	-	-	-	-	-	
	t <sub>L,400</sub>	s	-	-	-	-	-	-	-	
	λ <sub>H,L</sub>	%	0.75	0.95	0.89	0.84	0.89	0.90	0.80	1.00
	PL	-	<b>PL1</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>
U-box	t <sub>U</sub>	s	-	-	-	-	-	-	-	
	HU	mm	-	-	-	-	-	-	-	
VSI	FVSI	0-4	0	0	0	0	0	0	0	
	HVSI	0-4	-	-	-	-	-	-	-	

\*A, B: αναμίγματα κοινής σύνθεσης, S: κατηγορία ικανότητας ροής με βάση την κάθιση (S1: 10 ≤ S ≤ 40 mm, S2: 50 ≤ S ≤ 90 mm, S3: 100 ≤ S ≤ 150 mm, S4: 160 ≤ S ≤ 210mm, S5: S ≥ 220 mm), SF: ανεμπόδιστη εξάπλωση / κατηγορία ικανότητας ροής με βάση την εξάπλωση (SF1: 550 ≤ SF ≤ 650 mm, SF2: 660 < SF ≤ 750 mm, SF3: 760 < SF ≤ 850 mm), t<sub>500</sub>: χρόνος ροής μέχρι τη διάμετρο 500 mm, t<sub>F</sub>: χρόνος ροής μέχρι την αποκατάσταση ηρεμίας, VS: κατηγορία ιξώδους με βάση τον χρόνο ροής t<sub>500</sub> (VS1: t<sub>500</sub> ≤ 2.0 s, VS2: t<sub>500</sub> > 2.0 s), SF<sub>J</sub>: εμποδιζόμενη εξάπλωση, SF/SF<sub>J</sub>: λόγος εξαπλώσεων ανεμπόδιστης προς εμποδιζόμενης ροής, PJ: υψομετρική διαφορά εσωτερικά και εξωτερικά του δακτυλίου J, t<sub>v</sub>: χρόνος εκροής από τη χοάνη, t<sub>v</sub> 5 min: χρόνος εκροής από τη χοάνη μετά από παραμονή υλικού σε κατάσταση ηρεμίας για 5 min, VF: κατηγορία ιξώδους με βάση τον χρόνο εκροής από τη χοάνη V (VF1: t<sub>v</sub> ≤ 9.0 s, VF2: 9.0 < t<sub>v</sub> ≤ 25.0 s), t<sub>L,200</sub>, t<sub>L,400</sub>: χρόνοι ροής εντός του οριζώντιου στελέχους του δοχείου L μέχρι απόσταση 200 και 400 mm, αντιστοίχως, λ<sub>H,L</sub>: λόγος υψών υλικού στα άκρα του οριζώντιου στελέχους του δοχείου L, PL: κατηγορία διελυσσιμότητας με βάση την ικανότητα διέλευσης από το δοχείο L (PL1: λ<sub>H,L</sub> ≥ 0.80 με δύο ράβδους, PL2: λ<sub>H,L</sub> ≥ 0.80 με τρεις ράβδους), t<sub>U</sub>: χρόνος αποκατάστασης ηρεμίας εντός του δοχείου U, HU: υψομετρική διαφορά υλικού στα δύο διαμερίσματα του δοχείου U, FVSI: δείκτης οπτικής σταθερότητας νοπού σκυροδέματος (με βάση την εξάπλωμένη πίτα κατά τον έλεγχο ανεμπόδιστης εξάπλωσης), HVSI: δείκτης οπτικής σταθερότητας σκληρυμένου σκυροδέματος (με βάση την κατανομή κονιάματος και χονδρόκοκκων αδρανών στα σκληρυμένα κυλινδρικά δοκίμια σε ηλικία 28 d).

**Πίνακας 53** Αποτελέσματα δοκιμών κάθισης και κατάταξη σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1 (2000) για τα μίγματα ΣΣ (NVC-01 έως NVC-09) \*

τύπος α/α	NVC 01	NVC 02	NVC 03			NVC 04					NVC 05	NVC 06	NVC 07	NVC 08	NVC 09	
σύνθεση	060	065	070	079	093	101	084 <sup>A</sup>	084 <sup>B</sup>	095	103	085	089	107	110	122	
S	mm	-	-	45	140	30	140	170	240	185	230	-	90	-	50	100
S <sub>jump</sub>	S	-	-	S1	S3	S1	S3	S4	S5	S4	S5	S2	S2	-	S2	S3

\* S: κατηγορία ικανότητας ροής με βάση την κάθιση (S1:  $10 \leq S \leq 40$  mm, S2:  $50 \leq S \leq 90$  mm, S3:  $100 \leq S \leq 150$  mm, S4:  $160 \leq S \leq 210$  mm, S5:  $S \geq 220$  mm)

**Πίνακας 54** Αποτελέσματα δοκιμών κάθισης και κατάταξη σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1 (2000) για τα μίγματα ΣΣ (NVC-10 έως NVC-16) \*

τύπος α/α	NVC 10	NVC 11	NVC 12		NVC 13		NVC 14		NVC 15	NVC 16			
σύνθεση	123	130	131	132	133	140	141	143	144	171	172		
S	mm	270	30	30	185	185	50	50	200	200	30	215	
S <sub>jump</sub>	S	-	S5	S1	S1	S4	S4	S2	S2	S4	S4	S1	S5

\* S: κατηγορία ικανότητας ροής με βάση την κάθιση (S1:  $10 \leq S \leq 40$  mm, S2:  $50 \leq S \leq 90$  mm, S3:  $100 \leq S \leq 150$  mm, S4:  $160 \leq S \leq 210$  mm, S5:  $S \geq 220$  mm)

### Αξιολόγηση ρεολογικών χαρακτηριστικών

*Γενικές παρατηρήσεις* – Είναι προφανές ότι οι ρεολογικές ιδιότητες των μιγμάτων επηρεάζονται σημαντικά από τη σύνθεση, καθώς και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των συστατικών. Για παράδειγμα, τα φυσικά χαρακτηριστικά των αδρανών και των τσιμεντοειδών υλικών που σχετίζονται με την κοκκομετρία τους και, ειδικότερα, με την κατανομή, τη λεπτότητα και το σχήμα των κόκκων, μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά τη ρευστότητα και την ικανότητα διέλευσης του σκυροδέματος. Από την άλλη πλευρά, η χημική δράση τσιμεντοειδών υλικών και χημικών πρόσθετων μπορούν να συμβάλουν τόσο στην ικανότητα ροής, όσο και στην ικανότητα του μίγματος να ανθίσταται σε ενδεχόμενη απόμειξη.

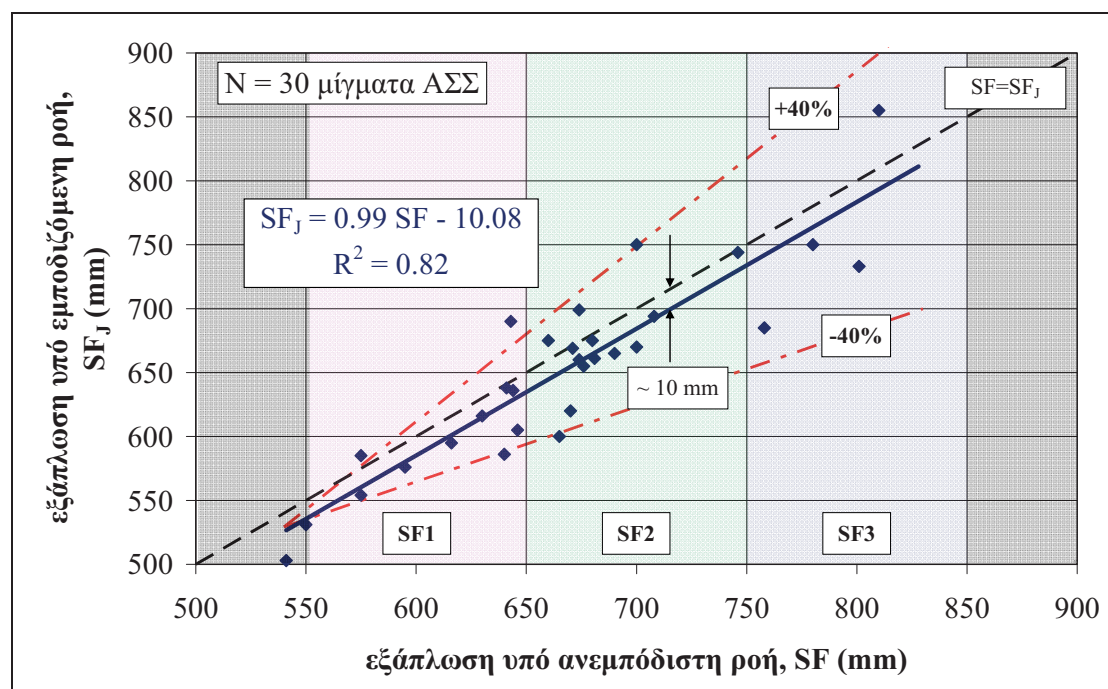
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, παρασκευάστηκαν σε πρώτη φάση μίγματα με σκοπό αφενός την δοκιμαστική ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων συστατικών (τύποι τσιμέντου, πρόσμικτα τύπου I ή II, αδρανή, νερό, χημικά πρόσθετα), σε διαφορετικές περιεκτικότητες, και αφετέρου τη βελτίωση του εξοπλισμού και των μεθοδολογιών εφαρμογής των διάφορων εργαστηριακών δοκιμών. Παρά το γεγονός ότι τα μίγματα αυτά δεν ανήκαν σε ευρύτερες ομάδες, τα ρεολογικά τους αποτελέσματα καταγράφηκαν, ώστε να αξιολογηθούν μακροσκοπικά, σε ενιαία βάση, ανεξαρτήτως της σύνθεσης. Σε επόμενο στάδιο της Διατριβής, παρασκευάστηκαν υπο-ομάδες μιγμάτων με απώτερο κύριο στόχο τον έλεγχο των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στη σκληρυμένη κατάσταση (μηχανικά χαρακτηριστικά, με έμφαση στη συνάφεια, καθώς και ιδιότητες ανθεκτικότητας). Στα εν λόγω μίγματα, επιδιώχθηκε οι ρεολογικές ιδιότητες να είναι παρεμφερείς, μέσω κατάλληλης προσαρμογής της περιεκτικότητας χημικών πρόσθετων, ώστε η σύγκριση να γίνεται στη βάση της ίδιας ρεολογικής κατηγορίας.

*Συσχετίσεις ρεολογικών δοκιμών* – Το σκεπτικό των συσχετίσεων μεταξύ των ρεολογικών δοκιμών είναι η διερεύνηση της δυνατότητας διεύρυνσης του πλήθους των ρεολογικών χαρακτηριστικών που εκτιμώνται από συγκεκριμένες δοκιμές, γεγονός που μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε καλύτερη εκτίμηση της ρεολογίας ή ακόμα και περιορισμό των ελάχιστων απαιτούμενων δοκιμών που πραγματοποιούνται. Για παράδειγμα, η δυνατότητα εκτίμησης της ικανότητας

διέλευσης ή της αντίστασης σε πιθανό διαχωρισμό (απόμιξη) μέσω της συνεκτίμησης της ανεμπόδιστης εξάπλωσης  $SF$  και του χρόνου εξάπλωσης  $t_{500}$  της δοκιμής εξάπλωσης θα μπορούσε είτε να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα των δοκιμών εξάπλωσης υπό εμποδιζόμενη ροή (δοκιμή δακτυλίου J) και χοάνης V ή ακόμα και να περιορίσει την ανάγκη εκτέλεσής τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορες συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των ρεολογικών δοκιμών για τα διάφορα μίγματα, ανεξαρτήτως της σύνθεσής τους. Σημειώνεται ότι από τις συσχετίσεις μεταξύ των υπόλοιπων ρεολογικών μεγεθών προέκυψαν αρκετά ασταθή<sup>7</sup> ή μη αξιόλογα αποτελέσματα.

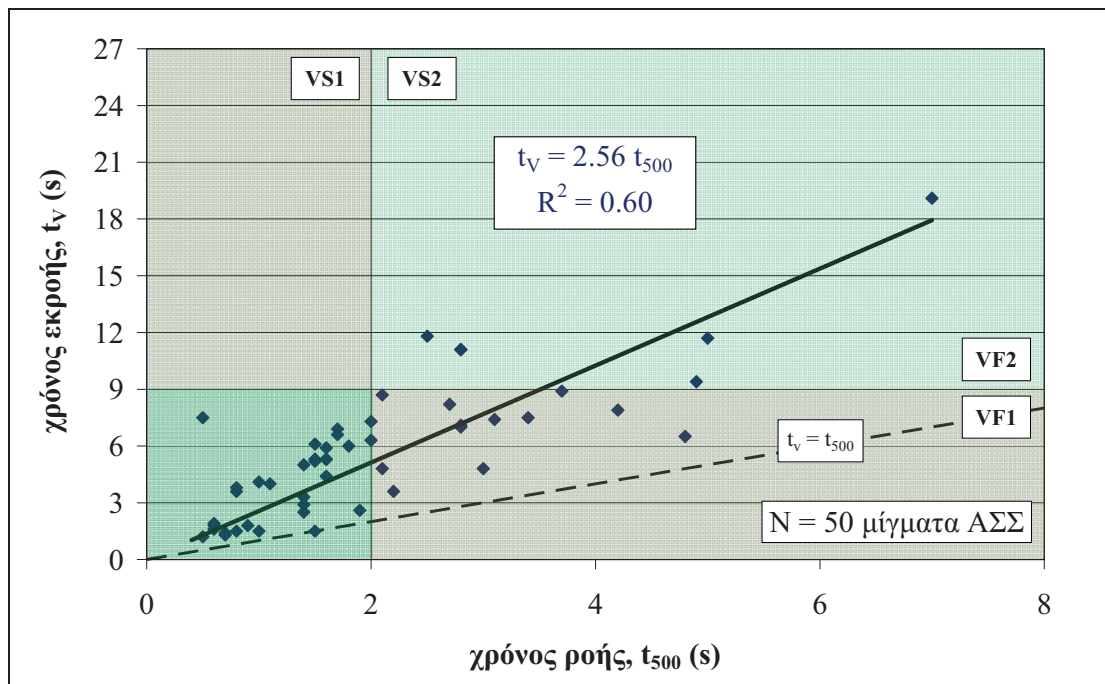
Στο **Σχήμα 61** παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των εξαπλώσεων υπό εμποδιζόμενη και ανεμπόδιστη ροή. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι εξαπλώσεις συνολικά 30 μιγμάτων ΑΣΣ, όπως αυτές καταγράφηκαν από τις δοκιμές δακτυλίου J,  $SF_J$  (mm), και τη δοκιμή εξάπλωσης,  $SF$  (mm). Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ότι η εξάπλωση υπό εμποδιζόμενη ροή είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την αντίστοιχη εξάπλωση υπό ανεμπόδιστη ροή και, μάλιστα, η διαφορά τους παραμένει σταθερή για όλο το εύρος των εξεταζόμενων εξαπλώσεων και περίπου ίση με 10 mm. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι αρκετά υψηλός ( $R^2 = 0.82$ ).



**Σχήμα 61** Συσχέτιση μεταξύ εξαπλώσεων υπό εμποδιζόμενη και ανεμπόδιστη ροή (30 μίγματα ΑΣΣ)

<sup>7</sup> Η αξιολόγηση των συσχετίσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Διατριβής έγινε γραφικά και με γνώμονα την τιμή του συντελεστή συσχέτισης,  $R^2$ . Η αξιολόγηση της τιμής του συντελεστή (ικανοποιητικός ή μη) σχετίζεται, αφενός, με το πλήθος των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων και, αφετέρου, με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δεδομένων αυτών. Ειδικότερα, για μεγάλο πλήθος δεδομένων με πολλά διαφορετικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά σύνθεσης ένας πρακτικώς μικρός συντελεστής (π.χ. περί του 0.50) θα μπορούσε να αξιολογηθεί ως 'ικανοποιητικός', ενώ για συσχετίσεις μεγεθών με μοναδική μεταβλητή και σταθερά λοιπά χαρακτηριστικά σύνθεσης, ως 'ικανοποιητικός' θα μπορούσε να αξιολογηθεί ένας συντελεστής σημαντικώς μεγαλύτερος (π.χ. άνω του 0.70). Στα Κεφάλαια που ακολουθούν οι συντελεστές συσχέτισης δίδονται εν γένει ως τιμές και η αξιολόγησή τους γίνεται υποκειμενικά, κατά περίπτωση, βάσει του πλαισίου που διερευνώνται.

Η διαφορά των δύο εξαπλώσεων οφείλεται στις, έστω και περιορισμένες, συνθήκες έμφραξης του μίγματος στις κατακόρυφες ράβδους του δακτυλίου J και τη συνεπακόλουθη ανακοπή της ροής του. Αν και η παραπάνω εξήγηση αφορά τη γενική τάση, παρατηρούνται ζεύγη τιμών χαμηλότερα ή υψηλότερα της μέσης καμπύλης γραμμικής παλινδρόμησης. Χαμηλότερες τιμές συνεπάγονται μεγαλύτερη τάση έμφραξης του μίγματος στα συναντούμενα εμπόδια, ενώ υψηλότερες τιμές συνεπάγονται συνήθως απομικτικές τάσεις του μίγματος, αν και όχι αποτρεπτικές, με τα χονδρόκοκκα συστατικά να υπολείπονται του κονιάματος, που εξαπλώνεται ελαφρώς περισσότερο. Εκτιμάται ότι το φαινόμενο απόκλισης από τη μέση καμπύλη εντείνεται για μεγαλύτερες τιμές της εξάπλωσης, σε ποσοστά έως  $\pm 40\%$ , για τις οποίες η υψηλή, πλέον, ρευστότητα του μίγματος φαίνεται να οδηγεί το μίγμα σε μεγαλύτερη τάση απόμικξης και εμπλοκής σε εμπόδια που συναντά στην πορεία του.

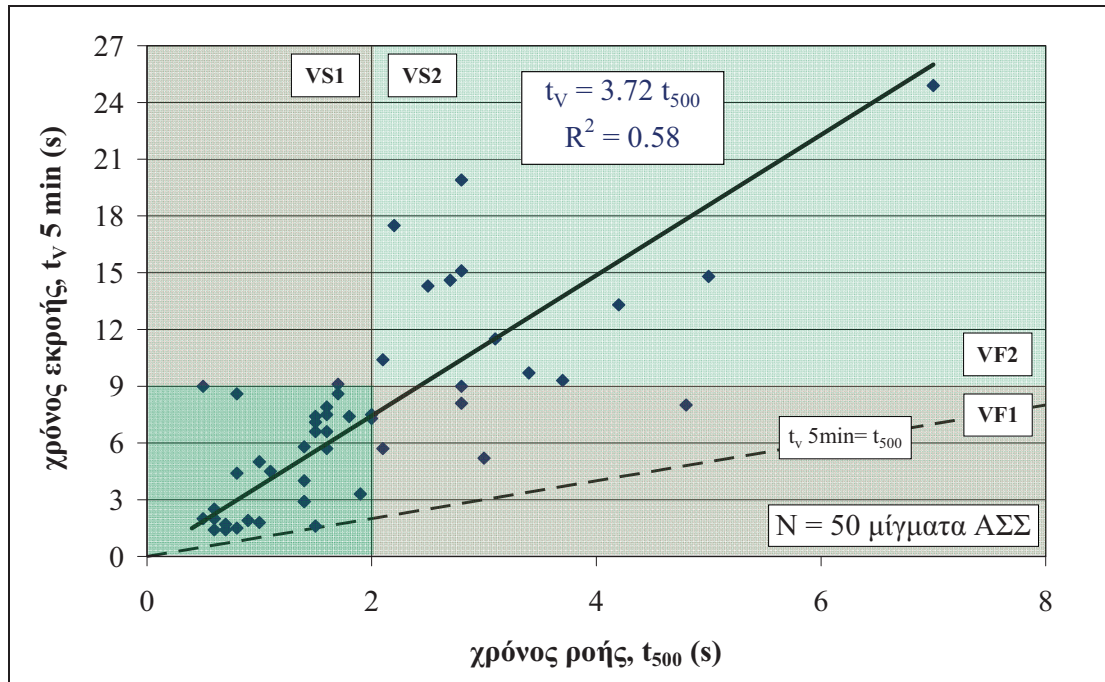


Σχήμα 62 Συσχέτιση μεταξύ χρόνου εκροής  $t_v$  και χρόνου ροής  $t_{500}$  (50 μίγματα ΑΣΣ)

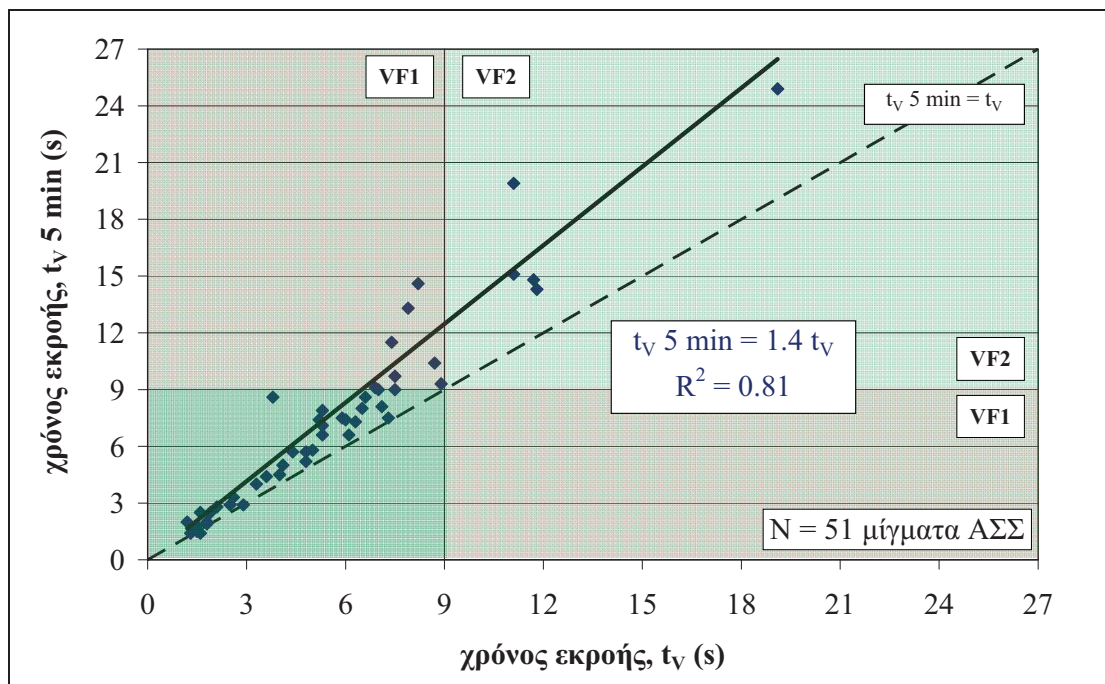
Στο Σχήμα 62 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ του χρόνου εκροής,  $t_v$  (s), από το στόμιο της χοάνης V και του χρόνου ροής,  $t_{500}$  (s), κατά τη δοκιμή εξάπλωσης, για συνολικά 50 μίγματα ΑΣΣ. Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα δεν συμπεριλήφθηκαν οι συνθέσεις SCC01, SCC02 (α/α σύνθεσης: 086<sup>B</sup>) και SCC21, που σημείωσαν χρόνους εκροής  $t_v$  μεγαλύτερους από 25 s, καθώς και η σύνθεση SCC18, η οποία παρουσίασε αντιφατικά αποτελέσματα και, ειδικότερα, πολύ υψηλό χρόνο ροής  $t_{500}$  σε συνδυασμό με πολύ χαμηλό χρόνο εκροής  $t_v$ . Η απόρριψη των εν λόγω ζευγών τιμών θεωρείται αναγκαία, καθώς θεωρείται ότι θα επηρέαζαν δυσανάλογα την εκτιμώμενη τάση συσχέτισης. Από τη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των υπόλοιπων χρόνων, παρατηρείται ότι ο χρόνος εκροής  $t_v$  είναι περίπου 2.5 φορές υψηλότερος από το χρόνο ροής  $t_{500}$ , με δεδομένη την σύμπτωσή τους στην αρχή των αξόνων (για  $t = 0$  s).

Δεδομένου ότι και οι δύο χρόνοι δίνουν μία ποιοτική εκτίμηση του ιξώδους, αναμένουμε τα ζεύγη τιμών κάθε μίγματος να βρίσκονται σε αντίστοιχες κατηγορίες ιξώδους (VS1-VF1 ή VS2-VF2), όπως αυτές περιγράφονται από την κάθε δοκιμή. Παρατηρούμε, όμως, ότι για ένα ποσοστό περίπου 25 % των μιγμάτων ΑΣΣ (δώδεκα από τα πενήντα μίγματα) παρουσιάζει υψηλούς χρόνους ροής  $t_{500}$  (κατηγορία ιξώδους

VS2) σε συνδυασμό με χαμηλούς χρόνους εκροής  $t_v$  (κατηγορία ιξώδους VF1). Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων δοκιμών των εν λόγω μιγμάτων οδήγησε στα ακόλουθα ευρήματα: από τη δοκιμή δακτυλίου J, η οποία είχε διεξαχθεί στα εννέα από τα δώδεκα μίγματα, δεν προέκυψε κάποια σημαντική τάση έμφραξης, παρά μόνο για τα μίγματα SCC03 και SCC07, τα οποία εμφάνισαν μικρές απομικτικές τάσεις ( $SF_J > SF$ ). Επιπλέον, με εξαίρεση το μίγμα SCC53, στα υπόλοιπα έντεκα μίγματα, δεν παρατηρήθηκε κάποια εμπλοκή κατά τη δοκιμή δοχείου L και οι λόγοι υψών,  $PL$ , ήταν γενικώς υψηλοί.



Σχήμα 63 Συσχέτιση μεταξύ χρόνου εκροής  $t_v$ , 5 min και χρόνου ροής  $t_{500}$  (50 μίγματα ΑΣΣ)



Σχήμα 64 Συσχέτιση μεταξύ χρόνων εκροής  $t_v$  και  $t_v$ , 5 min (51 μίγματα ΑΣΣ)

Τέλος, από τη δοκιμή δοχείου U σε οκτώ από τα μίγματα, προέκυψαν σχετικά υψηλές υψομετρικές διαφορές μόνο στα μίγματα SCC04 (α/α σύνθεσης: 088<sup>B</sup>) και SCC06, που συνεπάγονται μικρή τάση έμφραξης. Δεδομένης της αξιολόγησης αυτής και μη συνυπολογιζόμενων των παραπάνω μιγμάτων, αλλά και μιγμάτων με χρόνους ροής αρκετά κοντά στο όριο μεταξύ των κατηγοριών VS1 και VS2, θα μπορούσε να υποθεθεί ότι μια μετάθεση του ορίου μεταξύ των κατηγοριών VF1 και VF2 από 9 σε 7 s, που μεταφράζεται σε μείωση κατά περίπου 20 %, θα μπορούσε να οδηγήσει σε ταύτιση των κατηγοριών ιξώδους για τους δύο ελέγχους.

Η επίτευξη ισοδυναμίας μεταξύ των δύο μεθόδων θεωρείται πολύ ουσιαστική, μιας και θα μπορούσε να περιορίσει σημαντικά ή και να εξαλείψει την ανάγκη για την εκτέλεση της δοκιμής χοάνης V. Βέβαια, δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός ότι η δοκιμή χοάνης V περιλαμβάνει και τη δεύτερη φάση, που αφορά στην καταγραφή του χρόνου εκροής  $t_v$  5 min (s), ο οποίος αποτελεί ένδειξη της τάσης απόμιξης του μίγματος, όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 1.2.1.3 του Κεφαλαίου 1. Στο αντίστοιχο διάγραμμα συσχέτισης του χρόνου ροής  $t_{500}$  και του χρόνου εκροής  $t_v$  5 min (**Σχήμα 63**) παρατηρούμε ότι η διασπορά των σημείων είναι σημαντικά μεγαλύτερη, γεγονός που αποδεικνύεται και από το μειωμένο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2 = 0.58$ ). Αξίζει πάντως να αναφερθεί ότι η κατάταξη των μιγμάτων είναι περισσότερο παρεμφερής με την κατάταξη βάσει του χρόνου  $t_{500}$ , από ότι στην περίπτωση εκτίμησης με τον χρόνο  $t_v$ . Πάντως, από το **Σχήμα 64** μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η τάση απόμιξης είναι εν γένει προβλέψιμη και αυξάνεται για μεγαλύτερους χρόνους εκροής  $t_v$ . Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι ο υπολογισμός του χρόνου εκροής της δεύτερης φάσης μπορεί να γίνει, με αρκετά καλή ασφάλεια ( $R^2 = 0.81$ ), μέσω της επαύξησης του χρόνου εκροής της πρώτης φάσης κατά περίπου 40 %. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται έναν μονοσήμαντο ορισμό του  $t_v$  5 min εν σχέσει προς τον χρόνο  $t_v$  και, επομένως, τίθεται υπό αμφισβήτηση η ουσιαστική αξία της δεύτερης μέτρησης για την εκτίμηση της τάσης απόμιξης. Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα αυτό δεν έχουν συμπεριληφθεί οι συνθέσεις SCC01, SCC02 (α/α σύνθεσης: 086<sup>B</sup>) και SCC21, που σημείωσαν χρόνους εκροής  $t_v$  μεγαλύτερους από 25 s. Επιπλέον, δεν ελήφθη υπόψη η σύνθεση SCC09 (α/α σύνθεσης: 097), η οποία σημείωσε σημαντική τάση απόμιξης, η οποία διαπιστώθηκε μέσω της μεγάλης διαφοράς μεταξύ των χρόνων  $t_v$  και  $t_v$  5 min και της χαμηλής αντίστασης σε στατική απόμιξη (υψηλός οπτικός δείκτης σταθερότητας σκληρωμένου σκυροδέματος).

### 2.3.1.3. Συντελεστής μοναδιαίου βάρους

Ο συντελεστής μοναδιαίου βάρους, ΣΜΒ, προσδιορίζεται με απλή μέθοδο αναγωγής του βάρους σκυροδέματος εντός δοχείου γνωστού όγκου σε βάρος ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος. Η διαδικασία πραγματοποιείται σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο [ASTM C 138 \(2001\)](#). Συγκεκριμένα, το καθαρό βάρος του σκυροδέματος,  $W_{exp}$ , όπως προκύπτει από τη διαφορά του μικτού βάρους του πληρωμένου με σκυρόδεμα δοχείου και του απόβαρου, συγκρίνεται με το θεωρητικό βάρος του σκυροδέματος,  $W_{th}$ , ως άθροισμα των εισαγόμενων συστατικών του μίγματος. Από το πηλίκο του βάρους  $W_{exp}$  προς το βάρος  $W_{th}$  προκύπτει ο συντελεστής μοναδιαίου βάρους, ΣΜΒ, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό που ο θεωρητικός όγκος του σκυροδέματος υπολείπεται ( $\Sigma\text{ΜΒ} > 1.000$ ) ή υπερβαίνει ( $\Sigma\text{ΜΒ} < 1.000$ ) το ένα κυβικό μέτρο. Η διαφορά αυτή έγκειται στην μη συνυπολογιζόμενη περιεκτικότητα αέρα ή διαφορές κλίμακας κατά την συλλογή των υλικών. Γενικά, τιμές του ΣΜΒ κοντά στο  $\pm 3 \%$  ( $0.970 < \Sigma\text{ΜΒ} < 1.030$ ) μπορεί να θεωρηθούν ανεκτές, ενώ

μεγαλύτερες αποκλίσεις θα μπορούσαν, κατά περίπτωση, να θέσουν υπό αμφισβήτηση την επιτυχία της ανάμιξης. Για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής ο ΣΜΒ προέκυψε από το μέσο όρο δύο τιμών από δύο πρότυπες κυβικές μεταλλικές μήτρες, ακμής 150 mm. Οι υπολογισθέντες συντελεστές αναγράφονται στους αναλυτικούς Πίνακες των συνθέσεων (Πίνακας 29 έως Πίνακας 35).

#### 2.3.1.4. Χρόνος πήξης

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

Η δοκιμή που αφορά στον προσδιορισμό του χρόνου πήξης του σκυροδέματος πραγματοποιείται με βάση την πρότυπη μέθοδο [ASTM C 403 \(1999\)](#), η οποία σε προγενέστερη έκδοσή της είχε υιοθετηθεί από την ελληνική οδηγία [ΣΚ-313 \(1980\)](#). Ο προσδιορισμός του χρόνου πήξης πραγματοποιείται σε νωπό τσιμεντοκονίαμα που έχει συλλεχθεί από μίγμα σκυροδέματος, μέσω της διαδικασίας του υγρού κοσκινίσματος (κοσκίνισμα νωπού σκυροδέματος σε κόσκινο No 4 ή 4.75 mm). Κατάλληλες μήτρες ή δοχεία πληρούνται με κοσκινισμένο τσιμεντοκονίαμα, το οποίο συμπυκνώνεται κατάλληλα, με χρήση ράβδου συμπυκνώσεως, ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, ο βαθμός πήξης του σκυροδέματος προσδιορίζεται από την αντίσταση,  $PR$  ( $N/mm^2$ ), ειδικής βελόνας κατά την διείσδυση στο νωπό τσιμεντοκονίαμα. Ειδικότερα, καταγράφεται η αντίσταση διείσδυσης στο σκυρόδεμα πρότυπων λείων βελόνων τριών διαμέτρων (6, 8 και 16 mm). Η επιλεγόμενη διάμετρος της βελόνας εξαρτάται από το βαθμό πήξης του τσιμεντοκονίαματος, όπου μεγαλύτερος βαθμός πήξης απαιτεί μικρότερες διαμέτρους βελόνας. Η βελόνα διεισδύει κατακόρυφα στο σκυρόδεμα έως προκαθορισμένο βάθος (25 mm), με σταθερό ρυθμό διείσδυσης και συγκεκριμένη διάρκεια (περίπου 10 s). Από τη γραφική απεικόνιση της αντίστασης διείσδυσης σε συνάρτηση με το χρόνο μπορούν να προσδιοριστούν οι χρόνοι έναρξης και λήξης της πήξης,  $t_{in}$  (min) και  $t_{fin}$  (min), αντίστοιχα. Σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο πρότυπο, η καμπύλη έχει τη μορφή καμπύλης δυνάμεως, που περιγράφεται από την **Εξίσωση (2.1)**:

$$PR = a t^b \quad (2.1)$$

όπου  $PR$  η αντίσταση διείσδυσης (σε  $N/mm^2$ ),  $t$  ο μεσολαβών χρόνος από την έναρξη της ενυδάτωσης (σε h) και 'a' και 'b' οι σταθερές παλινδρόμησης. Σημειώνεται ότι υψηλότερες τιμές των 'a' και 'b', οδηγούν σε ενωρίτερους χρόνους έναρξης πήξης.

Ως χρόνος έναρξης πήξης ορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί από την χρονική στιγμή της προσθήκης νερού κατά την ανάμιξη του μίγματος έως τη στιγμή που η αντίσταση διείσδυσης ισούται με  $3.5 N/mm^2$ . Ο χρόνος λήξης της πήξης δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμος πειραματικά, καθώς η αντίσταση στην οποία αντιστοιχεί ανέρχεται σε  $27.6 N/mm^2$ , και συνήθως προσδιορίζεται από την προβολή της καμπύλης πήξης (ως προς τον χρόνο).

##### Παρατηρήσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, ο χρόνος πήξης του σκυροδέματος εκτιμήθηκε μόνο σε μικρό πλήθος των μιγμάτων και, συγκεκριμένα, σε μία ομάδα τεσσάρων

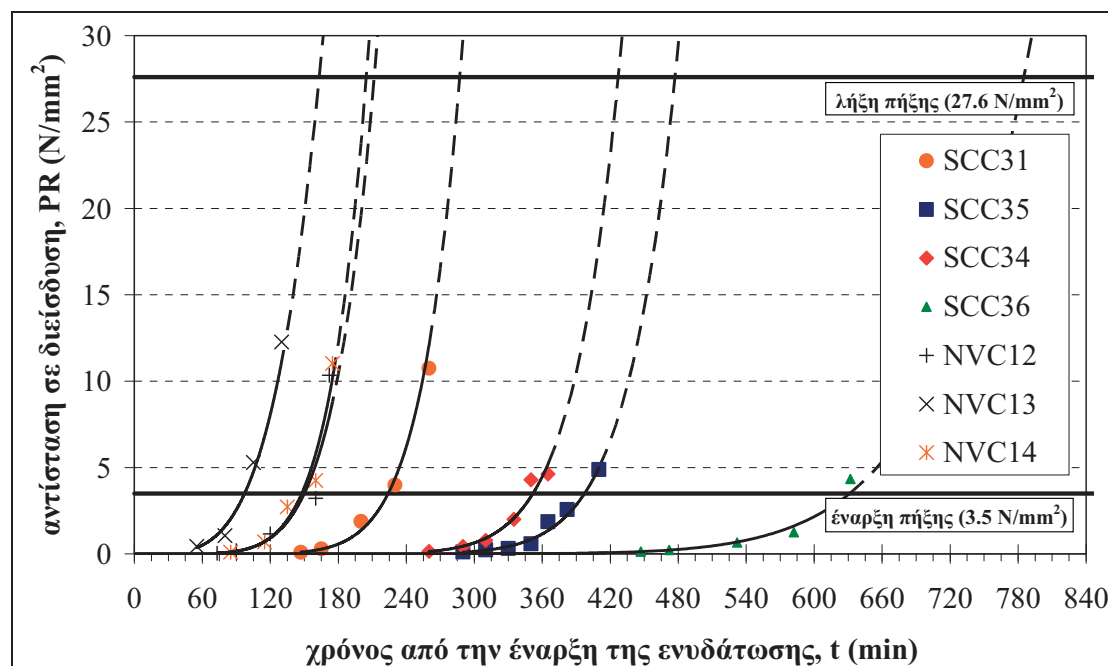


μιγμάτων ΑΣΣ με μεταβλητή περιεκτικότητα πυριτικής παιπάλης (συνθέσεις SCC31, SCC34, SCC35 και SCC36) και συγκρίθηκαν με τους αντίστοιχους χρόνους πήξης σε τρία μίγματα ΣΣ με διαφορετική εργασιμότητα (συνθέσεις NVC12, NVC13 και NVC14). Οι εν λόγω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης του βαθμού πήξης του σκυροδέματος κατά τη στιγμή της εφαρμογής επιβαλλόμενων μετακινήσεων σε εγκιβωτισμένες ράβδους οπλισμού και την επιρροή αυτών στη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Τα αποτελέσματα που αφορούν στη συνάφεια θα περιγραφούν σε επόμενο, ξεχωριστό κεφάλαιο (Παρ. 3.3.5.2).

Καθώς η διαδικασία του υγρού κοσκινίσματος απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού σκυροδέματος και λόγω περιορισμών της χωρητικότητας του αναμικτήρα, ο προσδιορισμός του βαθμού πήξης πραγματοποιήθηκε απευθείας σε δοκίμια σκυροδέματος, αντί των προδιαγραφόμενων δοκιμών τσιμεντοκονιάματος. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή, καθώς ο μέγιστος κόκκος αδρανούς που χρησιμοποιήθηκε (16 mm) ήταν σημαντικά μικρότερος από ότι στο προδιαγραφόμενο από το πρότυπο [ASTM C 403 \(1999\)](#) κανονικό σκυρόδεμα (32 mm). Τυχόν προβληματικές μετρήσεις εντοπίστηκαν και απορρίφθηκαν, λαμβάνοντας περισσότερες μετρήσεις από τη μία που προδιαγράφεται στο σχετικό πρότυπο. Συγκεκριμένα, λαμβάνονταν πέντε μετρήσεις, οι οποίες ήταν ισοκατανομημένες σε ολόκληρη την επιφάνεια οριζόντιου δοκιμίου μήκους 1.80 m και διατομής 0.20 × 0.20 m. Οποιαδήποτε μέτρηση ξεπερνούσε το 10 % της μέσης τιμής των μετρήσεων απορριπτόταν και λαμβανόταν νέα μέτρηση, υπολογίζοντας ταυτόχρονα νέα μέση τιμή της αντίστασης.

### Αποτελέσματα

Η μεταβολή της αντίστασης διείσδυσης της βελόνας, αυξανόμενου του χρόνου που μεσολαβεί από την προσθήκη ύδατος, διαπιστώθηκε ότι περιγράφεται πολύ καλά από την κανονιστικώς προτεινόμενη καμπύλη δυνάμεως της Εξ. (2.1), για όλα τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ που ελέγχθηκαν. Οι καμπύλες φαίνονται γραφικά στο **Σχήμα 65**.



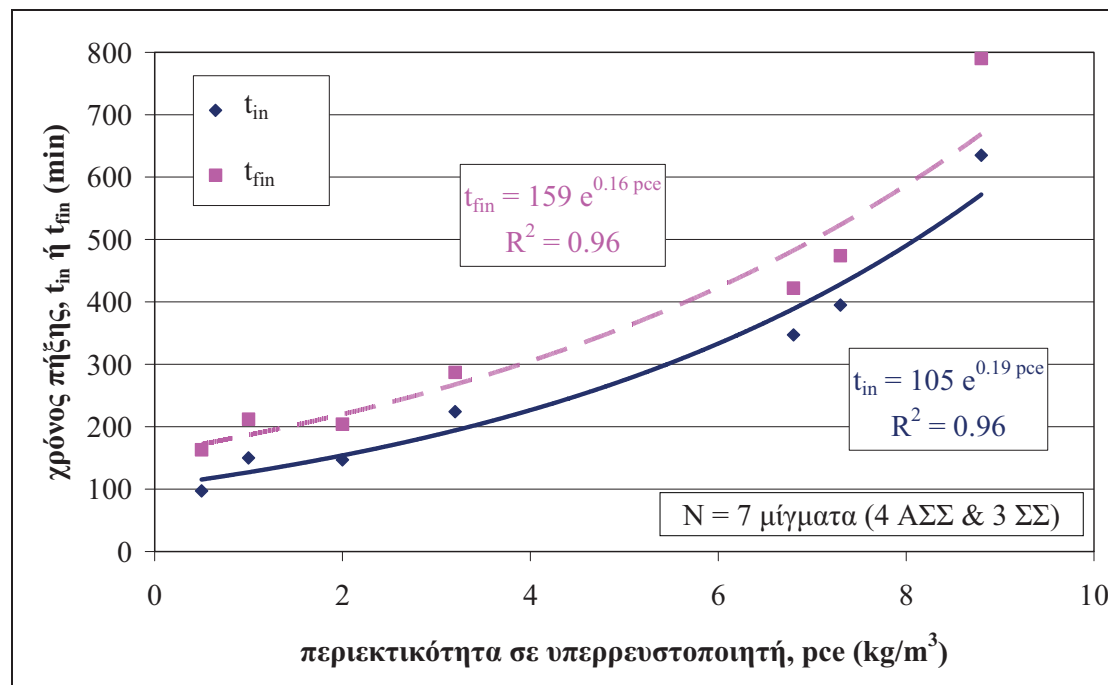
Σχήμα 65 Αντίσταση διείσδυσης βελόνας σε σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου από την έναρξη της ενυδάτωσης

**Πίνακας 55** Συντελεστές καμπυλών δυνάμεως, αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης και χρόνοι πήξης

σύνθεση	ενδεικτικά στοιχεία σύνθεσης (Πίνακας 32, Πίνακας 35)			συντελεστές παλινδρόμησης		συντελεστής συσχέτισης	χρόνος πήξης	
	$sf$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$pce$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$w/b$ (%)	a	b	$R^2$	έναρξη $t_{in}$ (min)	λήξη $t_{fin}$ (min)
SCC31	-	3.2	56	1E-19	8.30	0.99	224	287
SCC34	17	7.3	45	3E-27	10.65	0.99	347	422
SCC35	37	6.8	45	2E-29	11.26	0.97	395	474
SCC36	49	8.8	45	1E-26	9.47	0.99	635	790
NVC12	-	1.0	51	3E-13	5.98	0.98	150	212
NVC13	-	0.5	51	4E-08	3.99	0.97	97	163
NVC14	-	2.0	51	7E-14	6.32	0.98	147	204

Ο Πίνακας 55 περιλαμβάνει τους συντελεστές, a και b, των αντίστοιχων συναρτήσεων που περιγράφουν τις παραπάνω καμπύλες, μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης,  $R^2$ , καθώς και τους χρόνους έναρξης και λήξης πήξης,  $t_{in}$  και  $t_{fin}$  (min), αντιστοίχως. Φαίνεται ότι τα μίγματα ΑΣΣ αναπτύσσουν μεγαλύτερους χρόνους έναρξης πήξης κατά περίπου 1.5 έως και 9 ώρες αργότερα από τους αντίστοιχους χρόνους για τα μίγματα ΣΣ.

Παρά τις υπόλοιπες διαφορές στη σύνθεση μεταξύ των εξετασθέντων μιγμάτων, η εν λόγω καθυστέρηση έναρξης της πήξης φαίνεται να αποδίδεται αποκλειστικώς από την υψηλή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή,  $pce$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), που απαιτείται, ώστε τόσο τα μίγματα ΑΣΣ όσο και τα μίγματα ΣΣ να αποκτήσουν τις επιθυμητές ρεολογικές ιδιότητες. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 66, τόσο οι χρόνοι έναρξης, όσο και οι χρόνοι λήξης της πήξης συσχετίζονται πολύ καλά, μέσω εκθετικών συναρτήσεων, με την περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή ( $pce$ ).

**Σχήμα 66** Χρόνοι έναρξης και λήξης πήξης συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή ( $pce$ )

### 2.3.1.5. Διεργαστηριακή αναπαραγωγιμότητα παρεμφερών μιγμάτων<sup>8</sup>

Τα αποτελέσματα των ρεολογικών δοκιμών όλων των μιγμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διεργαστηριακής σύγκρισης παρεμφερών μιγμάτων (Πίνακας 45, Πίνακας 46) παρουσιάζονται στους Πίνακες που ακολουθούν. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 56 αφορά τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ που παρασκευάστηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ (ή ΝΤUA), ενώ ο Πίνακας 57 αφορά τα αντίστοιχα μίγματα (στην αντίστοιχη στήλη του Πίνακα) που παρασκευάστηκαν στο ΕΔΥ/ΠΚ (ή UCY).

**Πίνακας 56** Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη υπο-ομάδας συνθέσεων H1, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο διεργαστηριακών συγκρίσεων μεταξύ ΕΩΣ/ΕΜΠ και ΕΔΥ/ΠΚ

κωδικός		NTUA- SCCWB1	NTUA- SCCWB2	NTUA- SCCWB3	NTUA- SCCSF1	NTUA- SCCSF2	NTUA- SCCSF3	NTUA- NVC1	NTUA- NVC2
σύνθεση		SCC22	SCC20	SCC21	SCC23	SCC24	SCC25	NVC09	NVC10
Slump	<i>S</i>	mm	-	-	-	-	-	55	270
	<i>S</i>	-	-	-	-	-	-	<b>S2</b>	<b>&gt; S5</b>
Slump-flow	<i>SF</i>	mm	810	770	595	740	750	830	-
	<i>SF</i>	-	<b>SF3</b>	<b>SF3</b>	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF2</b>	<b>SF3</b>	-
	<i>t<sub>500</sub></i>	s	1.0	2.0	2.1	0.8	1.0	1.4	-
	<i>VS</i>	-	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	-
V-funnel	<i>t<sub>v</sub></i>	s	1.5	7.3	25.0	3.6	4.1	2.5	-
	<i>t<sub>v</sub> 5 min</i>	s	1.8	7.5	37.7	4.4	5.0	2.9	-
	<i>VF</i>	-	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF2</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	-
L-box	<i>λ<sub>H,L</sub></i>	%	1.00	1.00	μ/δ*	0.95	0.94	1.00	-
	<i>PL</i>	-	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	μ/δ*	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	-
VSI	FVSI	0-4	0	0	0	0	0	1	-

\*μ/δ: μη διαθέσιμο (δε μετρήθηκε)

**Πίνακας 57** Αποτελέσματα ρεολογικών δοκιμών και κατάταξη υπο-ομάδας συνθέσεων H2, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο διεργαστηριακών συγκρίσεων μεταξύ ΕΩΣ/ΕΜΠ και ΕΔΥ/ΠΚ

κωδικός		UCY- SCCWB1	UCY- SCCWB2	UCY- SCCWB3	UCY- SCCSF1	UCY- SCCSF2	UCY- SCCSF3	UCY- NVC1	UCY- NVC2
σύνθεση									
Slump	<i>S</i>	mm	-	-	-	-	-	49	200
	<i>S</i>	-	-	-	-	-	-	<b>S2</b>	<b>S4</b>
Slump-flow	<i>SF</i>	mm	770	782	735	783	725	788	-
	<i>SF</i>	-	<b>SF3</b>	<b>SF3</b>	<b>SF2</b>	<b>SF3</b>	<b>SF2</b>	<b>SF3</b>	-
	<i>t<sub>500</sub></i>	s	1.0	2.2	1.8	1.8	2.0	2.0	-
	<i>VS</i>	-	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b>VS1</b>	<b>VS2</b>	<b>VS2</b>	-
V-funnel	<i>t<sub>v</sub></i>	s	2.6	8.0	23.0	7.8	7.7	8.1	-
	<i>t<sub>v</sub> 5 min</i>	s	5.0	9.5	38.0	9.9	10.6	11.0	-
	<i>VF</i>	-	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF2</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	<b>VF1</b>	-
L-box	<i>λ<sub>H,L</sub></i>	%	1.00	0.97	0.98	0.96	0.94	0.97	-
	<i>PL</i>	-	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	<b>PL2</b>	-
VSI	FVSI	0-4	0	0	0	0	0	0	-

Ξεκινώντας από τα μίγματα ΣΣ, παρατηρούμε ότι η κατηγορία κάθισης είναι ίδια για το μίγμα NVC1, ενώ η κάθιση του μίγματος NVC2 είναι μία κατηγορία υψηλότερη στην περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Η υψηλή εργασιμότητα μπορεί να ερμηνευτεί από την μεγαλύτερη δραστηριότητα του χρησιμοποιούμενου υπερρευστοποιητή πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (*pce*) σε αντίθεση με τη χαμηλότερη δραστηριότητα του

<sup>8</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

- στα πρακτικά του διεθνούς Συμπόσιου fib: Concrete Structures for Sustainable Community, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, [Sfikas et al. (2012)]
- στο επιστημονικό περιοδικό Construction & Building Materials [Sfikas et al. (2013a)].

ρευστοποιητή βάσεως πολυναφθαλίνης (*pn*) που χρησιμοποιήθηκε από το ΕΔΥ/ΠΚ, ειδικά για το μίγμα αυτό. Σημειώνεται ότι η περιεκτικότητα σε *pce* στο μίγμα NTUA-NVC1 ήταν εντός των προτεινόμενων ορίων του τεχνικού φυλλαδίου του συγκεκριμένου χημικού πρόσθετου (μεταξύ 0.4 % και 2.0 % κ.β. τσιμέντου) και, συγκεκριμένα, περίπου 0.6 % κ.β. τσιμέντου.

Εξετάζοντας τις κατηγορίες εξάπλωσης όλων των μιγμάτων ΑΣΣ, παρατηρείται ομοιότητα μεταξύ των μιγμάτων των δύο εργαστηρίων, με εξαίρεση το μίγμα SCCWB3<sup>9</sup>, το οποίο ανέπτυξε διάμετρο εξάπλωσης 595 mm στο ΕΩΣ/ΕΜΠ έναντι 735 mm στο ΕΔΥ/ΠΚ. Θεωρείται ότι η υψηλή τιμή στη δεύτερη περίπτωση οφείλεται στην πολύ υψηλή δΟΣΟΛΟΓΙΑ υπερρευστοποιητή (3.71 % κ.β. τσιμέντου). Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή τιμή στο ΕΩΣ/ΕΜΠ εκτιμάται ότι οφείλεται στην αργή δράση του υπερρευστοποιητή. Η υψηλή περιεκτικότητα σε *pce* (3.09 % κ.β. τσιμέντου), σε συνδυασμό με μικρότερο από τον απαιτούμενο χρόνο ανάμιξης του μίγματος κατά την παρασκευή του, οδήγησε σε ανεπαρκή δράση του υπερρευστοποιητή κατά τη χρονική στιγμή της δοκιμής. Συνεπώς, εκτιμάται ότι για την περίπτωση του SCCWB3 οι μετρηθείσες τιμές εξάπλωσης αποτελούν ακραίες τιμές που οφείλονται σε διαφορετικές αιτίες, ενώ οι αναμενόμενες τιμές θα ήταν μεταξύ αυτών (μεταξύ 650 και 680 mm).

Οι κατηγορίες ιξώδους των μιγμάτων ΑΣΣ (SCCWB1, SCCWB2, SCCWB3), με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό (*w/b*) και χωρίς την ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης, είναι συγκρίσιμες μεταξύ των δύο εργαστηρίων. Η χαμηλή τιμή του χρόνου ροής  $t_{500}$  που αναπτύσσεται για την περίπτωση του SCCWB1 μπορεί να ερμηνευτεί μέσω της πολύ υψηλής περιεκτικότητας νερού του συγκεκριμένου μίγματος. Από την άλλη πλευρά, σημαντικές διαφορές παρατηρούνται μεταξύ των μιγμάτων (SCCSF1, SCCSF2, SCCSF3), με σταθερό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό (*w/b*) και μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη. Σε όλα τα μίγματα του Πανεπιστημίου της Κύπρου οι χρόνοι ροής είναι κοντά στο όριο των 2.0 s (όριο μεταξύ των κατηγοριών ιξώδους VS1 και VS2), ενώ για το ΕΩΣ/ΕΜΠ είναι σταθερά χαμηλότεροι (από 0.8 έως 1.4 s). Επιπροσθέτως, στη δεύτερη περίπτωση, η αύξηση του ποσοστού πυριτικής παιπάλης φαίνεται να οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ροής, φαινόμενο που δεν παρατηρείται για το ΕΔΥ/ΠΚ. Η διαφορά αυτή στη συμπεριφορά των μιγμάτων αποδίδεται στην διαφορετική δραστηριότητα της πυριτικής παιπάλης, λόγω της πολύ λεπτότερης κατανομής της στην περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ.

Το ιξώδες των περισσότερων μιγμάτων εκτιμήθηκε, επιπλέον, μέσω της δοκιμής χοάνης V και του μετρούμενου χρόνου εκροής,  $t_v$  (s). Παρατηρείται ότι τα παρεμφερή μίγματα μεταξύ των διαφορετικών εργαστηρίων κατατάσσονται τελικώς στις ίδιες κατηγορίες ιξώδους, γεγονός που αποδίδεται στο υψηλό όριο εναλλαγής μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών (9.0 s μεταξύ VF1 και VF2). Η μείωση του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό (*w/b*) φαίνεται να αυξάνει τους χρόνους εκροής. Ειδικώς για το μίγμα SCCWB3, ανεξαρτήτως εργαστηρίου, οι χρόνοι εκροής ήταν ιδιαίτερος υψηλοί, ενώ την επαναληπτική δοκιμή (μετά από πέντε λεπτά,  $t_v$  5 min) οι χρόνοι εκροής ήταν μεγαλύτεροι και από το άνω όριο αποδοχής (25.0 s). Ο ταχύς ρυθμός

<sup>9</sup> Η διαφορά των κατηγοριών εξάπλωσης στο μίγμα SCCSF1 δεν θεωρείται σημαντική, καθώς οι τιμές της εξάπλωσης διαφέρουν κατά 43 mm, τιμή που ταυτίζεται με τα επιτρεπόμενα όρια επαναληψιμότητας και αναπαραγωγισιμότητας του αντίστοιχου προτύπου [EN 12350-8 (2010)].

απώλειας εργασιμότητας οφείλεται στη δημιουργία συνθηκών απόμιξης και αποδίδεται στο χαμηλό λόγο  $w/b$ . Οι χαμηλότεροι χρόνοι εκροής για την περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ εκτιμάται ότι οφείλονται στη μεγαλύτερη δραστικότητα της πυριτικής παιπάλης, όπως ήδη αναφέρθηκε.

Οι λόγοι υψών,  $PL$ , όπως μετρήθηκαν από τη δοκιμή δοχείου L, είναι παρεμφερείς μεταξύ των δύο εργαστηρίων και αρκετά υψηλότεροι από την οριακή τιμή 0.80 (για σκυρόδεμα που διέρχεται από τρεις λείες ράβδους οπλισμού). Ένα γενικό σχόλιο που θα μπορούσε να γίνει, είναι ότι τα περισσότερα μίγματα του ΕΩΣ/ΕΜΠ παρουσίασαν μικρότερα προβλήματα εμφράξεων από τα αντίστοιχα μίγματα του Πανεπιστημίου της Κύπρου, οδηγώντας σε υψηλότερους λόγους  $PL$ , εγγύτερους στη μονάδα. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί, συγκρίνοντας τις κατανομές των αντίστοιχων κλασμάτων αδρανών, μεταξύ των εργαστηρίων (Σχήμα 57). Από τη σύγκριση αυτή, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τόσο για το ρυζάκι, όσο και για το γαρμπίλι, οι κατανομές των αδρανών της Κύπρου περιλαμβάνουν μεγαλύτερους κόκκους (χαμηλότερα ποσοστά διερχόμενου υλικού για μεγαλύτερα ανοίγματα κόσκινου, εν συγκρίσει προς τις καμπύλες του ΕΩΣ/ΕΜΠ). Πρέπει να σημειωθεί ότι για το μίγμα SCCWB3 του ΕΩΣ/ΕΜΠ, ο λόγος των υψών ήταν αδύνατο να μετρηθεί, καθώς μόνο μια μικρή ποσότητα του συνολικού όγκου σκυροδέματος διήλθε από τις κατακόρυφες ράβδους στο όριο των δύο διαμερισμάτων του δοχείου L, λόγω της περιορισμένης εργασιμότητας του μίγματος. Το σκυρόδεμα δεν έφτασε στο άκρο του οριζώντιου τμήματος του δοχείου και, συνεπώς, δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση. Εκτιμάται ότι η διαφορετική συμπεριφορά του συγκεκριμένου μίγματος μεταξύ των δύο εργαστηρίων οφείλεται σε διαφορετικές αιτίες. Ειδικότερα, στην περίπτωση του Πανεπιστημίου της Κύπρου, το μίγμα SCCWB3 παρουσίασε μια περιορισμένη τάση απόμιξης, που οδήγησε σε φαινόμενα έμφραξης στην περίπτωση του στενού στομίου της δοκιμής χοάνης V, αλλά σε κανονική ροή διαμέσου των μεγαλύτερων κενών μεταξύ των κατακόρυφων ράβδων του δοχείου L. Από την άλλη πλευρά, το αντίστοιχο μίγμα του ΕΩΣ/ΕΜΠ δεν εμφάνισε τάση απόμιξης, αλλά ήταν λιγότερο εργάσιμο, οδηγώντας σε μια γενικότερη επιδείνωση των ρεολογικών του ιδιοτήτων (συνδυασμό χαμηλής εξάπλωσης, υψηλών χρόνων εκροής της δοκιμής V και αδυναμία πλήρους διέλευσης από το δοχείο L). Από τα παραπάνω, συνάγεται το συμπέρασμα ότι το μίγμα SCCWB3, σε οποιοδήποτε εργαστήριο, θα μπορούσε πρακτικά να ταξινομηθεί ως ΣΣ υψηλής ρευστότητας παρά ως ΑΣΣ.

Τέλος, για τα μίγματα και των δύο εργαστηρίων, οι δείκτες οπτικής σταθερότητας του νωπού σκυροδέματος ήταν κατά κανόνα μηδενικοί, διασφαλίζοντας υψηλή σταθερότητα και απουσία ενδείξεων απόμιξης ή εξίδρωσης.

### 2.3.2. Μηχανικές δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος

#### 2.3.2.1. Συνοπτική παρουσίαση

Ο Πίνακας 58 συνοψίζει το είδος και το πλήθος των δοκιμών που αφορούν στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκληρυμένου σκυροδέματος, οι οποίες διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής.

Ειδικότερα, στο σκληρυμένο σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκαν μέρος ή το σύνολο των δοκιμών που αφορούν στην εκτίμηση των ακόλουθων μηχανικών χαρακτηριστικών:

- θλιπτική αντοχή  $f_{cc}$  [EN 12390-3 (2002)]

- εφελκυστική αντοχή  $f_{ct,sp}$ <sup>10</sup> (εφελκυσμός σε διάρρηξη) [EN 12390-6 (2000)]
- καμπτική αντοχή  $f_{ct,fl}$ <sup>11</sup> [EN 12390-5 (2000)]
- αντοχή σε συνάφεια [EN 10080 (2005): Παράρτημα D] σε δοκίμια διαφόρων τύπων (κύβοι, χαμηλά και υψηλά υποστυλώματα, δοκοί), ορισμένα εκ των οποίων υποβλήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες.
- θερμική συμπεριφορά: κατανομή εσωτερικών θερμοκρασιών για θερμική καταπόνηση σε υψηλές θερμοκρασίες

**Πίνακας 58** Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών

περιγραφή δοκιμής	πρότυπη μέθοδος	πλήθος μιγμάτων που ελέγχθηκαν			
		ΑΣΣ	ΣΣ	Δοκ.	Συν.
θλιπτική αντοχή	EN 12390-3 (2002)	67	26	61	<b>154</b>
εφελκυστική αντοχή (σε διάρρηξη)	EN 12390-6 (2000)	39	14	60	<b>113</b>
καμπτική αντοχή	EN 12390-5 (2000)	8	2	-	<b>10</b>
αντοχή σε συνάφεια και γενικότερα θέματα συνάφειας	Παράρτημα D του EN 10080 (2005)	24	8	-	<b>32</b>
θερμική συμπεριφορά	μη διαθέσιμη	8	2	-	<b>10</b>

### 2.3.2.2. Θλιπτική αντοχή<sup>12</sup>

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>), εφαρμόστηκε το πρότυπο EN 12390-3 (2002). Χρησιμοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, πρότυπα κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm ή 150 mm, τα οποία δοκιμάστηκαν σε σερβοϋδραυλική μηχανή θλίψης Wykeham Farrance του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., συμμορφούμενη στο πρότυπο EN 12390-4 (2000), με ρυθμιζόμενο ρυθμό φόρτισης (σε όρους δυνάμεων) και μέγιστη δυναμικότητα (φορτίο) 3000 kN. Μέρος των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε συνεργαζόμενα εργαστήρια και συγκεκριμένα, στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου (EKET) της Lafarge και το Εργοστάσιο Παραγωγής Τσιμέντου της TITAN.

#### Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

Στο **Σχήμα 67**, η θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>), των συνθέσεων της υπο-ομάδας Α (Πίνακας 37) συσχετίζεται γραμμικά με τον λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ . Όπως αναμενόταν, η αύξηση του λόγου  $w/b$  οδηγεί σε μείωση της  $f_{cc}$ . Ειδικότερα, η  $f_{cc}$  μειώνεται από 64 σε 45 N/mm<sup>2</sup> για μια αύξηση του λόγου  $w/b$  από 0.41 σε 0.61.

Ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ υψηλός ( $R^2 = 0.88$ ). Παρόμοιες καμπύλες έχουν προσαρμοστεί σε δεδομένα παρεμφερών συνθέσεων που αντλήθηκαν από άλλες ερευνητικές εργασίες [Kanellopoulos et al. (2012), Felekoğlu et al. (2007)] και οι οποίες παρουσιάζονται επίσης στο ίδιο διάγραμμα. Οι σχεδόν παράλληλες

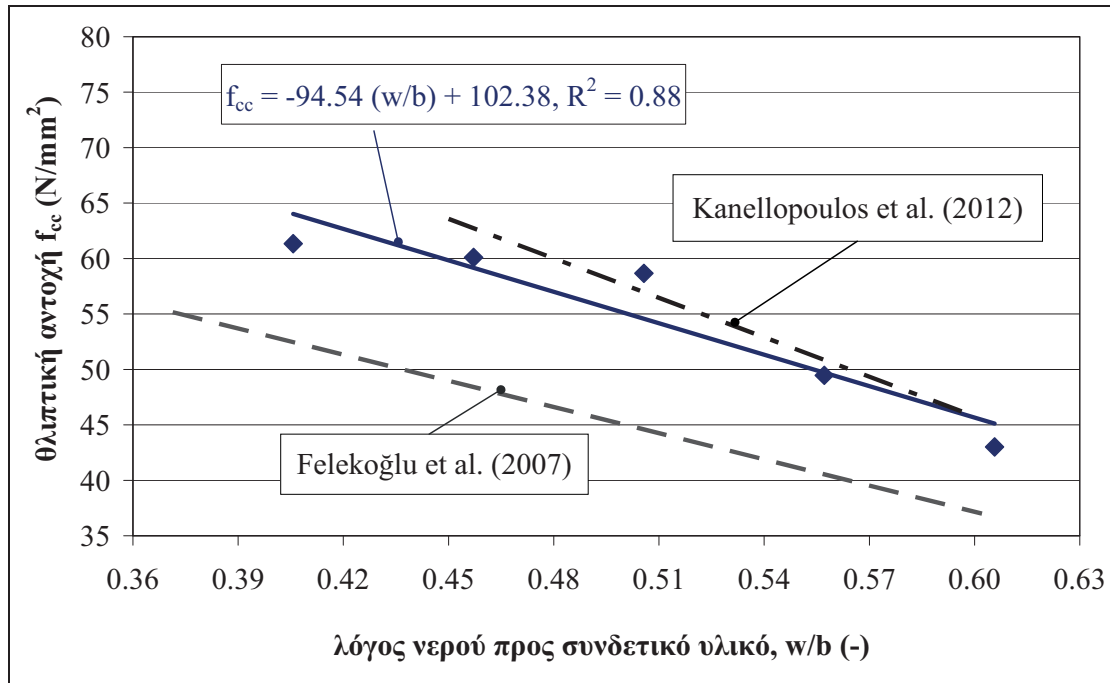
<sup>10</sup> Εφεξής θα χρησιμοποιείται απλοποιητικά ο συμβολισμός  $f_{ct}$ .

<sup>11</sup> Εφεξής θα χρησιμοποιείται απλοποιητικά ο συμβολισμός  $f_{fl}$ .

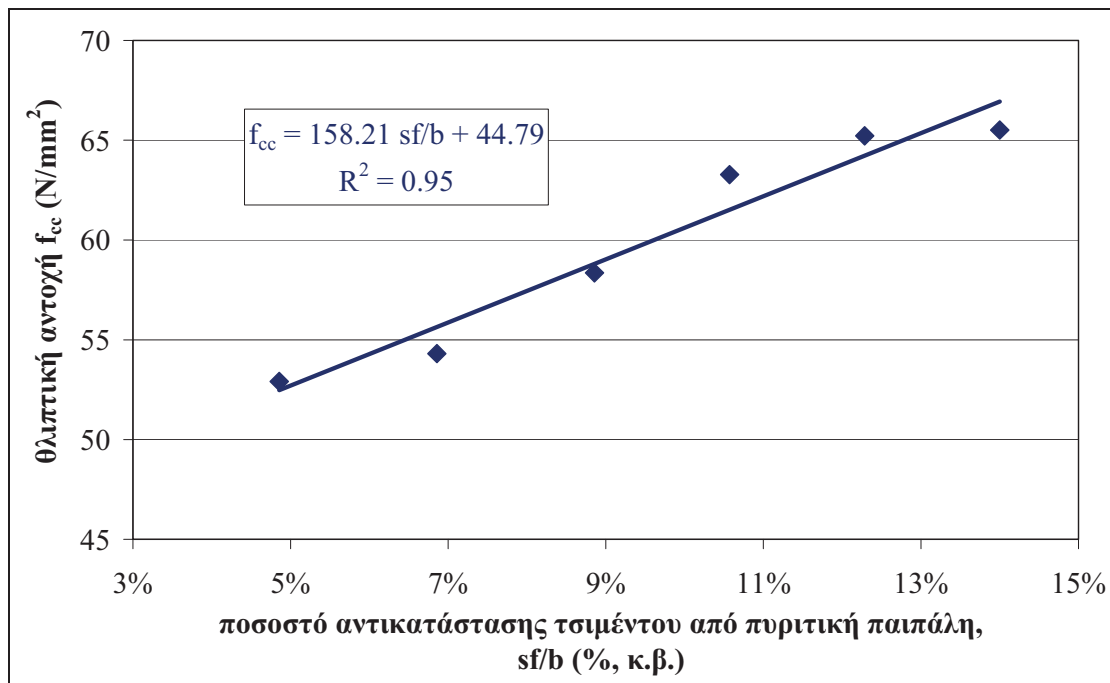
<sup>12</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

- στο 4ο Διεθνές Συμπόσιο: Bond, Anchorage, Detailing (BIC 2012), fib, RILEM, University of Brescia, Italy, 17-20 June 2012 [Sfikas and Trezos (2012)],
- στο 5<sup>ο</sup> Συνέδριο για το ΑΣΣ (SCC2013): 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, Chicago, IL, USA, May 12–15 2013 [Trezos et al. (2013)] και
- στα επιστημονικά περιοδικά Construction & Building Materials [Sfikas and Trezos (2013b), Sfikas et al. (2014)] και Cement & Concrete Composites [Trezos et al. (2014)].

μετατοπίσεις μεταξύ των τριών καμπυλών αποδίδονται σε μικρές διαφορές στις αναλογίες των συστατικών, στην προέλευση και τις φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων αδρανών, καθώς και στα διαφορετικά χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν. Παρόλα αυτά, οι κλίσεις των καμπυλών είναι απολύτως συγκρίσιμες.



Σχήμα 67 Θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>), συναρτήσε του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$

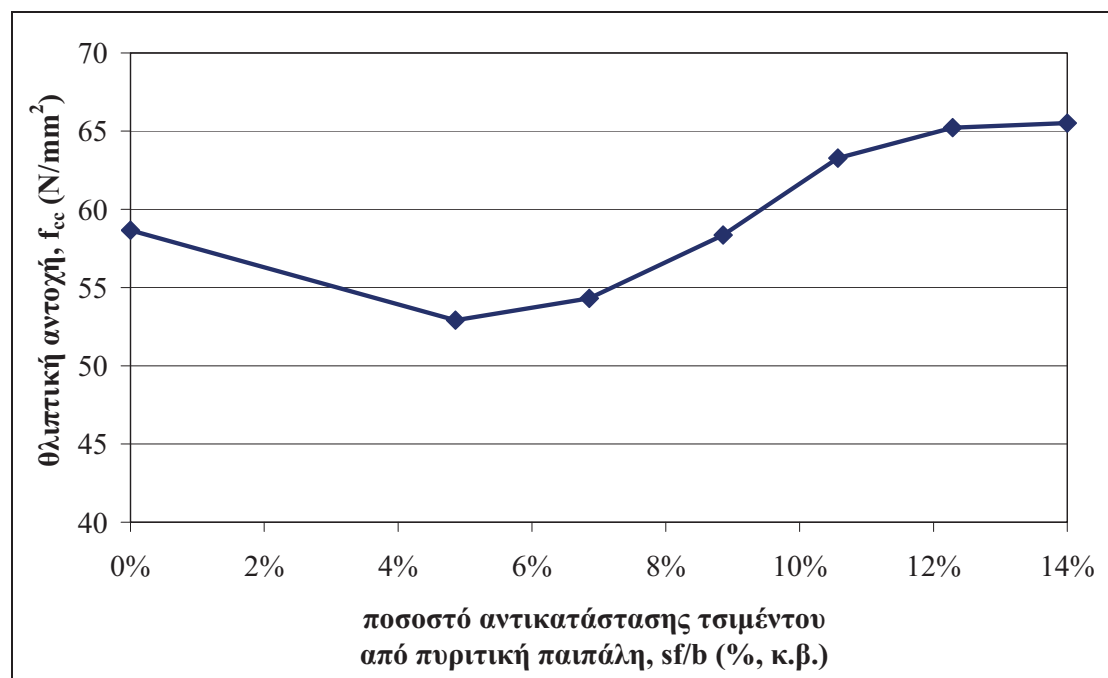


Σχήμα 68 Θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>), συναρτήσε του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/b$  (% κ.β.)

### Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ ή $sf/b$ )

Η θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  ( $\text{N/mm}^2$ ), των συνθέσεων της υπο-ομάδας Β (Πίνακας 38) συσχετίζεται γραμμικά με την περιεκτικότητα της πυριτικής παιπάλης, ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ , % κ.β.) στο **Σχήμα 68**. Σημειώνεται ότι στο εν λόγω σχήμα δεν έχει συμπεριληφθεί το αμιγές μίγμα, που δεν περιέχει πυριτική παιπάλη, το οποίο θα σχολιαστεί ξεχωριστά στη συνέχεια. Όπως αναμενόταν, η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτικής παιπάλης οδήγησε σε γραμμική αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Ειδικότερα, μία αύξηση της πυριτικής παιπάλης από 5 σε 10 % οδήγησε σε μια παράλληλη αύξηση της αντοχής από 52.7 σε 60.6  $\text{N/mm}^2$ . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι πολύ υψηλός ( $R^2 = 0.95$ ). Στη βιβλιογραφία δε βρέθηκαν καμπύλες μιγμάτων με παρεμφερείς συνθέσεις.

Περιλαμβάνοντας το μίγμα αναφοράς ( $sf/b = 0$  %), στο **Σχήμα 69** παρατηρείται ότι αυτό αναπτύσσει μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από την αναμενόμενη, όπως αυτή προκύπτει από τη γραμμική προβολή της καμπύλης της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των μιγμάτων που περιέχουν πυριτική παιπάλη. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στην θεωρητικώς μειωμένη τιμή της αντοχής μιγμάτων που περιλαμβάνουν πυριτική παιπάλη σε χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου. Η μειωμένη αντοχή είναι αποτέλεσμα δύο ταυτόχρονα ισχυρούς διαφορετικών αιτιών, που συνοψίζονται σε δύο βασικούς άξονες: (α) την ανεπάρκεια των χαμηλών ποσοστών αντικατάστασης να συνεισφέρουν στην αντοχή και (β) στην μικρότερη πραγματική απαίτηση νερού για χαμηλότερα ποσοστά αντικατάστασης, όπως εξηγούνται ακολούθως.



**Σχήμα 69** Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή

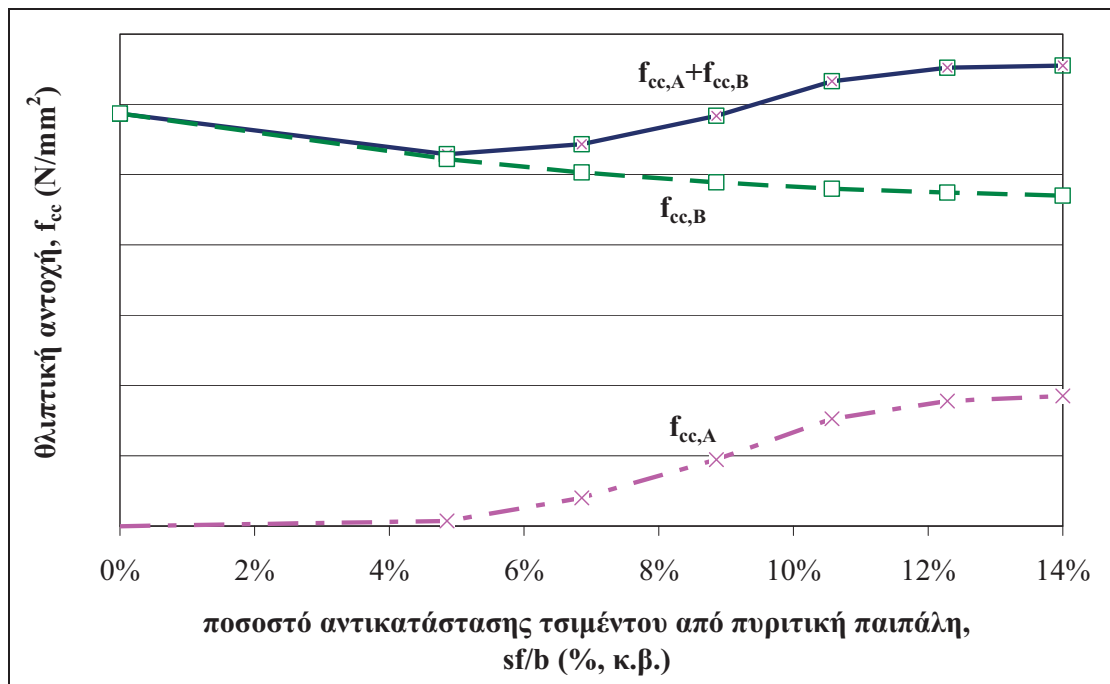
*Συνεισφορά της πυριτικής παιπάλης στην αντοχή* – Η μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της μείωσης της περιεκτικότητας του τσιμέντου, αναμένεται να εξισορροπηθεί από την προσθήκη πυριτικής παιπάλης. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί από τον



Neville (2004), η συνεισφορά της πυριτικής παιπάλης, σε ποσοστά μικρότερα του 5 % της συνολικής μάζας των τσιμεντοειδών υλικών, στην αντοχή μπορεί να είναι ασήμαντη, λόγω του γεγονότος ότι ο όγκος της πυριτικής παιπάλης είναι ανεπαρκής να καλύψει την επιφάνεια όλων των σωματιδίων των χονδρόκοκκων αδρανών και, έτσι, να βελτιώσει επαρκώς την μεταβατική ζώνη μεταξύ αδρανών και πάστας, σε όρους αντοχών. Επιπροσθέτως, θεωρείται ότι τέτοια ποσοστά αντικατάστασης από πυριτική παιπάλη είναι σημαντικά χαμηλά για να διασφαλίσουν την ομοιογενή διασπορά των σωματιδίων μέσα στην πάστα. Παρατηρείται ότι η συνεισφορά της παιπάλης αυξάνεται για μεγάλα ποσοστά αντικατάστασης.

*Πραγματική απαίτηση σε νερό σε μίγματα με πυριτική παιπάλη* – Έχει αναφερθεί [ACI 234R (2006)] ότι χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης από πυριτική παιπάλη μπορεί να μειώσουν την απαίτηση σε νερό και τα σωματίδια της πυριτικής παιπάλης να καλύψουν τον χώρο που διαφορετικά θα καλυπτόταν από νερό μεταξύ των σωματιδίων τσιμέντου. Για τον λόγο αυτό, η σταθερή περιεκτικότητα νερού στα εν λόγω μίγματα μπορεί να είναι ελαφρώς αυξημένη εν σχέσει προς την πραγματικά απαιτούμενη, με αποτέλεσμα να μειώνεται περαιτέρω η αναμενόμενη αντοχή. Πάντως, πρέπει να αναφερθεί ότι η εν λόγω μείωση της απαίτησης σε νερό δεν έχει ποσοτικοποιηθεί από προηγούμενες μελέτες και, ως εκ τούτου, μπορεί να αποτελέσει μελλοντικά ένα αρκετά ενδιαφέρον πεδίο μελέτης.

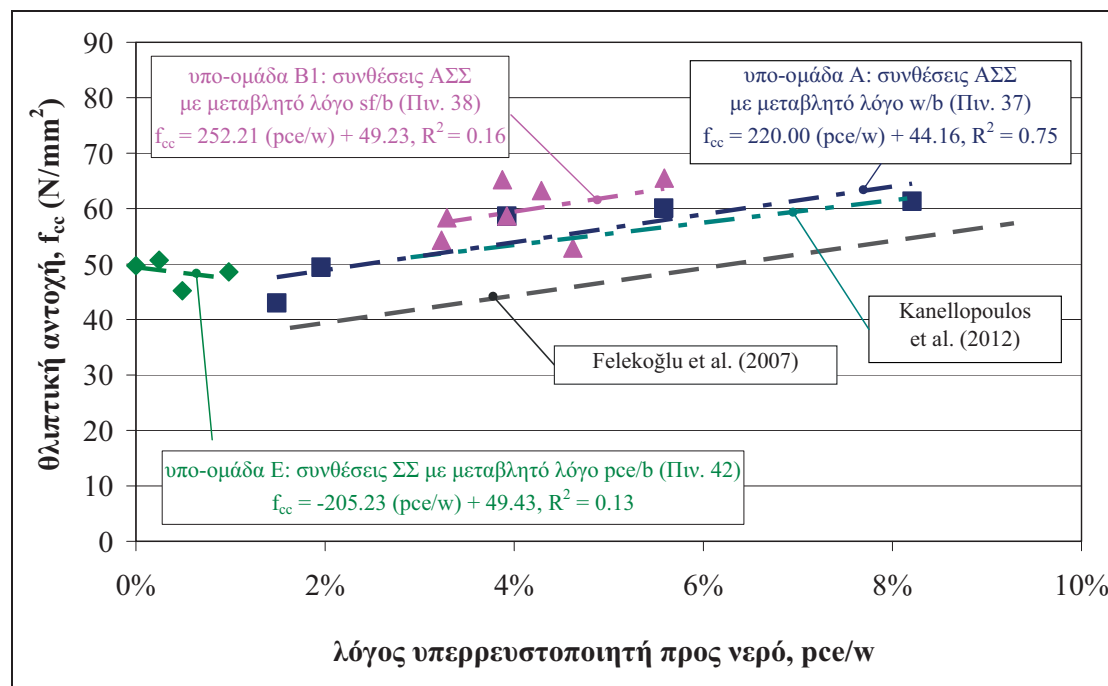
Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορεί να υποθεθεί ότι για χαμηλούς λόγους  $sf/b$ , η ενσωματωμένη πυριτική παιπάλη θεωρείται ανεπαρκής να συνεισφέρει στη θλιπτική αντοχή. Η ταυτόχρονη μείωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής (Σχήμα 69, φθίνων κλάδος έως περίπου 5 % κ.β. αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη). Για μεγαλύτερους λόγους  $sf/b$ , η μείωση της θλιπτικής αντοχής εξισορροπείται από την ενσωματωμένη πυριτική παιπάλη (Σχήμα 69, αύξων κλάδος μεταξύ 5 και 14 % κ.β. αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη). Το παραπάνω σκεπτικό εξηγείται ποιοτικώς στο **Σχήμα 70**.



**Σχήμα 70** Ποιοτική συνεισφορά τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης στη θλιπτική αντοχή για σταθερή περιεκτικότητα συνδετικού υλικού ( $b = c + sf$ )

### Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς νερό ( $pce/w$ )

Μία άλλη συσχέτιση που εξετάστηκε, είναι εκείνη της θλιπτικής αντοχής 28 ημερών,  $f_{cc}$  ( $N/mm^2$ ), συναρτήσει του λόγου υπερρευστοποιητή προς νερό,  $pce/w$  ( $pce$  και  $w$  σε  $kg/m^3$ ). Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το **Σχήμα 71**, η θλιπτική αντοχή των μιγμάτων ΑΣΣ αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $pce/w$ . Ειδικά για μίγματα με μεταβλητό λόγο  $w/b$ , ο συντελεστής συσχέτισης είναι αρκετά ικανοποιητικός ( $R^2 = 0.75$ ). Όμοιες και απολύτως συγκρίσιμες ευθείες γραμμικών παλινδρομήσεων προέκυψαν από τα δεδομένα άλλων μελετών [Kanellopoulos et al. (2012), Felekoğlu et al. (2007)], που αφορούσαν μίγματα παρεμφερών συνθέσεων. Η σχεδόν απόλυτη σύμπτωση των ευθειών της παρούσας Διατριβής με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από τους Kanellopoulos et al. (2012) είναι μάλλον αναμενόμενη, μιας και οι συνθέσεις είναι απολύτως συγκρίσιμες, δεδομένου ότι σχεδιάστηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης της διεργασηριακής αναπαραγωγισιμότητας μιγμάτων ΑΣΣ. Η παράλληλη μετατόπιση της ευθείας των Felekoğlu et al. (2007) αποδίδεται σε μικρές διαφορές στη σύνθεση, καθώς επίσης και στη διαφορετική προέλευση και τις φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων αδρανών και των διαφορετικών χημικών πρόσθετων. Για την περίπτωση των μιγμάτων με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι οι τιμές των αντοχών κινούνται γύρω από μια μέση τιμή, καθώς και η μεταβολή του υπερρευστοποιητή δεν είναι ουσιαστική. Πάντως, και εδώ παρατηρείται μια αυξητική – αν και ασθενής ( $R^2 = 0.16$ ) – τάση των αντοχών. Τέλος, μία πρακτικά σταθερή θλιπτική αντοχή παρατηρείται για την περίπτωση των μιγμάτων ΣΣ.

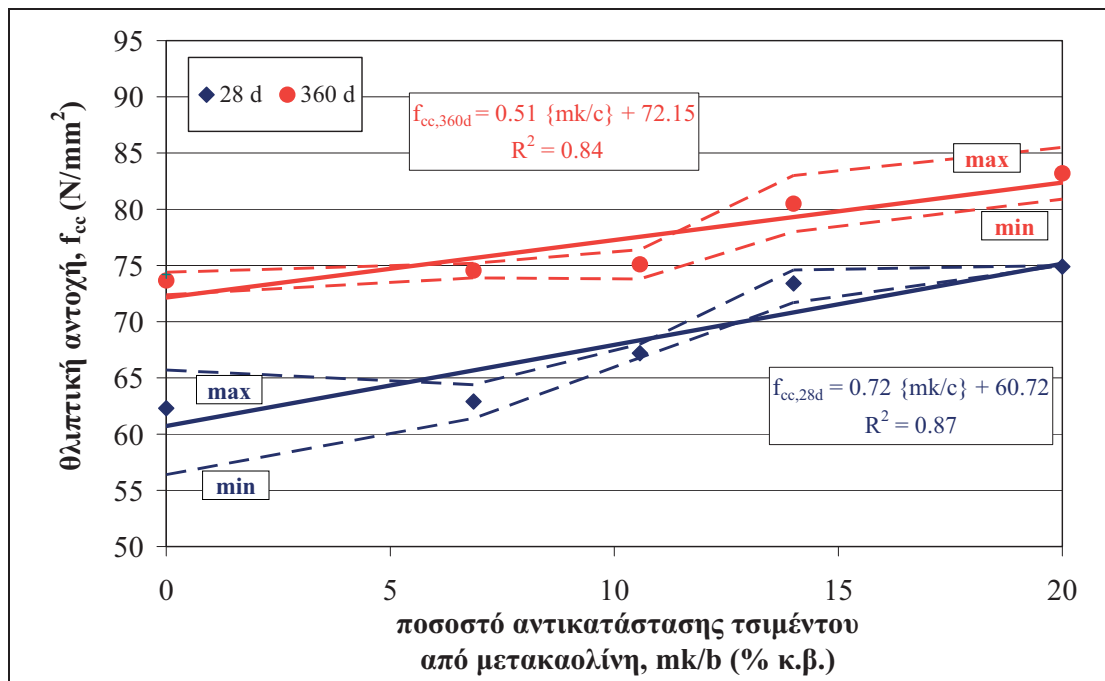


Σχήμα 71 Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς νερό στην θλιπτική αντοχή

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/\{mk+c\}$ ή $mk/b$ )

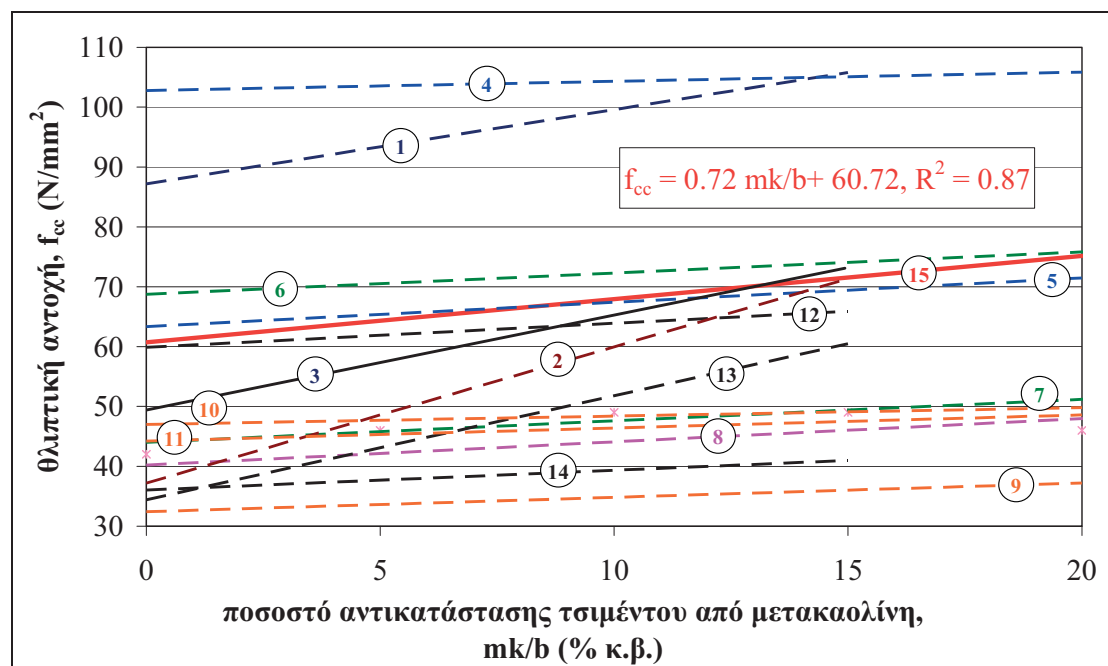
Στο **Σχήμα 72** παρουσιάζεται η θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  ( $N/mm^2$ ), 28 και 360 ημερών, σε συνάρτηση με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$  (% κ.β.), για τις συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (Πίνακας 40).

Παρατηρείται, όπως εξάλλου ήταν αναμενόμενο, ότι υψηλότεροι λόγοι  $mk/b$  οδηγούν σε υψηλότερες αντοχές. Για το εύρος ποσοστών αντικατάστασης που εξετάστηκε, από 0 έως 20 %, παρατηρήθηκε πολύ καλή γραμμική συσχέτιση ( $R^2 = 0.87$  και  $0.84$ ) μεταξύ των δύο μεγεθών και στις δύο ηλικίες (28 και 360 ημέρες, αντίστοιχα). Θα μπορούσε, πάντως, να υποθεθεί ότι μέχρι ποσοστού περίπου 7.0 % η συνεισφορά του μετακαολίνης στην αντοχή δεν είναι σημαντική, αν και αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε υπερεκτίμηση της αντοχής του μίγματος αναφοράς ( $mk/b = 0.0$  %), για το οποίο παρατηρήθηκε σημαντική διασπορά των αντοχών των τριών επιμέρους δοκιμών που ελέγχθηκαν υπό θλίψη (καμπύλες  $\min$  και  $\max$  επί του Σχήματος). Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλίση της ευθείας είναι μικρότερη σε ηλικία 360 ημερών, αν και για το εξεταζόμενο εύρος οι δύο ευθείες είναι πρακτικώς παράλληλες. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η ποζολανική αντίδραση έχει ήδη ολοκληρωθεί σε ηλικία 28 ημερών, καθώς η ενδεχόμενη συνεχιζόμενη ποζολανική δράση θα οδηγούσε σε υψηλότερες αντοχές για μεγαλύτερα ποσοστά  $mk/b$  για την ηλικία των 360 ημερών. Τέλος, παρατηρείται ότι για τρία δοκίμια που ελέγχθηκαν ανά μίγμα, το εύρος των επιμέρους αντοχών (διασπορά) εν γένει μειώνεται με την προσθήκη μετακαολίνης.



Σχήμα 72 Επιρροή μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στη θλιπτική αντοχή 28 και 360 ημερών

Στο Σχήμα 73, η εκτιμηθείσα γραμμική εξίσωση συσχέτισης της θλιπτικής αντοχής με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη σε ηλικία 28 ημερών συγκρίνεται με αντίστοιχες καμπύλες της βιβλιογραφίας (Πίνακας 59). Σημειώνεται ότι οι τιμές των σταθερών 'a' και 'b' των γραμμικών συσχετίσεων στα δεδομένα που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία δεν δίδονται από τις αντίστοιχες μελέτες, αλλά υπολογίστηκαν από τις δεδομένες αντοχές, ειδικώς για το σκοπό της παρούσας ανάλυσης. Παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις τιμές της αντοχής, όπως την υπολόγισαν οι διάφοροι ερευνητές (η αντοχή κυμαίνεται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος, μεταξύ 30 και 110 N/mm<sup>2</sup>, για τα διάφορα μίγματα).

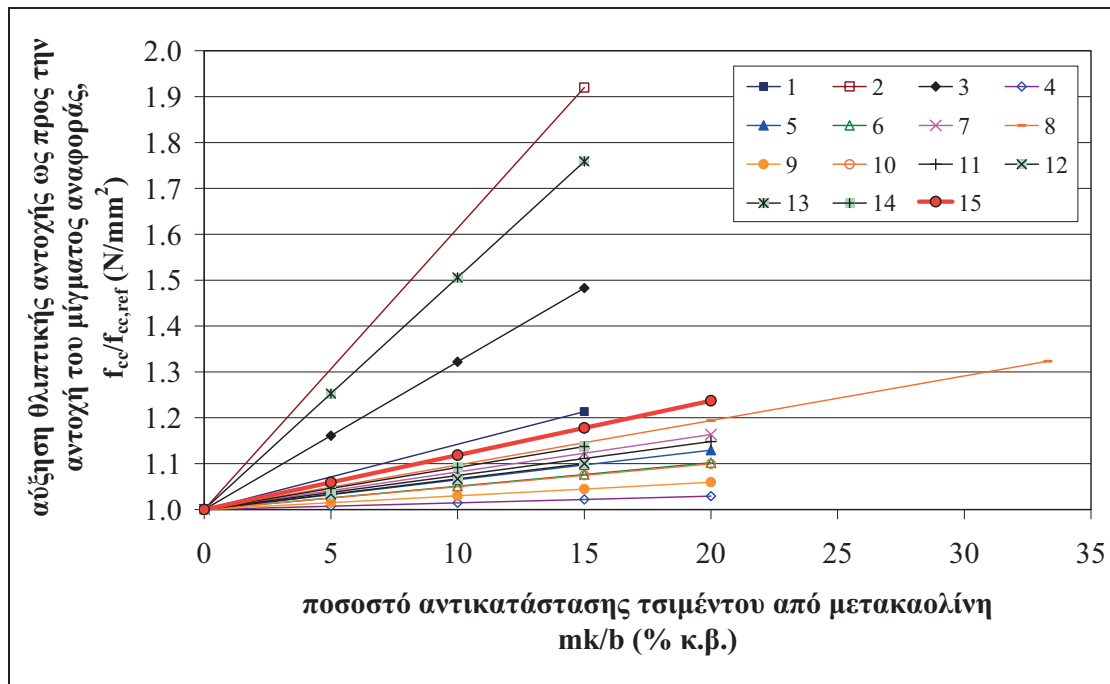


Σχήμα 73 Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή (σύγκριση με καμπύλες βιβλιογραφίας, η αρίθμηση αντιστοιχεί στις αριθμημένες γραμμές του Πίν. 59)

Πίνακας 59 Καμπύλες της βιβλιογραφίας της γραμμικής παλινδρόμησης που αφορούν στην επιρροή του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή

πειραματική μελέτη	τύπος σκυρ.	c kg/m³	mk/b %	s kg/m³	g kg/m³	w/b	προσαρμοσμένη γραμμική συσχέτιση: $f_{cc} = a\{mk/b\} + b$		
							a	b	R²
1 Brooks and Megat Johari (2001)	NVC	450	0,5,10,15	675	1125	0.28	1.24	87.20	0.87
2 Qian and Li (2001)	NVC	426	0,5,10,15	720	1080	0.38	2.28	37.18	0.96
3* Ding and Li (2002)	NVC	462	0,5,10,15	714	1173	0.35	1.59	49.40	0.92
4 Poon et al. (2006)	NVC	500	0,5,10,20	716	1087	0.30	0.15	102.78	0.02
5	NVC	410	0,5,10,20	658	1081	0.50	0.41	63.34	0.52
6* Güneyisi et al. (2008)	NVC	450	0,10,20	953	848	0.35	0.35	68.74	0.94
7*	NVC	350	0,10,20	957	851	0.55	0.36	44.00	1.00
8 Hassan et al. (2010, 2012)	SCC	450	0,3,1,5,3,8,7,12,3,17,6,25,0,33,3	925	895	0.40	0.39	40.20	0.87
9* Madandoust and Mousavi (2012)	SCC	490	0,5,10,15,20	975	806	0.32	0.14	47.00	0.09
10*	SCC	460	0,5,10,15,20	955	799	0.38	0.22	44.20	0.36
11*	SCC	435	0,5,10,15,20	933	800	0.45	0.24	32.40	0.54
12 Ramezani pour and Jovein (2012)	NVC	400	0,10,12,5,15	935	765	0.50	0.40	59.88	0.62
13	NVC	400	0,10,12,5,15	990	810	0.40	1.74	34.40	0.92
14	NVC	400	0,10,12,5,15	1018	833	0.35	0.33	36.03	0.78
15** παρούσα έρευνα	SCC	350	0,6,9,10,6,14,0,20,0	1050	500	0.60	0.72	60.72	0.87

\*οι πραγματικοί συντελεστές της παλινδρόμησης, a και b, καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να είναι ελαφρώς διαφορετικοί, δεδομένου ότι οι τιμές της θλιπτικής αντοχής αντλήθηκαν γραφικά από ραβδογράμματα των σχετικών μελετών, \*\*όλα τα μίγματα περιλαμβάνουν επιπλέον ασβεστολιθικό φίλερ (175 kg/m³)



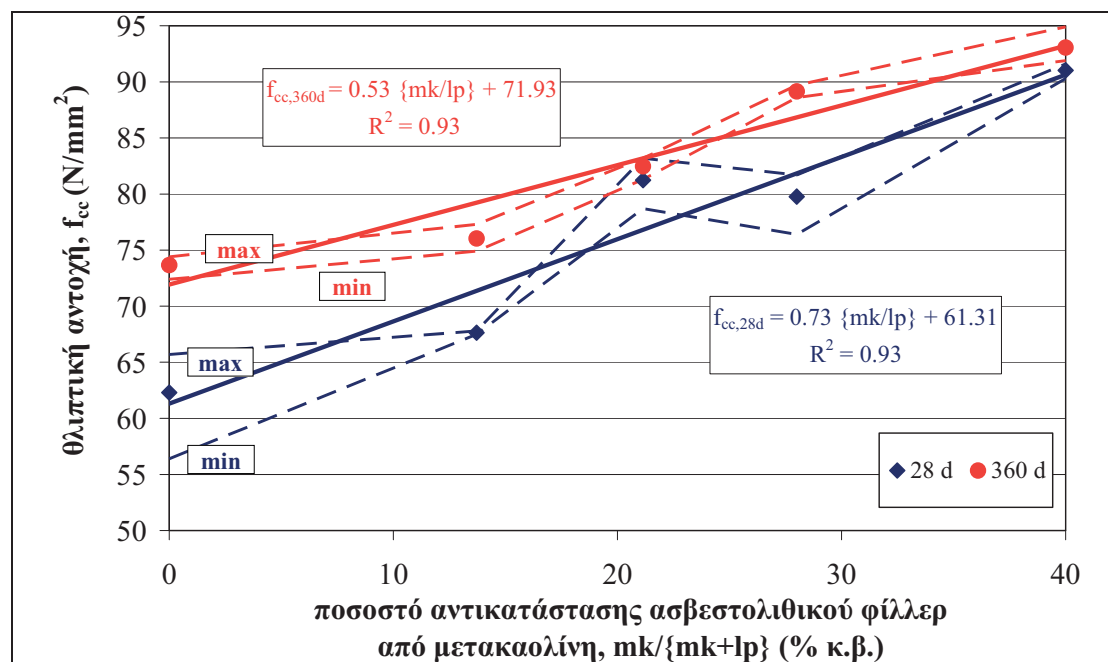
**Σχήμα 74** Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή (σύγκριση με καμπύλες βιβλιογραφίας, η αρίθμηση αντιστοιχεί στις αριθμημένες γραμμές του Πίν. 59)

Αυτό το εύρημα μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετική περιεκτικότητα τσιμέντου και νερού (π.χ. οι βιβλιογραφικές καμπύλες 1, 3, 4, 6 και 9 συνδυάζουν υψηλή περιεκτικότητα τσιμέντου με χαμηλό λόγο  $w/b$ , οδηγώντας σε υψηλές αντοχές), καθώς και στην διαφορετική περιεκτικότητα αδρανών και, κυρίως, της προέλευσης τους. Περισσότερες πληροφορίες για τις συνθέσεις μπορούν να αναζητηθούν στις αντίστοιχες βιβλιογραφικές πηγές. Η θετική συνεισφορά του μετακαολίνη επιβεβαιώνεται, πάντως, από τις θετικές κλίσεις όλων των καμπυλών. Μια σχετικώς όμοια αύξητική τάση είναι εμφανής για τις περισσότερες περιπτώσεις, η οποία είναι συγκρίσιμη με την τάση που εκτιμήθηκε στο πλαίσιο της Διατριβής. Γενικώς, παρατηρείται ότι η προσθήκη μετακαολίνη έχει μόνον θετικά αποτελέσματα στη θλιπτική αντοχή για τα εξεταζόμενα εύρη.

Μετασχηματίζοντας κατάλληλα τις καμπύλες του Σχήματος, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής ως προς τη θλιπτική αντοχή του μίγματος αναφοράς ( $mk/b = 0.0\%$ ) φαίνεται να είναι συγκρίσιμη και ελαφρώς υψηλότερη εν σχέσει προς τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας (**Σχήμα 74**).

#### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Στο **Σχήμα 75**, η θλιπτική αντοχή 28 και 360 ημερών,  $f_{cc}$  ( $N/mm^2$ ), συσχετίζεται με το ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$  (% κ.β.), για τις συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (Πίνακας 41). Οι υπολογισθέντες συντελεστές συσχέτισης ( $R^2 = 0.93$  και για τις δύο ηλικίες) για τη γραμμική παλινδρόμηση είναι υψηλοί. Είναι προφανές ότι υψηλότερα ποσοστά μετακαολίνη οδηγούν σε σημαντικά υψηλότερες τιμές αντοχών, ανεξαρτήτως της ηλικίας. Δε φαίνεται να υπάρχει κάποια σαφής συσχέτιση μεταξύ του εύρους των τιμών αντοχών τριών δοκιμών και του ποσοστού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ, όπως στην περίπτωση αντικατάστασης του τσιμέντου.

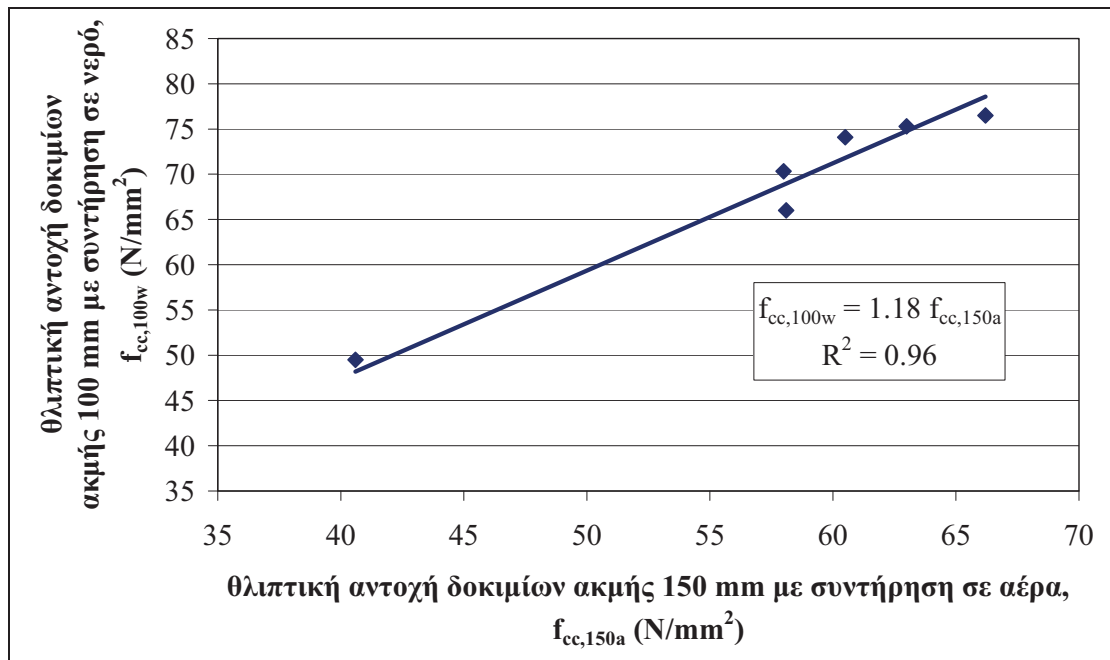


Σχήμα 75 Επίρροή ποσοστού μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ στη θλιπτική αντοχή 28 και 360 ημερών

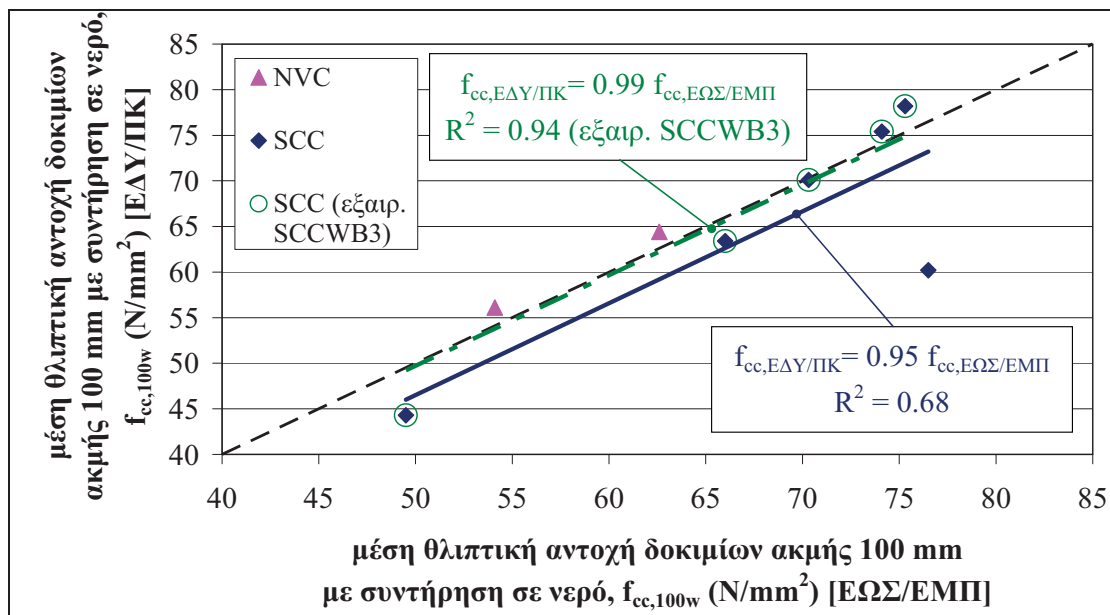
Θεωρείται χρήσιμο να σχολιαστεί ότι η υπολογισθείσα κλίση της γραμμικής συσχέτισης (0.73 για τις 28 ημέρες και 0.53 για τις 360 ημέρες) είναι παρόμοια με την αντίστοιχη κλίση της συσχέτισης που αφορά την αντικατάσταση τσιμέντου (0.72 και 0.51, αντίστοιχα). Ως εκ τούτου, μπορεί να υποτεθεί ότι ίδια ποσοστά αντικατάστασης είτε τσιμέντου είτε ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη οδηγούν σε παρόμοια αύξηση της αντοχής 28 και 360 ημερών.

### Επίρροή διαστάσεων και μεθόδου συντήρησης δοκιμίων προσδιορισμού μέσης θλιπτικής αντοχής – Διεργαστηριακή σύγκριση

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της διεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας παρεμφερών συνθέσεων ΑΣΣ ως προς τη συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος (όπως θα περιγραφεί στην Παρ. 3.3.7.2), στο ΕΩΣ/ΕΜΠ χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, τα οποία συντηρήθηκαν σε αέρα, ώστε να υποβληθούν σε όμοια συντήρηση με τα δοκίμια της συνάφειας. Από την άλλη πλευρά, στο ΕΔΥ/ΠΚ χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm, τα οποία συντηρήθηκαν σε νερό. Επομένως, με σκοπό μία ισοδύναμη θλιπτική αντοχή, στην οποία θα αναχθούν οι τάσεις συνάφειας, κρίνεται απαραίτητο να προσδιοριστεί ένας συντελεστής αναγωγής των θλιπτικών αντοχών. Ο εν λόγω συντελεστής αναγωγής μπορεί αν προσδιοριστεί από τις θλιπτικές αντοχές, όπως υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης της διεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας παρεμφερών συνθέσεων ΑΣΣ ως προς την ανθεκτικότητά τους. Συγκεκριμένα, στο ΕΔΥ/ΠΚ παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm, τα οποία συντηρήθηκαν σε νερό, ενώ στο ΕΩΣ/ΕΜΠ παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια 100 και 150 mm, τα οποία συντηρήθηκαν σε νερό και αέρα, αντίστοιχα. Είναι σαφές ότι η ταυτόχρονη αλλαγή δύο παραμέτρων (διαστάσεις, μέθοδος συντήρησης) εμποδίζει την διερεύνηση και ποσοτικοποίηση της ξεχωριστής επίρροής καθεμίας παραμέτρου στην αντοχή. Πάντως, τα εν λόγω αποτελέσματα κρίνονται επαρκή για τον προσδιορισμό του συντελεστή αναγωγής των θλιπτικών αντοχών για χρήση στην περίπτωση των δοκιμίων συνάφειας, όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 76 Προσδιορισμός συντελεστή αναγωγής μέσης θλιπτικής αντοχής μεταξύ δοκιμίων ακμής 150 mm με συντήρηση σε αέρα και δοκιμίων ακμής 100 mm με συντήρηση σε νερό



Σχήμα 77 Διεργαστηριακή σύγκριση μέσης θλιπτικής αντοχής,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Z1 και Z2) σε ηλικία 28 ημερών

Στο Σχήμα 76 συσχετίζονται οι μέσες θλιπτικές αντοχές δοκιμίων ακμής 150 mm που συντηρήθηκαν σε αέρα και δοκιμίων ακμής 100 mm που συντηρήθηκαν σε νερό, στο σύνολό τους παρασκευασμένων στο ΕΩΣ/EMΠ. Παρατηρείται ότι οι αντοχές συσχετίζονται γραμμικά, με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.96$ ). Ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής αναγωγής της θλιπτικής αντοχής είναι ίσος με 1.18. Συγκρίνοντας τις μέσες θλιπτικές αντοχές μεταξύ των δύο εργαστηρίων, όπως αυτές προέκυψαν για δοκίμια ακμής 100 mm που συντηρήθηκαν σε νερό, παρατηρείται (Σχήμα 77) ότι, εξαιρουμένης της σύνθεσης SCCWB3, οι αντοχές συσχετίζονται γραμμικά με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.94$ ). Οι αντίστοιχες αντοχές των συνθέσεων ΣΣ συμπίπτουν πρακτικώς με τη διαγώνιο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω ευρήματα, η μέση θλιπτική αντοχή δοκιμίων ακμής 150 mm που συντηρήθηκαν σε αέρα μπορεί, μέσω της εφαρμογής ενός πολλαπλασιαστικού συντελεστή 1.18, να αναχθεί σε ισοδύναμη θλιπτική αντοχή δοκιμίων ακμής 100 mm που συντηρήθηκαν σε νερό. Επιπλέον, η υπολογιζόμενη μέση θλιπτική αντοχή είναι ισοδύναμη μεταξύ των δύο εργαστηρίων.

### 2.3.2.3. Εφελκυστική αντοχή<sup>13</sup>

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής,  $f_{ct}$  (N/mm<sup>2</sup>), εφαρμόστηκε το πρότυπο EN 12390-6 (2000). Χρησιμοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, πρότυπα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm ή 150 mm και ύψους 200 mm ή 300 mm, αντιστοίχως, τα οποία δοκιμάστηκαν σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή brazilian: εφελκυσμός από διάρρηξη) σε σερβουδραυλική μηχανή θλίψης Wykeham Farrance του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., συμμορφούμενη στο πρότυπο EN 12390-4 (2000), με ρυθμιζόμενο ρυθμό φόρτισης (σε όρους δυνάμεων) και μέγιστη δυναμικότητα (φορτίο) 3000 kN (πάντως κατάλληλη και για μικρά φορτία). Μέρος των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε μηχανή θλίψης τύπου Avery με χειροκίνητο ρυθμό φόρτισης και μέγιστη δυναμικότητα (φορτίο) 600 kN.

#### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/\{mk+c\}$ ή $mk/b$ )

Η συσχέτιση μεταξύ της εφελκυστικής αντοχής,  $f_{ct}$  (N/mm<sup>2</sup>), όπως αυτή προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού (δοκιμή brazilian, εφελκυσμός υπό διάρρηξη), και του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$  (% κ.β.), των συνθέσεων της υπο-ομάδας Γ (Πίνακας 40) παρουσιάζεται στο **Σχήμα 78**. Παρά το γεγονός ότι παρατηρείται μεγάλη μεταβλητότητα, θα μπορούσε να υποθεθεί ότι η εφελκυστική αντοχή παραμένει σχεδόν σταθερή ή αυξάνεται ελαφρώς για υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης, αν και παρατηρείται μεγάλη αστάθεια των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα είναι τα σχετικά αποτελέσματα άλλων ερευνών της βιβλιογραφίας. Ειδικότερα, οι Qian and Li (2001) υπολόγισαν μία παρεμφερή ελαφρά αυξητική τάση, ενώ και οι Güneynisi et al. (2008) υπολόγισαν μια ασήμαντη, αυξητική πάντως, επιρροή του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου.

#### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Η συσχέτιση μεταξύ της εφελκυστικής αντοχής,  $f_{ct}$  (N/mm<sup>2</sup>), όπως αυτή προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού (δοκιμή brazilian, εφελκυσμός υπό διάρρηξη), και του ποσοστού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$  (% κ.β.), των συνθέσεων της υπο-ομάδας Δ (Πίνακας 41) παρουσιάζεται στο **Σχήμα 79**. Τα δύο μεγέθη συσχετίζονται γραμμικά, με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.88$ ). Η διασπορά μεταξύ των δύο δοκιμίων που ελέγχθηκαν (καμπύλες min και max επί του Σχήματος) φαίνεται να

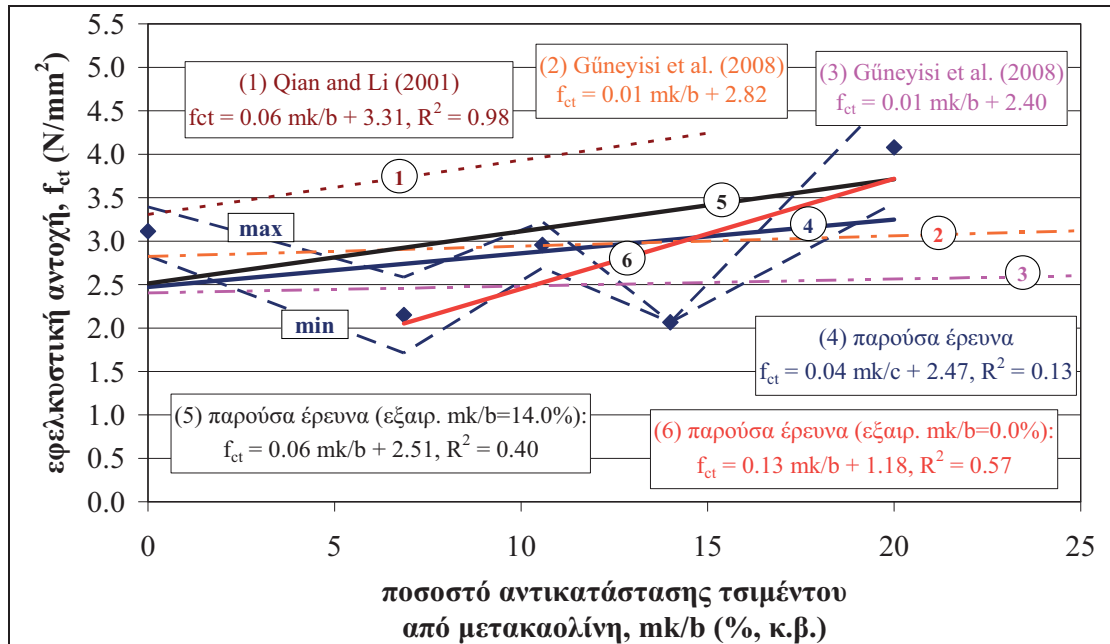
<sup>13</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

-στο 5<sup>ο</sup> Συνέδριο για το ΑΣΣ (SCC2013): 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, Chicago, IL, USA, May 12–15 2013 [Trezos et al. (2013)] και

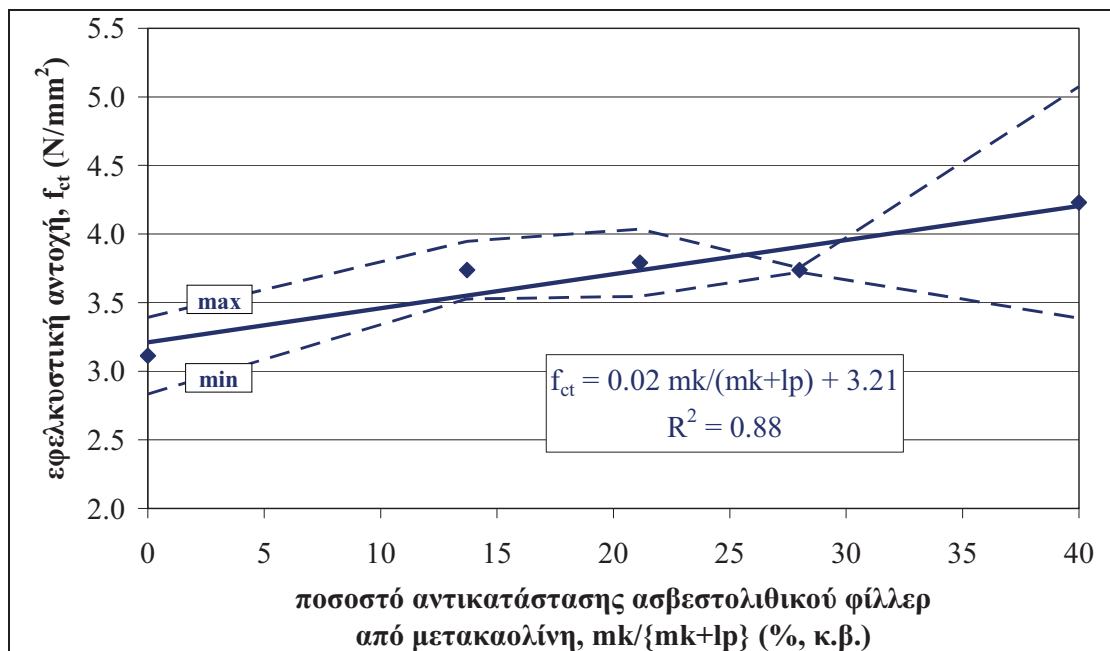
-στο επιστημονικό περιοδικό Construction & Building Materials [Sfikas et al. (2014)].



είναι σταθερή για μικρότερους λόγους  $mk/\{mk+lp\}$ . Το μέγιστο ποσοστό αντικατάστασης 40 % φαίνεται να οδηγεί σε αύξηση της εφελκυστικής αντοχής κατά περίπου 30 %. Δε βρέθηκαν αντίστοιχες καμπύλες στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 78 Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως αντικατάσταση τσιμέντου στην εφελκυστική αντοχή 28 ημερών – Σύγκριση με καμπύλες βιβλιογραφίας



Σχήμα 79 Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ στην εφελκυστική αντοχή 28 ημερών

Δεδομένης της πρακτικώς κοινής κοκκομετρίας των δύο υλικών (μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ, Σχήμα 54), η φυσική δράση δεν αναμένεται να επηρεάσει την εφελκυστική αντοχή. Από την άλλη πλευρά, η ποζολανική δράση του μετακαολίνη αναμένεται να αυξήσει τη συνεκτικότητα της πάστας και να οδηγήσει σε λιγότερο ψαθυρό σκυρόδεμα. Έτσι, η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής θα μπορούσε να εξηγηθεί. Για μίγματα ΣΣ, παρεμφερή, αν και λιγότερο βελτιωτική, δράση είχε η προσθήκη μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης ασβεστολιθικής άμμου [Rashad

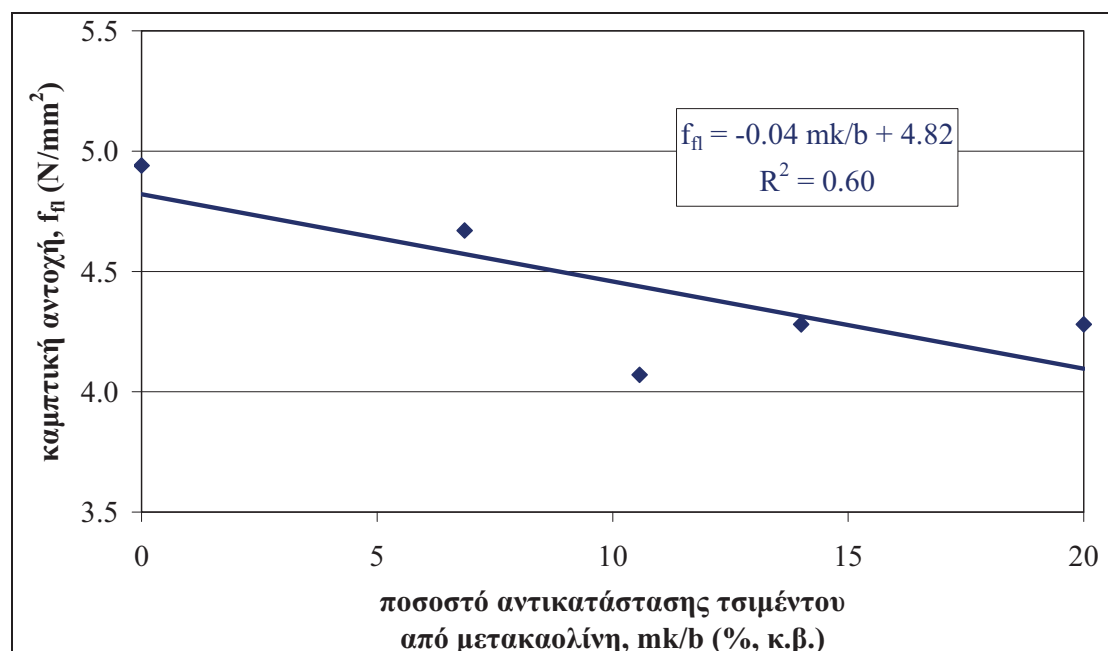
(2013)]. Ειδικότερα, αναφέρθηκε ότι ποσοστό αντικατάστασης 40 % οδηγεί σε αύξηση της εφελκυστικής αντοχής κατά 15 % σε ηλικία 28 ημερών, γεγονός το οποίο αποδόθηκε στη χαμηλότερη ψαθυρότητα των μιγμάτων με μετακαολίνη.

#### 2.3.2.4. Καμπτική αντοχή<sup>14</sup>

Για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής,  $f_{fl}$  (N/mm<sup>2</sup>), εφαρμόστηκε το πρότυπο EN 12390-5 (2000). Χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα πρισματικά δοκίμια διατομής 100 × 100 mm και μήκους  $L = 500$  mm, τα οποία δοκιμάστηκαν, κατά περίπτωση, σε κάμψη τριών ή τεσσάρων σημείων σε σερβοϋδραυλική μηχανή θλίψης, συμμορφούμενης στο πρότυπο EN 12390-4 (2000), του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π., με ρυθμιζόμενο ρυθμό φόρτισης (σε όρους παραμορφώσεων) και μέγιστη δυναμικότητα (φορτίο) 100 kN.

#### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/\{mk+c\}$ ή $mk/b$ )

Η συσχέτιση μεταξύ της καμπτικής αντοχής,  $f_{fl}$  (N/mm<sup>2</sup>), όπως αυτή προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής κάμψης τριών σημείων, και του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$  (% κ.β.), των συνθέσεων της υποομάδας Γ (Πίνακας 40) παρουσιάζεται στο Σχήμα 80.



Σχήμα 80 Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως αντικατάσταση τσιμέντου στην καμπτική αντοχή 28 ημερών

Τα δύο μεγέθη συσχετίζονται γραμμικά, με συντελεστή συσχέτισης ίσο με  $R^2 = 0.60$ . Δε βρέθηκαν αντίστοιχες καμπύλες στη βιβλιογραφία. Σημειώνεται ότι αντίθετες τάσεις μεταβολής της εφελκυστικής και της καμπτικής αντοχής οδηγούν στο πιθανό συμπέρασμα ότι οι μεταβολές αυτές είναι τυχαίες και οφειλόμενες σε διασπορά των

<sup>14</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

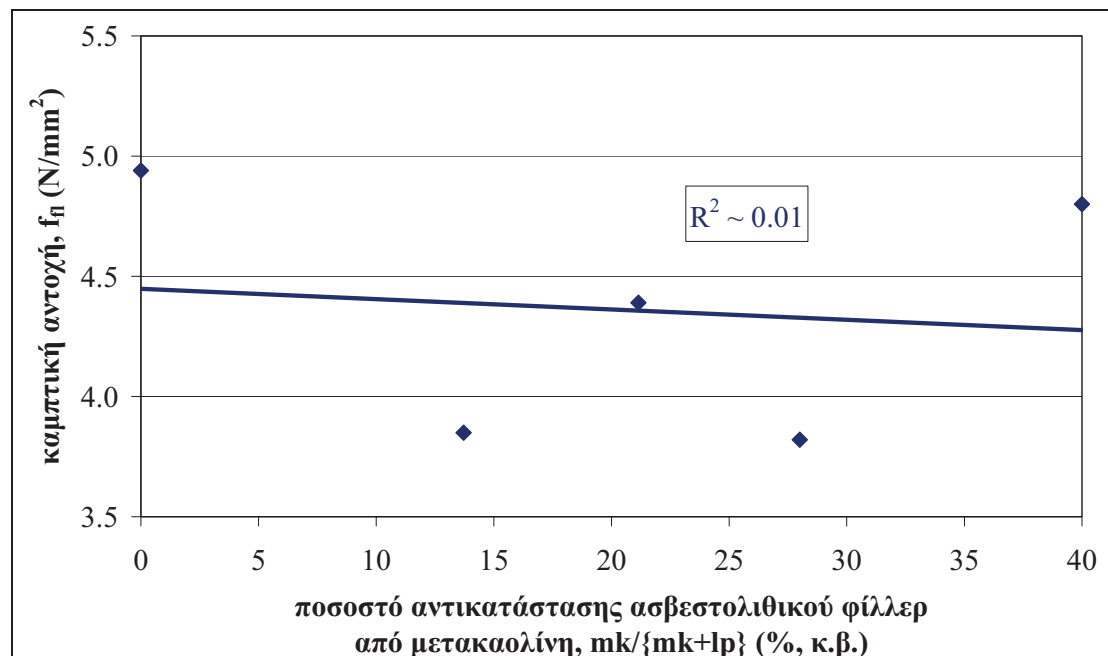
-στο 5<sup>ο</sup> Συνέδριο για το ΑΣΣ (SCC2013): 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, Chicago, IL, USA, May 12–15 2013 [Trezos et al. (2013)] και

-στο επιστημονικό περιοδικό Construction & Building Materials [Sfikas et al. (2014)].

αποτελεσμάτων και, κατ' ουσίαν, οι αντοχές δε συσχετίζονται με τη μεταβολή του λόγου  $mk/b$ . Το μικρό πλήθος των δοκιμών δεν διασφαλίζει την ισχύ οποιουδήποτε ασφαλούς συμπεράσματος και απαιτείται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση.

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Η συσχέτιση μεταξύ της καμπτικής αντοχής,  $f_{\Pi}$  ( $N/mm^2$ ), όπως αυτή προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής κάμψης τριών σημείων, και του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου από ασβεστολιθικό φίλερ,  $mk/\{mk+lp\}$  (% κ.β.), των συνθέσεων της υποομάδας Δ (Πίνακας 41) παρουσιάζεται στο **Σχήμα 81**. Τα δύο μεγέθη δε φαίνεται να συσχετίζονται. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι οι αντίθετες τάσεις μεταβολής της εφελκυστικής και της καμπτικής αντοχής οδηγούν στο πιθανό συμπέρασμα ότι οι μεταβολές αυτές είναι τυχαίες και οφειλόμενες σε διασπορά των αποτελεσμάτων και, κατ' ουσίαν, οι αντοχές δε συσχετίζονται με τη μεταβολή του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$ . Το μικρό πλήθος των δοκιμών δεν διασφαλίζει την ισχύ οποιουδήποτε ασφαλούς συμπεράσματος και απαιτείται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση.



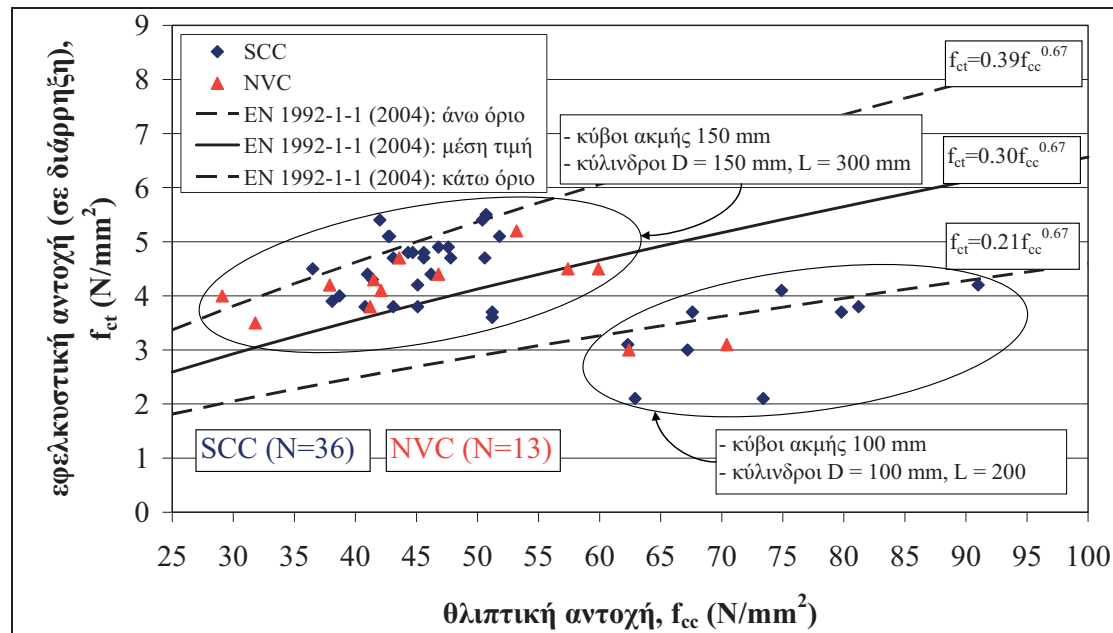
**Σχήμα 81** Επιρροή ποσοστού μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ στην καμπτική αντοχή 28 ημερών

#### 2.3.2.5. Συσχέτιση μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής

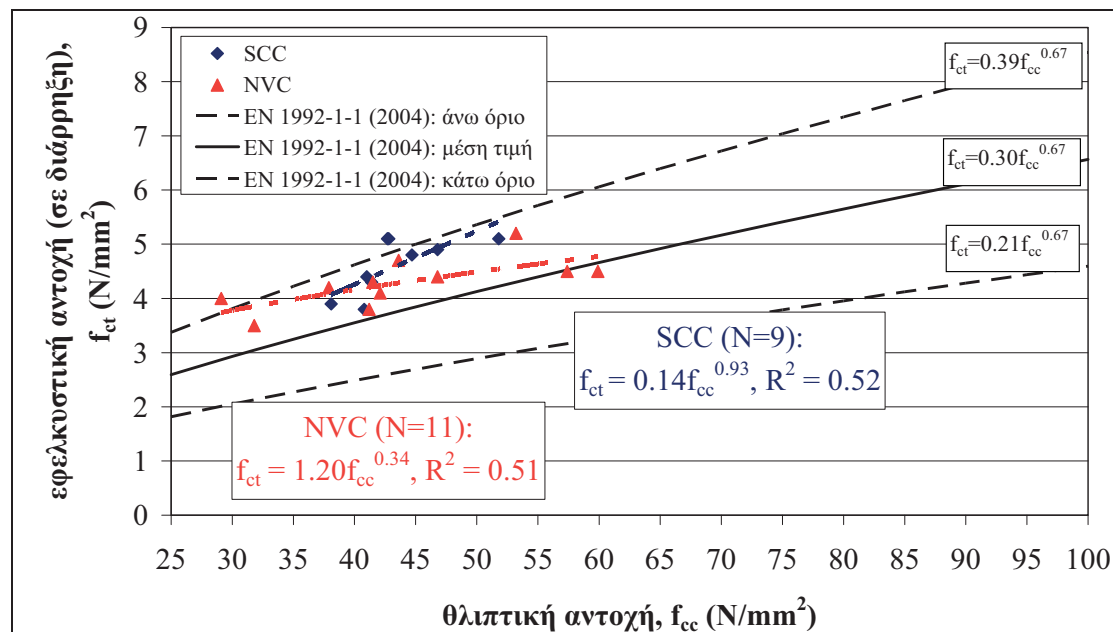
##### Σύνολο μιγμάτων ΑΣΣ

Στο **Σχήμα 82** παρουσιάζεται το σύνολο των 49 μιγμάτων, για τα οποία προσδιορίστηκαν ταυτόχρονα η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα ζεύγη αντοχών από 36 μίγματα ΑΣΣ και 13 μίγματα ΣΣ. Ο προσδιορισμός των αντοχών στην πλειοψηφία των μιγμάτων ( $N = 36$ ) έγινε με κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου  $D = 150$  mm και ύψους  $L = 300$  mm για τη θλιπτική και την εφελκυστική αντοχή, αντίστοιχα. Σε ένα μικρό πλήθος μιγμάτων ( $N = 13$ ) χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μικρότερων διαστάσεων και, συγκεκριμένα, κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm και κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου  $D = 100$  mm και ύψους  $L = 200$  mm.

Παρατηρείται ότι για τα μεγαλύτερα δοκίμια, τα ζεύγη αντοχών εμπίπτουν, κατά κανόνα, στην περιοχή μεταξύ της μέσης καμπύλης και του άνω ορίου του ευρωπαϊκού κατασκευαστικού κανονισμού [EN 1992-1-1 (2004)], ανεξάρτητα του τύπου σκυροδέματος, ΑΣΣ ή ΣΣ. Όσο αφορά στα μικρότερα δοκίμια, τα ζεύγη αντοχών βρίσκονται κοντά στο κάτω όριο του κανονισμού. Σημειώνεται ότι, ακόμα και εάν οι αντοχές αυτές διορθωθούν με κάποιους συντελεστές κλίμακας, τα ζεύγη αντοχών θα μετατεθούν οριζόντια προς τα αριστερά (χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές) και προς τα κάτω (χαμηλότερες εφελκυστικές αντοχές), επομένως θα βρίσκονται και πάλι κοντά στο κάτω όριο του κανονισμού. Πάντως, στις αναλύσεις που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκαν ζεύγη αντοχών που προέκυψαν από δοκίμια ίδιων διαστάσεων.



Σχήμα 82 Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για όλα τα μίγματα ΑΣΣ – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες του Ευρωκώδικα 2 [EN 1992-1-1 (2004)]



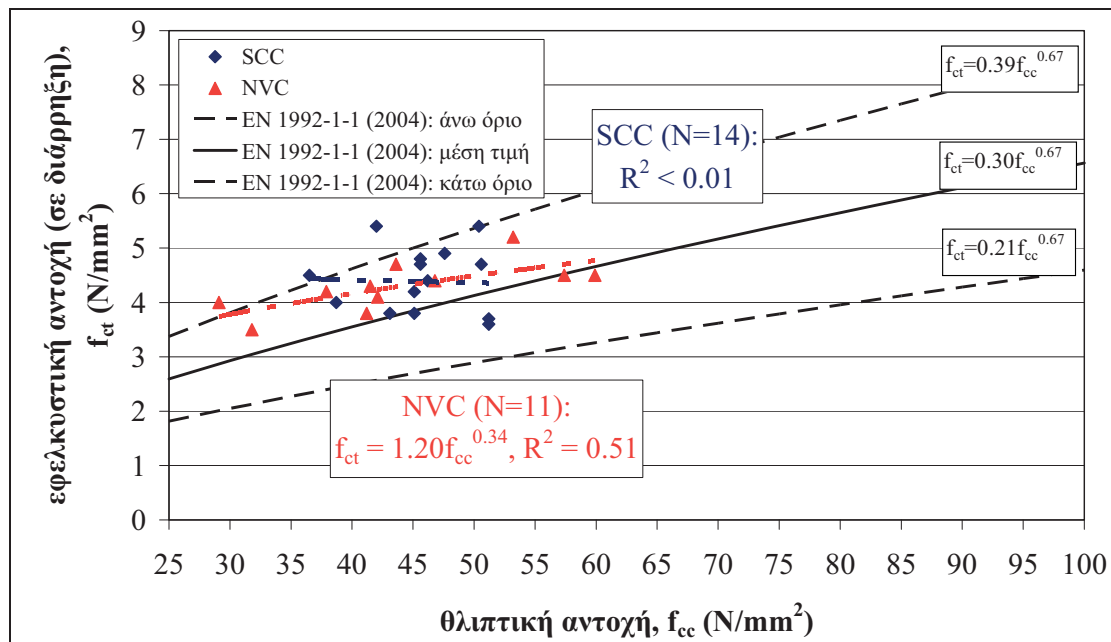
Σχήμα 83 Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ χωρίς πρόσμικτα – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού

### Μίγματα ΑΣΣ χωρίς πρόσμικτα

Στο **Σχήμα 83** απομονώνονται τα ζεύγη αντοχών που αφορούν τα 9 μίγματα ΑΣΣ που δεν περιέχουν πρόσμικτα τύπου Ι (ασβεστολιθικό φίλερ) ή ΙΙ (πυριτική παιπάλη ή μετακαολίνη), τα οποία και συγκρίνονται με τα 11 μίγματα ΣΣ. Παρατηρείται ότι όλα τα μίγματα βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ της μέσης καμπύλης και του άνω ορίου του ευρωπαϊκού κατασκευαστικού κανονισμού [EN 1992-1-1 (2004)]. Όσο αφορά στα μίγματα ΑΣΣ, παρατηρείται ότι, για το εξεταζόμενο εύρος θλιπτικών αντοχών από 38.1 έως 51.8 N/mm<sup>2</sup>, οι αντίστοιχες εφελκυστικές αντοχές ακολουθούν παρόμοια αυξητική τάση με το άνω όριο του κανονισμού. Αντίθετα οι εφελκυστικές αντοχές του ΣΣ φαίνεται να μειώνονται για μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές και να προσεγγίζουν τη μέση καμπύλη του κανονισμού.

### Μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα τύπου Ι

Στο **Σχήμα 84** παρουσιάζονται τα ζεύγη αντοχών των 14 μιγμάτων ΑΣΣ που περιέχουν, αποκλειστικά, πρόσμικτα τύπου Ι και, συγκεκριμένα, ασβεστολιθικό φίλερ. Σημειώνεται ότι δεν έχουν περιληφθεί μίγματα με συνδυασμό προσμίκτων Ι (ασβεστολιθικό φίλερ) και ΙΙ (πυριτική παιπάλη ή μετακαολίνη). Τα ζεύγη αντοχών των μιγμάτων ΑΣΣ δε φαίνεται να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση και γενικώς φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντική διασπορά των εφελκυστικών αντοχών τους στο εξεταζόμενο εύρος των θλιπτικών αντοχών, από 36.5 έως 51.1 N/mm<sup>2</sup>, βρίσκονται πάντως μεταξύ της μέσης καμπύλης και του άνω ορίου του ευρωπαϊκού κατασκευαστικού κανονισμού [EN 1992-1-1 (2004)].

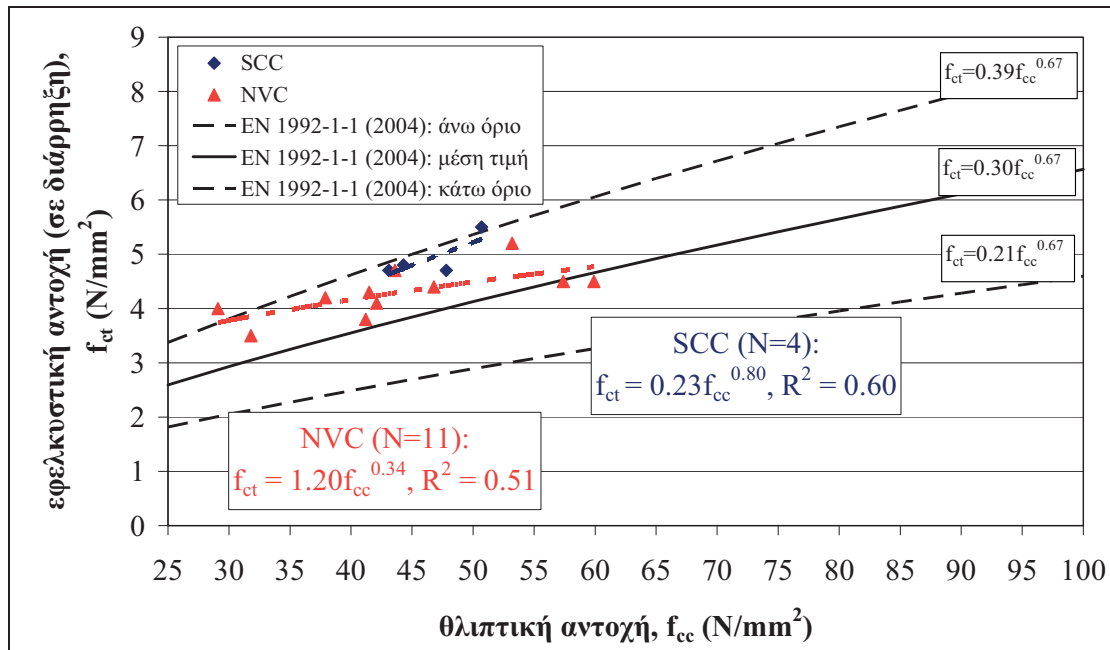


**Σχήμα 84** Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα τύπου Ι (ασβεστολιθικό φίλερ) – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού

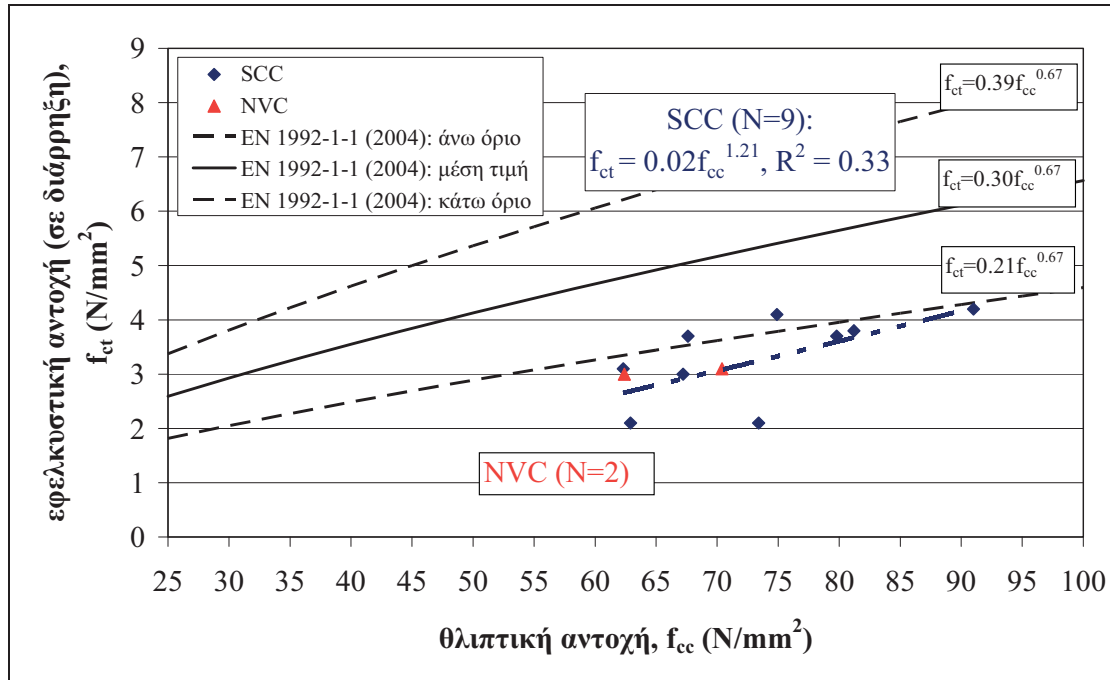
### Μίγματα ΑΣΣ με πυριτική παιπάλη

Στο **Σχήμα 85**, παρουσιάζονται τα ζεύγη αντοχών των 4 μιγμάτων ΑΣΣ που περιέχουν, αποκλειστικά, πρόσμικτα τύπου ΙΙ και, συγκεκριμένα, πυριτική παιπάλη. Σημειώνεται ότι δεν έχουν περιληφθεί μίγματα με συνδυασμό προσμίκτων Ι

(ασβεστολιθικό φίλερ) και ΙΙ (πυριτική παιπάλη). Παρατηρείται ότι, για το εξεταζόμενο εύρος θλιπτικών αντοχών, από 43.1 έως 50.7 N/mm<sup>2</sup>, οι αντίστοιχες εφελκυστικές αντοχές ακολουθούν παρόμοια αυξητική τάση με το άνω όριο του ευρωπαϊκού κατασκευαστικού κανονισμού [EN 1992-1-1 (2004)].



Σχήμα 85 Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με πρόσμικτα τύπου ΙΙ (πυριτική παιπάλη) – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού

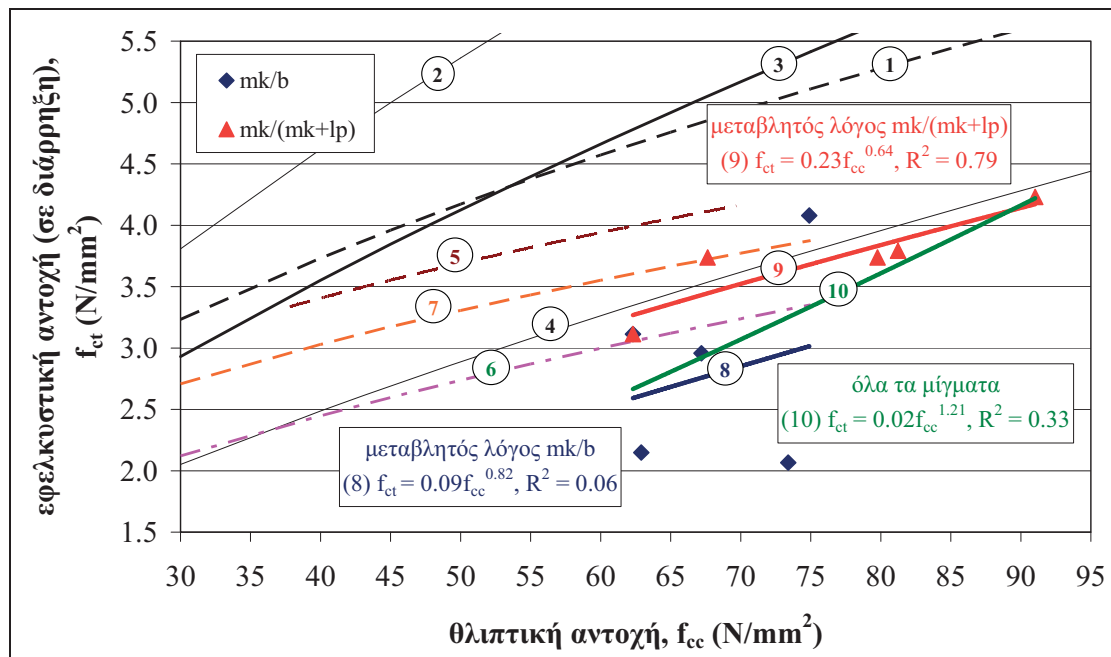


Σχήμα 86 Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για μίγματα ΑΣΣ με συνδυασμό πρόσμικτων τύπου Ι και ΙΙ (ασβεστολιθικό φίλερ και μετακαολίνης) – Σύγκριση με ΣΣ και καμπύλες κανονισμού

### Μίγματα ΑΣΣ με συνδυασμό μετακαολίνη και ασβεστολιθικό φίλερ

Στο **Σχήμα 86** τα ζεύγη αντοχών που αφορούν τα 8 μίγματα ΑΣΣ που περιέχουν συνδυασμό πρόσμικτων τύπου Ι (ασβεστολιθικό φίλερ) και ΙΙ (μετακαολίνης), μαζί με 1 επιπλέον μίγμα ΑΣΣ που αποτελεί το μίγμα αναφοράς, χωρίς την προσθήκη μετακαολίνης. Επιπλέον παρουσιάζονται και τα ζεύγη αντοχών δύο μιγμάτων ΣΣ. Σημειώνεται ότι σε όλα τα παραπάνω μίγματα, ο προσδιορισμός της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής πραγματοποιήθηκε με κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm και κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου  $D = 100$  mm και ύψους  $L = 200$  mm, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι τα ζεύγη αντοχών, για το εξεταζόμενο εύρος θλιπτικών αντοχών, από 62.3 έως 91.0 N/mm<sup>2</sup>, βρίσκονται κοντά στο κάτω όριο του ευρωπαϊκού κατασκευαστικού κανονισμού [EN 1992-1-1 (2004)], αν και για χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές το όριο αυτό φαίνεται να υπερεκτιμά την εφελκυστική αντοχή. Η διασπορά των εφελκυστικών αντοχών φαίνεται να είναι μεγαλύτερη για χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές, ενώ η συμπεριφορά των ΑΣΣ σε εφελκυσμό φαίνεται να προσομοιάζει τη συμπεριφορά των μιγμάτων ΣΣ ίδιας θλιπτικής αντοχής.

Στο **Σχήμα 87**, παρουσιάζονται οι επιμέρους συσχετίσεις μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής για την περίπτωση που ο μετακαολίνης χρησιμοποιείται ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ή του ασβεστολιθικού φίλερ. Επιπροσθέτως, οι προκύπτουσες καμπύλες συσχέτισης συγκρίνονται με άλλες καμπύλες κανονισμών ή πειραματικών ερευνών, όπως αυτές καταγράφονται αναλυτικά στον **Πίνακα 60**. Οι εξισώσεις των καμπυλών δίδονται μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης, μόνο όπου εφαρμόζονται ή είναι διαθέσιμοι. Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι καμπύλες που προέκυψαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ με ενσωμάτωση μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ή του ασβεστολιθικού φίλερ βρίσκονται κοντά στο κάτω όριο των κανονισμών [EN 1992-1-1 (2004), CEB-FIP 90 (1990)].



**Σχήμα 87** Εφελκυστική αντοχή συναρτήσεως της θλιπτικής αντοχής για μίγματα με προσθήκη μετακαολίνης ως αντικατάσταση τσιμέντου ή ασβεστολιθικού φίλερ – Σύγκριση με βιβλιογραφία

**Πίνακας 60** Καμπύλες της βιβλιογραφίας που αφορούν στην επιρροή του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου στην θλιπτική αντοχή – Σύγκριση με καμπύλες κανονισμών

κανονισμός ή μελέτη αναφοράς	δεδομένη ή προσαρμοσμένη καμπύλη δυνάμεως (μέσω παλινδρόμησης) για την έμμεση εκτίμηση της $f_{ct}$			$R^{2*}$
	άνω όριο	μέση	κάτω όριο	
1 ACI 363R (1992)		$0.59 f_{cc}^{0.50}$		
2-4 EN 1992-1-1 (2004)	$0.39 f_{cc}^{0.67}$	$0.30 f_{cc}^{0.67}$	$0.21 f_{cc}^{0.67}$	
2-4 CEB-FIP (1990)	$1.85 (f_{cc}/10)^{0.67}$	$1.40 (f_{cc}/10)^{0.67}$	$0.95 (f_{cc}/10)^{0.67}$	
5 Qian and Li (2001)		$0.90 f_{cc}^{0.36}$		0.93
6 Güneyisi et al. (2008)		$0.387 f_{cc}^{0.50}$		
7 Madandoust and Mousavi (2012)		$1.7593 (f_{cc}/10)^{0.392}$		
8 παρούσα έρευνα	μεταβλητό $mk/b$	$0.09 f_{cc}^{0.82}$		0.06
9	μεταβλητό $mk/\{mk+lp\}$	$0.23 f_{cc}^{0.64}$		0.79
10	όλα τα μίγματα	$0.02 f_{cc}^{1.21}$		0.33

\*μόνο όπου είναι διαθέσιμος ή εφαρμόσιμος

Μελετώντας τις επιμέρους περιπτώσεις αφενός της αντικατάστασης του τσιμέντου και αφετέρου της αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ, παρατηρείται ότι για τη δεύτερη περίπτωση η συσχέτιση σχεδόν συμπίπτει με το κάτω όριο των κανονισμών και είναι ιδιαίτερος σταθερή, γεγονός που αποδεικνύεται και από τον υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.79$ ). Αντίθετα, για την περίπτωση της αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη, συναντάται σημαντική μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων, οδηγώντας πρακτικώς σε ανύπαρκτη συσχέτιση ( $R^2=0.06$ ). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι καμπύλες που δίδονται από τους κανονισμούς φαίνεται να υπερεκτιμούν την εφελκυστική αντοχή, ιδιαίτερα για χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές (π.χ. για θλιπτική αντοχή ίση με  $65 \text{ N/mm}^2$ , η αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή υπολογίζεται πειραματικά σε  $2.75 \text{ N/mm}^2$ , ήτοι περίπου 20 % μικρότερη από την αναμενόμενη αντοχή των  $3.44 \text{ N/mm}^2$ ). Σε παρόμοια συμπεράσματα έχουν οδηγηθεί και άλλοι ερευνητές [Qian and Li (2001), Güneyisi et al. (2008), Madandoust and Mousavi (2012)], γεγονός που παρατηρείται και από τις σχετικές καμπύλες του Σχήματος (Σχήμα 87).

**Πίνακας 61** Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών που αφορούν σε θέματα συνάφειας

περιγραφή δόκιμης	περιγραφή δοκιμίων	πλήθος πειραμάτων		
		ΑΣΣ	ΣΣ	Σύν.
Τάση συνάφειας για ράβδους «μεσαίας» διαμέτρου ( $\varnothing 16$ ) σε κυβικά δοκίμια Φαινόμενο άνω ράβδων	κυβικά δοκίμια (ακμής 0.20 m, $1 \times \varnothing 16$ )	45	15	<b>60</b>
	κατακόρυφα στοιχεία (1.80 m, $9 \times \varnothing 16$ )	72	18	<b>90</b>
	κατακόρυφα στοιχεία (0.60 m, $3 \times \varnothing 16$ )	45	12	<b>57</b>
Επιρροή απόστασης από σημείο έγχυσης	οριζόντια στοιχεία (1.80 m, $9 \times \varnothing 16$ )	48	19	<b>67</b>
Επιρροή μετακίνησης ράβδων σε νωπό σκυρόδεμα (σε διάφορες στιγμές κατά την πήξη)	(σε ράβδους των οριζόντιων στοιχείων)	24	8	<b>32</b>
Επιρροή εφαρμογής υψηλών θερμοκρασιών (θερμοκρασίες έως 300, 650 και 900 °C)	κυβικά δοκίμια (ακμής 0.20 m, $1 \times \varnothing 16$ )	16	8	<b>24</b>



### 2.3.2.6. Αντοχή σε συνάφεια

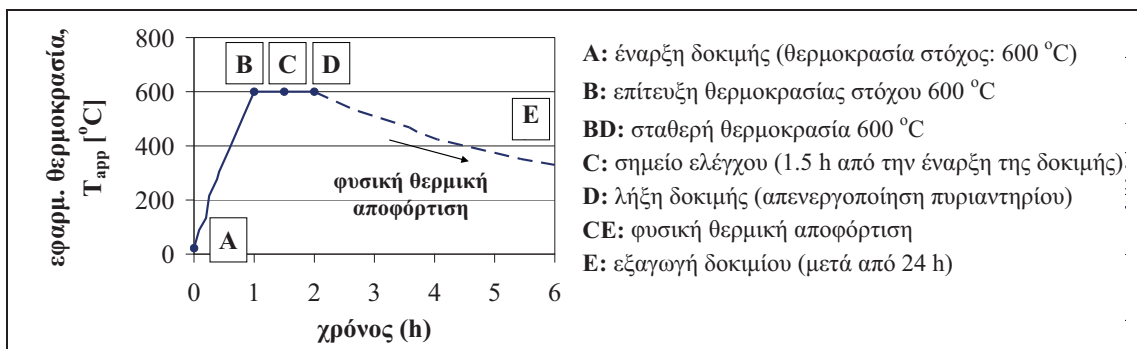
Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε συνάφεια και των λοιπών αντιπροσωπευτικών τάσεων,  $\tau$  (N/mm<sup>2</sup>), εφαρμόστηκαν δοκιμές εξόλκευσης, όπως περιγράφονται στο Παράρτημα D του προτύπου EN 10080 (2005). Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με διαφορετικές γεωμετρίες, ανάλογα με τον ερευνητικό σκοπό κάθε δοκιμής. Ο Πίνακας 61 περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των πειραμάτων σε θέματα συνάφειας. Η αναλυτική περιγραφή των εν λόγω πειραμάτων γίνεται σε ξεχωριστό κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3).

### 2.3.2.7. Θερμική συμπεριφορά<sup>15</sup>

Για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος εφαρμόστηκε μη πρότυπη δοκιμή σε κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm. Τα δοκίμια καταπονήθηκαν θερμικά σε πυριαντήριο υψηλών θερμοκρασιών και, με χρήση θερμοστοιχείων τύπου K ενσωματωμένων σε διαφορετικά βάθη στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος, καταγράφηκαν σε πραγματικό χρόνο οι εσωτερικές θερμοκρασίες σε διάφορα βάθη, δηλαδή η απόκριση του σκυροδέματος σε θερμική καταπόνηση.

#### Επιβαλλόμενη θερμοκρασία

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού για 180 ημέρες, ενώ στη συνέχεια ξηράθηκαν σε πυριαντήριο μέσω θερμοκρασιών σε θερμοκρασία 90 °C για την ήπια αποβολή της περιεχόμενης υγρασίας τους. Σε επόμενο στάδιο τα δοκίμια ξηράθηκαν σε πυριαντήριο υψηλών θερμοκρασιών σε θερμοκρασία έως 600 °C, σύμφωνα με τη θερμοκρασιακή καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 88. Συγκεκριμένα, κάθε δοκίμιο ξηράθηκε αρχικά για μία ώρα με στοχευόμενη θερμοκρασία τους 600 °C (κλάδος AB) με σταθερό ρυθμό αύξησης της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας του πυριαντηρίου περίπου 9 °C/min. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία του πυριαντηρίου παρέμεινε σταθερή για μία επιπλέον ώρα (κλάδος BCD), προτού το υπό ξήρανση δοκίμιο αφηθεί να επανέλθει φυσικά σε συνήθεις θερμοκρασίες, εντός του πυριαντηρίου (κλάδος DE).



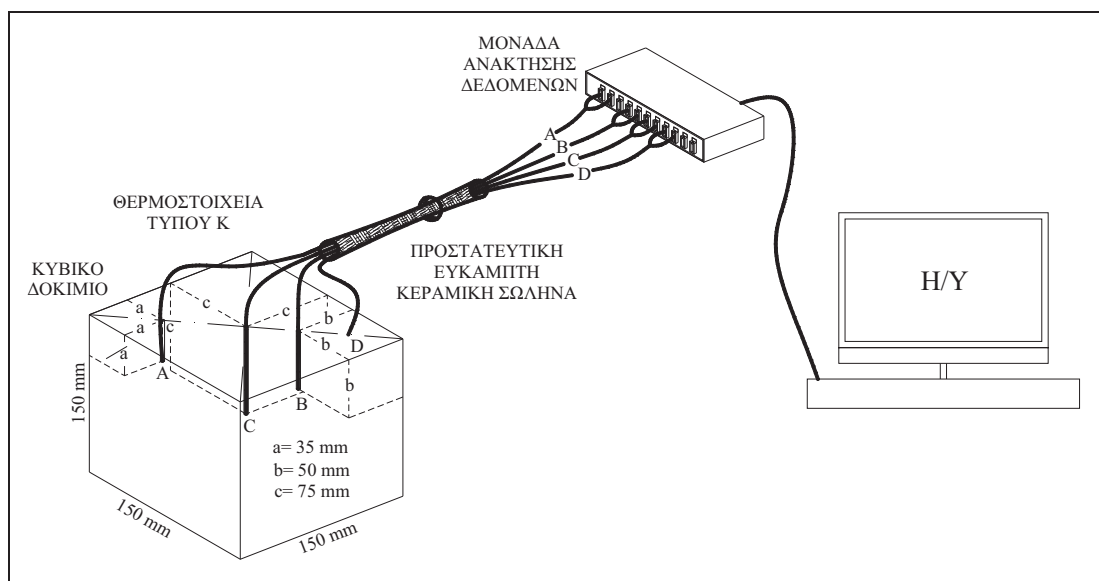
Σχήμα 88 Θερμοκρασιακή καμπύλη εφαρμοζόμενων θερμοκρασιών πυριαντηρίου

#### Καταγραφή εσωτερικών θερμοκρασιών

Πριν την ξήρανση των δοκιμίων είχε προηγηθεί διάνοιξη οπών διαμέτρου 6 mm σε τρία διαφορετικά βάθη κάθε δοκιμίου, ήτοι 35, 50 και 75 mm. Οι θέσεις των οπών επιλέχθηκαν καταλλήλως, ώστε το άκρο κάθε οπής εντός της μάζας του

<sup>15</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στο 5<sup>ο</sup> Συνέδριο για το ΑΣΣ (SCC2013): 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, Chicago, IL, USA, May 12–15 2013 [Badogiannis et al. (2013)].

σκυροδέματος να ισαπέχει από τις τρεις επιφάνειες του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 89**. Τρία θερμοστοιχεία τύπου K προσαρμόστηκαν στις ισάριθμες οπές, οι οποίες στη συνέχεια πληρώθηκαν με άμμο, και σταθεροποιήθηκαν με χρήση κεραμικής κόλλας. Ένα τέταρτο θερμοστοιχείο τύπου K σταθεροποιήθηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου (βάθος 0 mm) με χρήση κεραμικής κόλλας, για την καταγραφή της επιφανειακής θερμοκρασίας του σκυροδέματος. Τα τέσσερα θερμοστοιχεία τύπου K συνδέονταν με αναλογικό καταγραφικό σύστημα, μέσω του οποίου πραγματοποιούταν η μεταφορά των δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω κατάλληλου λογισμικού, οι θερμοκρασίες καταγράφονταν σε πραγματικό χρόνο, με ρυθμό έξι καταγραφών ανά λεπτό (μία καταγραφή ανά 10 s). Από την καταγραφή προέκυψαν καμπύλες ιστορίας θερμικής φόρτισης για κάθε βάθος και κάθε δοκίμιο.



**Σχήμα 89** Πειραματική διάταξη καταγραφής εσωτερικών θερμοκρασιών κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος

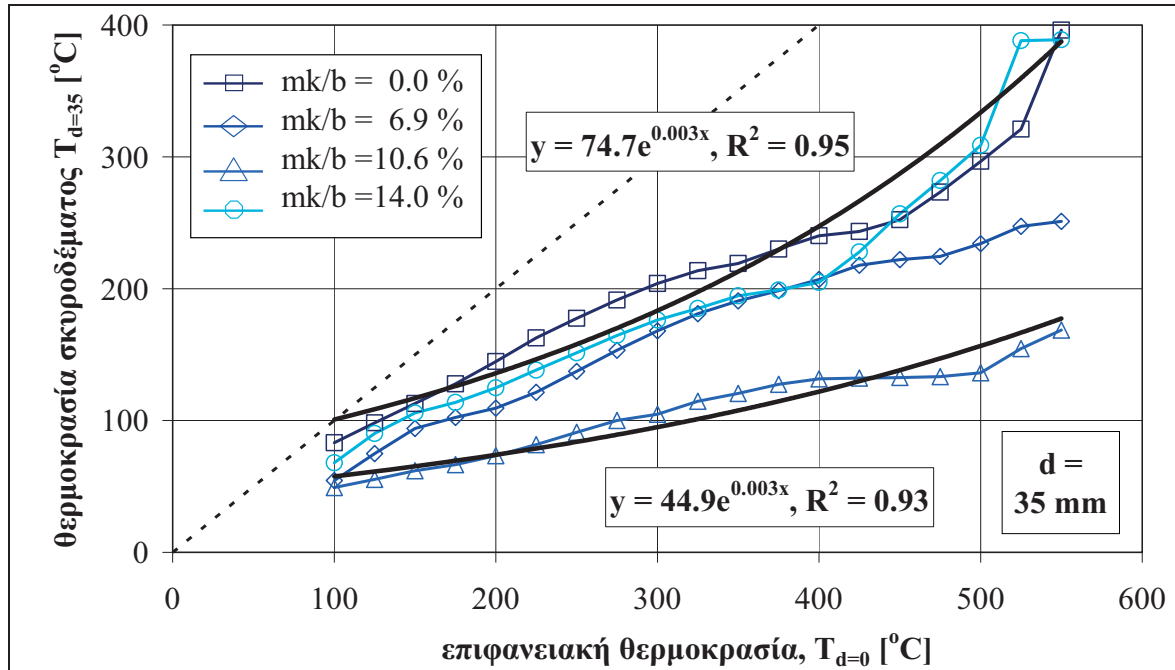
### Διαχείριση αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, διερευνήθηκαν συγκριτικά τρεις χαρακτηριστικές θέσεις επί των καμπυλών ιστορίας θερμικής φόρτισης μεταξύ των διαφορετικών μιγμάτων σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν συγκριτικά (**Σχήμα 88**) οι θερμοκρασίες κατά τη χρονική στιγμή επίτευξης της στοχευόμενης θερμοκρασίας των 600 °C (σημείο B), στο μέσο του διαστήματος σταθερής θερμοκρασίας (σημείο C) και στο πέρας της επιβαλλόμενης θερμικής καταπόνησης (σημείο D).

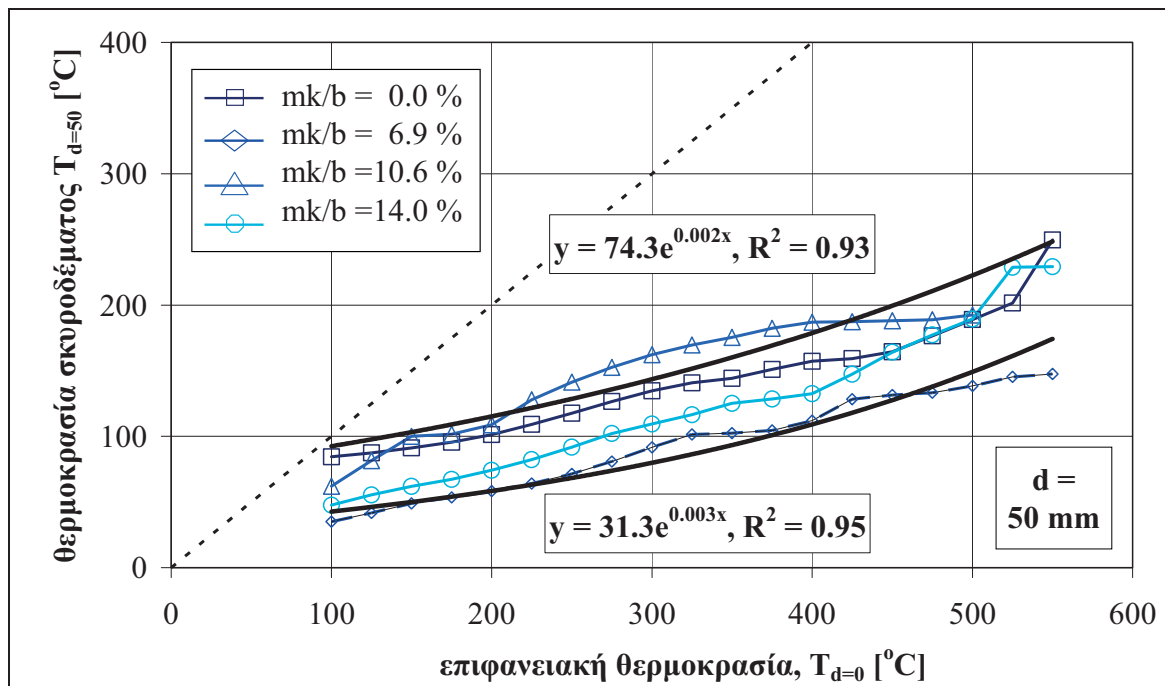
### Ανάπτυξη θερμοκρασίας

Στα **Σχήματα** που ακολουθούν παρουσιάζεται η ανάπτυξη της θερμοκρασίας του σκυροδέματος στα τρία εξεταζόμενα βάθη, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας του σκυροδέματος, για όλες τις συνθέσεις με ενσωμάτωση μετακαολίνη ως ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (**Σχήμα 90** έως **Σχήμα 92**) ή του ασβεστολιθικού φίλερ (**Σχήμα 93** έως **Σχήμα 95**). Από την παλινδρόμηση μεταξύ των καταγραμμένων θερμοκρασιών, για κάθε σύνθεση και βάθος θερμοστοιχείου, παρατηρείται ότι η ανάπτυξη της θερμοκρασίας ακολουθεί εκθετική συνάρτηση, με ιδιαίτερα υψηλούς συντελεστές συσχέτισης ( $R^2 > 0.85$ ). Στα **Σχήματα** παρουσιάζονται

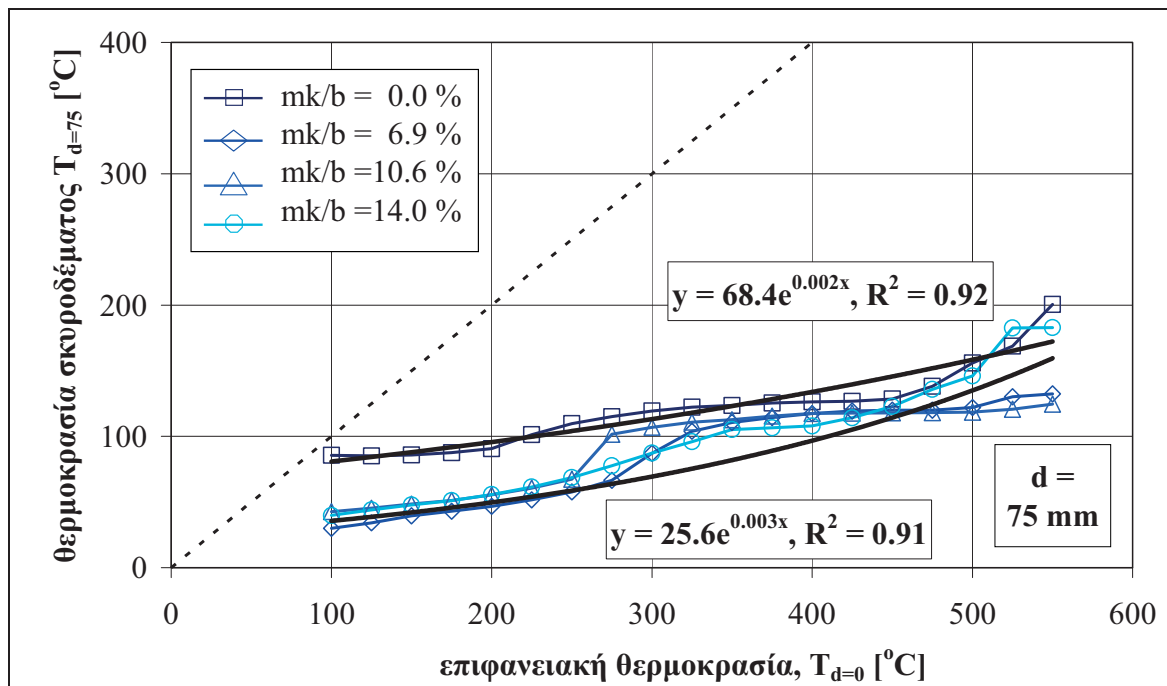
οι συναρτήσεις των οριακών καμπυλών, εντός των οποίων κινήθηκαν οι θερμοκρασίες του σκυροδέματος. Οι εν λόγω καμπύλες προέκυψαν από τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας,  $T_d$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), όπου  $d = 35, 50$  ή  $75$  mm, που αντιστοιχούν σε κάθε επιφανειακή θερμοκρασία,  $T_{d=0}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), για το κάτω και το άνω όριο, αντιστοίχως. Μελετώντας τον τρόπο ανάπτυξης της εσωτερικής θερμοκρασίας, για κάθε εξεταζόμενο βάθος και υπο-ομάδα συνθέσεων, δεν παρατηρείται κάποια συστηματική επιρροή των λόγων  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$  στη θερμική απόκριση του σκυροδέματος.



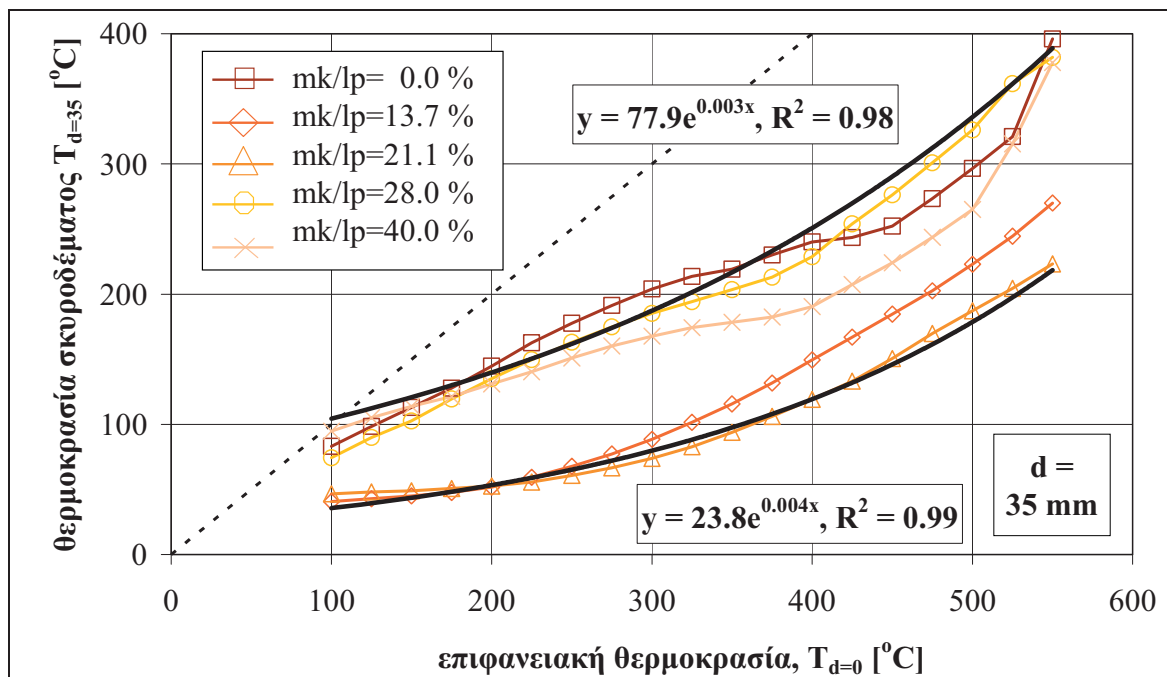
Σχήμα 90 Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 35 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (μεταβλητός λόγος  $mk/b$ )



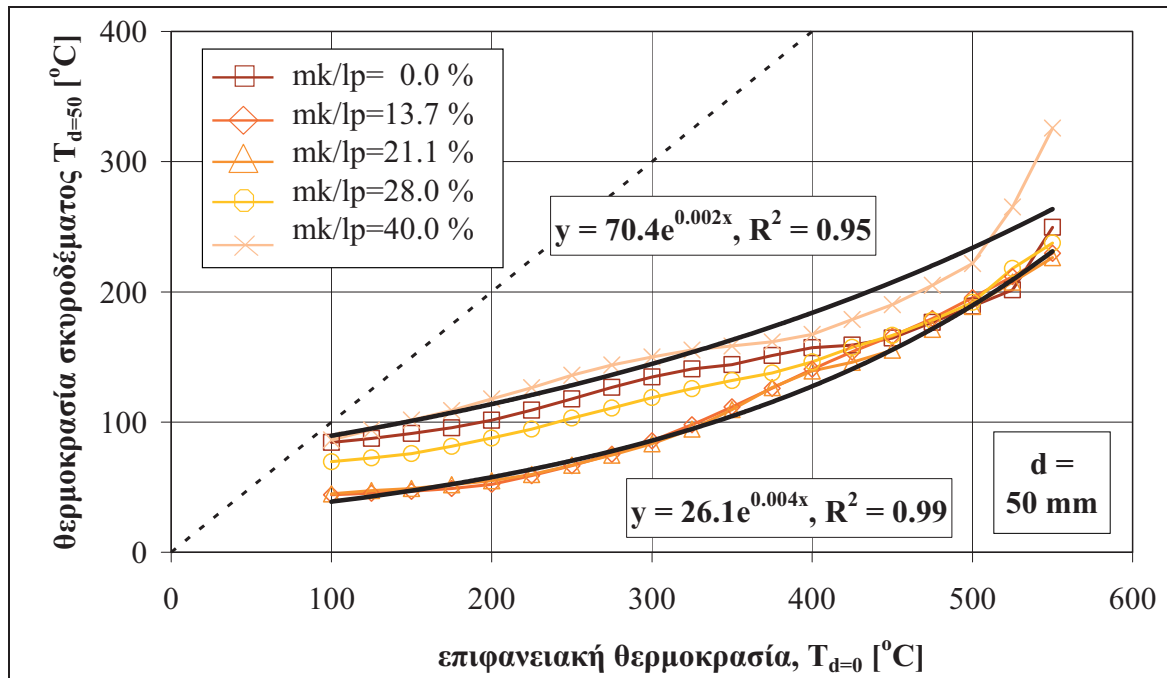
Σχήμα 91 Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 50 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (μεταβλητός λόγος  $mk/b$ )



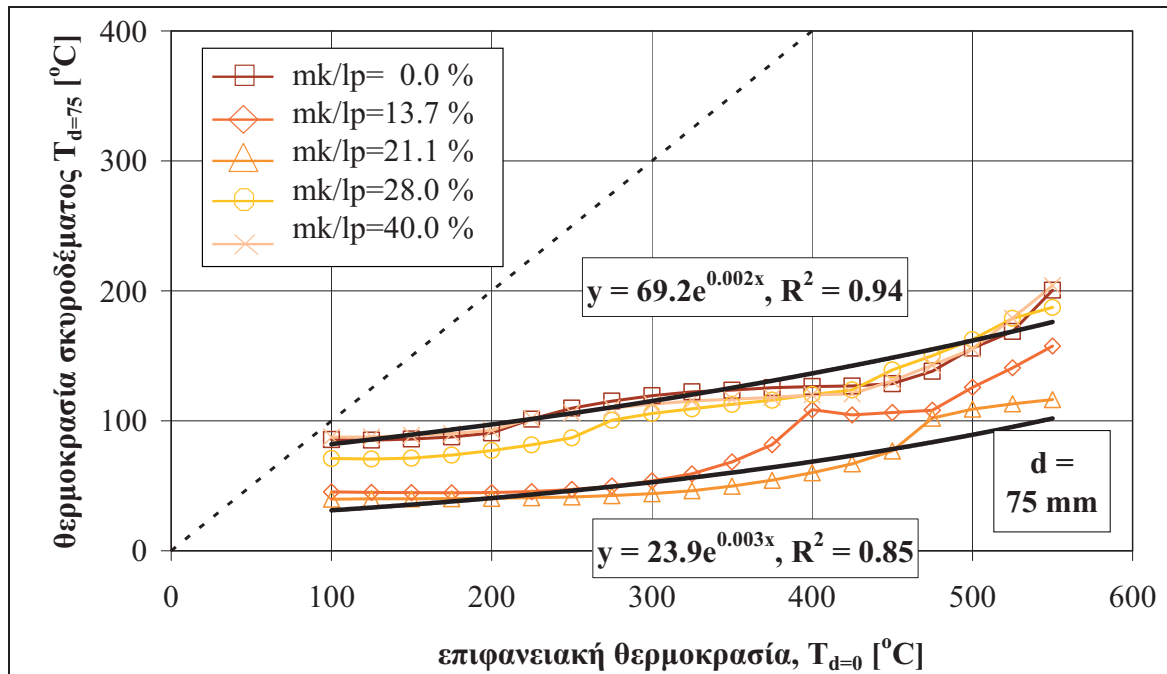
Σχήμα 92 Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 75 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Γ (μεταβλητός λόγος  $mk/b$ )



Σχήμα 93 Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 35 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (μεταβλητός λόγος  $mk/\{mk+lp\}$ )



Σχήμα 94 Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 50 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (μεταβλητός λόγος  $mk/\{mk+lp\}$ )



Σχήμα 95 Θερμοκρασία σκυροδέματος σε βάθος 75 mm συναρτήσει της επιφανειακής θερμοκρασίας για τις διάφορες συνθέσεις της υπο-ομάδας Δ (μεταβλητός λόγος  $mk/\{mk+lp\}$ )

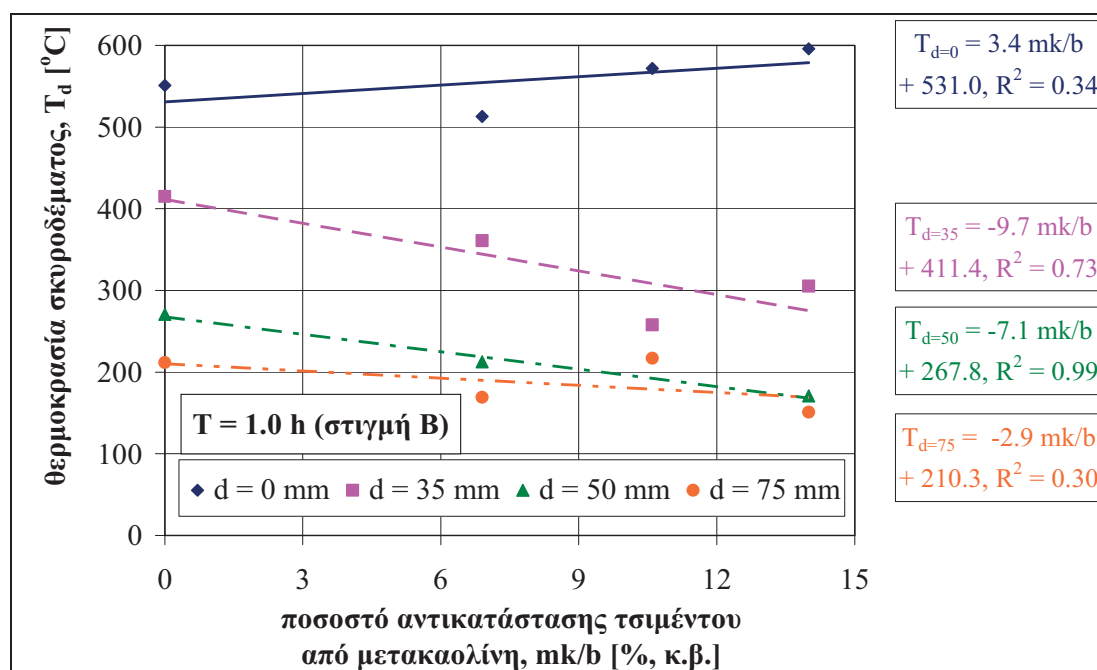
## Επιρροή σύνθεσης

Στα Σχήματα που ακολουθούν, μελετάται η επιρροή της σύνθεσης στην απόκριση του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, μέσω των καταγραφών των τριών θερμοστοιχείων, εξετάζεται η εσωτερική θερμοκρασία του σκυροδέματος σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές:

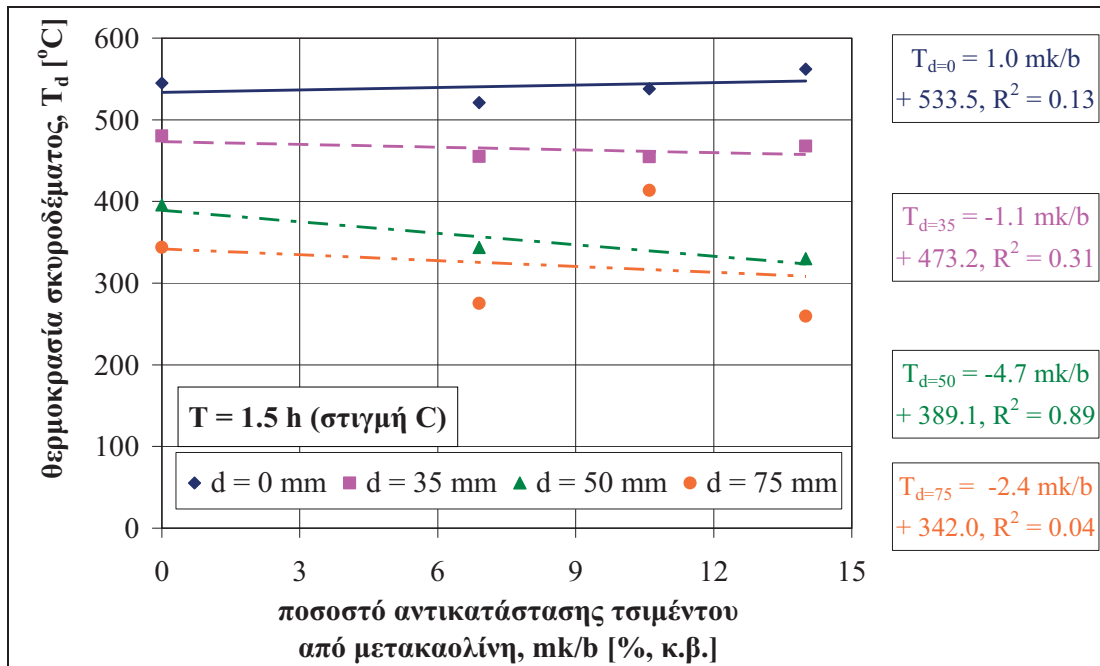
- (α) τη χρονική στιγμή επίτευξης της θερμοκρασίας-στόχου εντός του πυριαντηρίου (χρονική στιγμή B, Σχήμα 88),
- (β) το μέσο του χρονικού διαστήματος σταθερής θερμοκρασίας 600 °C εντός του πυριαντηρίου (χρονική στιγμή C, Σχήμα 88) και
- (γ) το πέρας του ωριαίου χρονικού διαστήματος σταθερής θερμοκρασίας 600 °C εντός του πυριαντηρίου (χρονική στιγμή D, Σχήμα 88).

Η μέθοδος ενσωμάτωσης του μετακαολίνη στο μίγμα εξετάζεται σε ξεχωριστά διαγράμματα και, συγκεκριμένα, για χρήση του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου (Σχήμα 96 έως Σχήμα 98) ή του ασβεστολιθικού φίλερ (Σχήμα 99 έως Σχήμα 101).

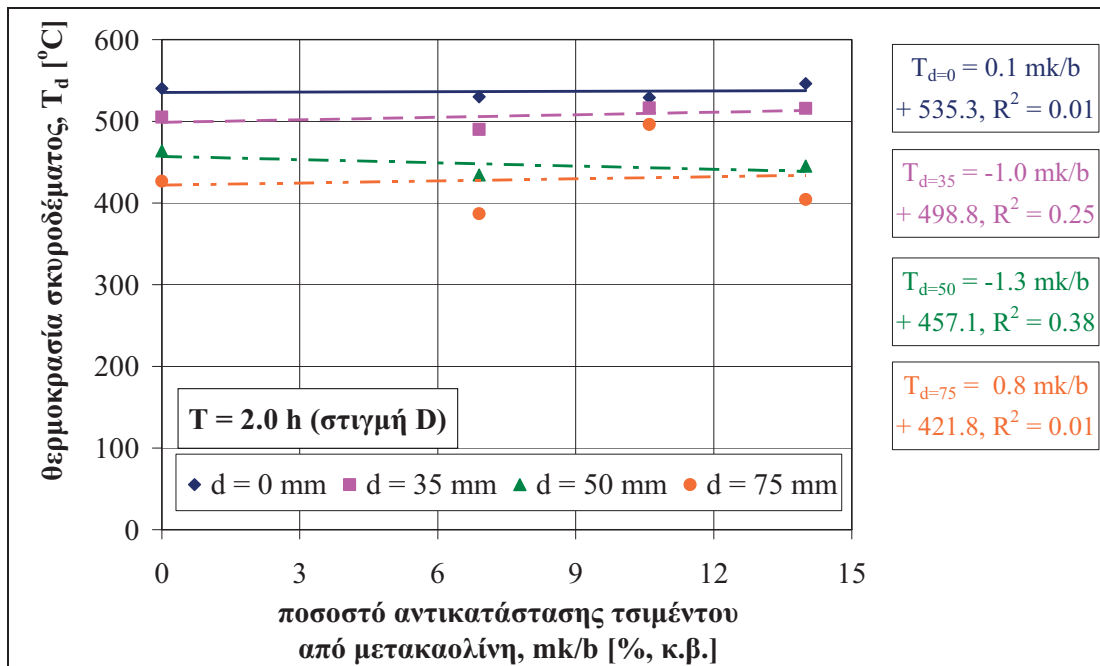
*Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου* – Για την εξεταζόμενη θερμοκρασία-στόχο του πυριαντηρίου (600 °C), φαίνεται ότι υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη οδηγούν, γενικώς, σε υψηλότερη θερμική μόνωση του σκυροδέματος, για τα τρία εξεταζόμενα βάθη. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να εξετασθεί υπό το πρίσμα της θερμικής αγωγιμότητας του μετακαολίνη εν συγκρίσει με τη θερμική αγωγιμότητα του αντικατασταθέντος τσιμέντου.



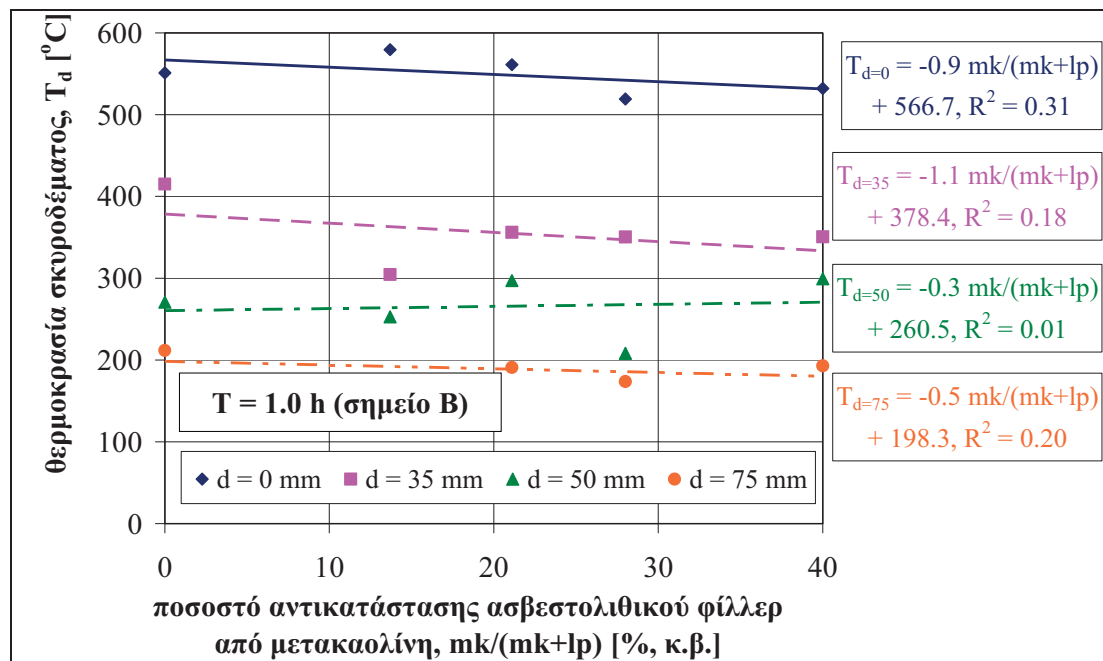
Σχήμα 96 Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης  $mk/b$  κατά τη χρονική στιγμή B (επίτευξη θερμοκρασίας-στόχου πυριαντηρίου)



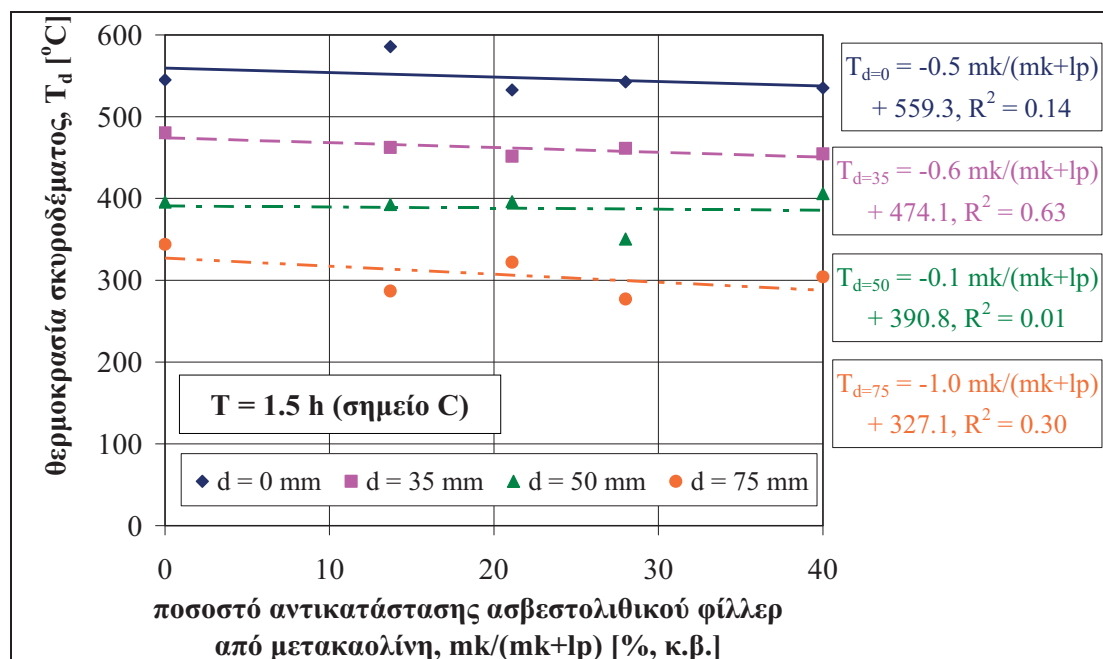
Σχήμα 97 Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης *mk/b* κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 30 min)



Σχήμα 98 Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης *mk/b* κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 60 min)

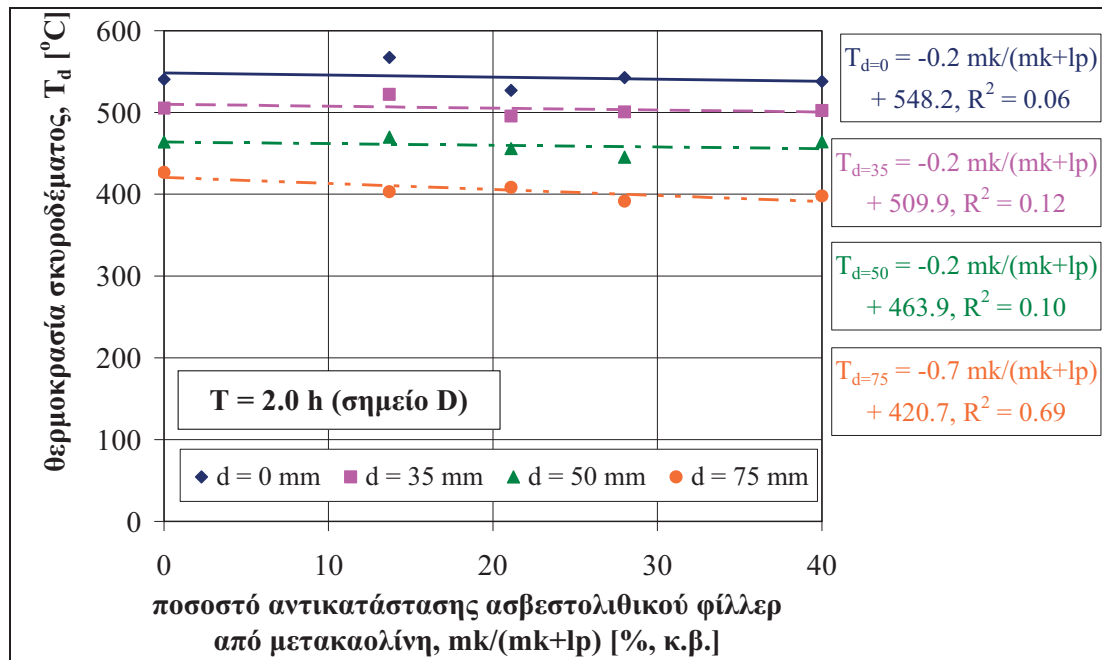


Σχήμα 99 Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης  $mk/(mk+lp)$  κατά τη χρονική στιγμή B (επίτευξη θερμοκρασίας-στόχου πυριαντηρίου)



Σχήμα 100 Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης  $mk/(mk+lp)$  κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία 600 °C για 30 min)





Σχήμα 101 Θερμοκρασία σκυροδέματος συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης  $\text{mk}/(\text{mk}+\text{lp})$  κατά τη χρονική στιγμή C (παραμονή σε σταθερή θερμοκρασία  $600^{\circ}\text{C}$  για  $60\text{ min}$ )

Σε κάθε εξεταζόμενο βάθος οι θερμοκρασίες συσχετίζονται γραμμικά με το ποσοστό αντικατάστασης, με ικανοποιητικούς ή υψηλούς συντελεστές συσχέτισης (Σχήμα 96). Μετά από παραμονή του σκυροδέματος υπό σταθερή υψηλή θερμοκρασία για  $30\text{ min}$ , η εσωτερική θερμοκρασία σε βάθος  $d = 35\text{ mm}$  φαίνεται να μην εξαρτάται πλέον από το ποσοστό αντικατάστασης, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δύο βάθη,  $d = 50$  και  $75\text{ mm}$  (Σχήμα 97). Με την πάροδο του χρόνου και έως τα  $60\text{ min}$ , οι εσωτερικές θερμοκρασίες ανεξαρτητοποιούνται από το ποσοστό αντικατάστασης σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη, ενώ τείνουν να συγκλίνουν με την επιφανειακή θερμοκρασία του σκυροδέματος (Σχήμα 98).

*Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλλερ* – Για την εξεταζόμενη θερμοκρασία-στόχο του πυριαντηρίου ( $600^{\circ}\text{C}$ ), φαίνεται ότι το ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλλερ από μετακαολίνη δεν είναι τόσο σημαντικό για τη θερμική απόκριση του σκυροδέματος. Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και η θερμοκρασία παραμένει πρακτικώς σταθερή μεταξύ των διαφορετικών μιγμάτων, παρατηρείται μία, έστω και εξαιρετικά περιορισμένη, αύξηση της θερμικής μόνωσης του σκυροδέματος με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης, για τα τρία εξεταζόμενα βάθη. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να εξετασθεί υπό το πρίσμα της θερμικής αγωγιμότητας του μετακαολίνη εν συγκρίσει με τη θερμική αγωγιμότητα του αντικατασταθέντος ασβεστολιθικού φίλλερ.

### 2.3.3. Δοκιμές ανθεκτικότητας σκληρυμένου σκυροδέματος

Για λόγους πληρότητας, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι πλέον των μηχανικών χαρακτηριστικών, στο σκληρυμένο σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκαν μέρος ή το σύνολο των δοκιμών που ακολουθούν και αφορούν στην εκτίμηση των ιδιοτήτων ανθεκτικότητας. Σημειώνεται ότι οι ιδιότητες αυτές θα αναπτυχθούν σε ξεχωριστό κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4). Ο Πίνακας 62 συνοψίζει το είδος και το πλήθος των δοκιμών που αφορούν στις ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος, οι οποίες διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής.

**Πίνακας 62** Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών ιδιοτήτων ανθεκτικότητας

περιγραφή δοκιμής	πρότυπη μέθοδος	μετρούμενο μέγεθος	Πλήθος ελεγχθέντων μιγμάτων (και δοκιμών)			
			ΑΣΣ	ΣΣ	Συν.	
υδατο- περατότητα	ανοιχτό	ASTM	26	8	<b>34</b>	
	πορώδες	C 642 (1997)	(35)	(10)	<b>(45)</b>	
	απορροφη- τικότητα	RILEM TC 116-PCD (1999)	44 (101)	16 (44)	<b>60 (145)</b>	
	υπό μεταβαλ- λόμενη πίεση	GWT-4000 (1999)	$\ln T_{atm}$ ( $T_{atm}$ σε s)	31 (183)	12 (78)	<b>43 (261)</b>
	υπό σταθερή πίεση	DIN 1048-5 (1991) EN 12390-8 (2009)	$d$ (mm)	9 (9)	2 (2)	<b>11 (11)</b>
	διαπερατότητα σε χλωριόντα	επιταχυνόμενη άμεση μέθοδος	NordTest Build 492 (1999)	$D$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	46 (106)	18 (46)
	επιταχυνόμενη έμμεση μέθοδος*	ASTM C 1202 (2009)	$\rho$ (k $\Omega$ -cm)	6 (6)	2 (2)	<b>8 (8)</b>

\*σε συνεργασία με το Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ)

# 3

---

## Συμπεριφορά σε Συνάφεια

### Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης ΑΣΣ στη συμπεριφορά σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού.

Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή (α) του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ (β) του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, μέσω του λόγου πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ και (γ) της περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή, μέσω του λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε τυπικά μίγματα ΣΣ σε θέματα συνάφειας.

Τα θέματα συνάφειας που εξετάζονται αφορούν (i) στην εκτίμηση της συμπεριφοράς σε συνάφεια, μέσω δοκιμών εξόλκευσης σε πρότυπα κυβικά δοκίμια, (ii) στην ένταση του φαινομένου άνω οπλισμών, (iii) στην επιρροή της απόστασης της εξεταζόμενης ράβδου από το σημείο έγχυσης στη συνάφεια, (iv) στην επιρροή του πάχους του υποκείμενου και του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια, (v) στην επιρροή σχετικών μετακινήσεων μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού κατά τη διάρκεια της πήξης στη συνάφεια και (vi) στην επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια. Τέλος, εξετάζεται (vii) η αναπαραγωγιμότητα παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, με κριτήριο την συμπεριφορά σε συνάφεια.

Όσο αφορά στη δομή του Κεφαλαίου, μετά από μία σύντομη εισαγωγή, περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις και η μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί αναλυτική παράθεση και σχολιασμός των πειραματικών αποτελεσμάτων.

### 3.1. Εισαγωγή

#### 3.1.1. Σκοπός κεφαλαίου

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο Κεφάλαιο, η προγενέστερη βιβλιογραφία επί θεμάτων που αφορούν στην επιρροή των χαρακτηριστικών σύνθεσης ΑΣΣ στα χαρακτηριστικά συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού, είναι αρκετά περιορισμένη και ελλιπώς τεκμηριωμένη. Η παρούσα Διατριβή έρχεται να συμπληρώσει τα διαθέσιμα πειραματικά ευρήματα στα βασικά, αλλά και σε πιο εξειδικευμένα, θέματα συνάφειας, να συγκρίνει τη συμπεριφορά του ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ, αλλά και να σχολιάσει διαφορετικές πτυχές της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που αφορούν στις δοκιμές εξόλκευσης, ανεξαρτήτως τύπου σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επιρροή ( $\alpha$ ) στη συνάφεια μιγμάτων ΑΣΣ ( $\alpha_1$ ) του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ) και ( $\alpha_2$ ) του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη μέσω του λόγου πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό ( $sf/b$ ), και ( $\beta$ ) στη συνάφεια μιγμάτων ΣΣ της περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή μέσω του λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ ). Τα θέματα συνάφειας που διερευνώνται περιλαμβάνουν:

- (i) τη μελέτη της γενικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε συνάφεια με τις ράβδους οπλισμού,
- (ii) την αξιολόγηση της έντασης του φαινομένου άνω οπλισμών (top-bar effect),
- (iii) τη διερεύνηση της μεταβολής της συνάφειας συναρτήσει της απόστασης της εξεταζόμενης ράβδου από το σημείο έγχυσης,
- (iv) την επιρροή αθέλητων σχετικών μετακινήσεων σκυροδέματος – ράβδων οπλισμού σε νωπό σκυρόδεμα,
- (v) την επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια,
- (vi) τη δυνατότητα αναπαραγωγής μιγμάτων μεταξύ εργαστηρίων που συμμορφώνονται στα ευρωπαϊκά πρότυπα, με κριτήριο τη συνάφεια.

#### 3.1.2. Περιγραφή μιγμάτων και δοκιμών

Συνολικά, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, πραγματοποιήθηκαν 330 δοκιμές εξόλκευσης σε κυβικά δοκίμια και σε κατακόρυφα ή οριζόντια δοκίμια ορθογωνικής διατομής, παρασκευασμένα από ΑΣΣ και ΣΣ. Ο Πίνακας 63 περιλαμβάνει μια συνοπτική παρουσίαση των μιγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή δοκιμών προς έλεγχο ως προς τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού. Οι επόμενοι Πίνακες (Πίνακας 64 έως Πίνακας 68) περιγράφουν συνοπτικά τους τύπους δοκιμών που παρασκευάστηκαν για συγκεκριμένες υπο-ομάδες συνθέσεων (Πίνακες 37 έως 46), ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών σύνθεσης στα επιμέρους θέματα συνάφειας.

Σημειώνεται ότι στο Κεφάλαιο αυτό, με σκοπό ένα γενικότερο σχολιασμό θεμάτων που αφορούν στη συνάφεια, παρουσιάζονται και αποτελέσματα δοκιμών από μίγματα, τα οποία παρασκευάστηκαν, μεταβάλλοντας τις αναλογίες πολλών συστατικών της σύνθεσης ταυτόχρονα και, για τον λόγο αυτόν, δεν κατατάχθηκαν σε κάποια υπο-ομάδα συνθέσεων και δεν είναι απολύτως συγκρίσιμα μεταξύ τους.

**Πίνακας 63** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων που ελέγχθηκαν ως προς τη συνάφεια με τον χάλυβα

τύπος σκυροδέματος τύπος δοκιμίου	μίγματα ΑΣΣ				μίγματα ΣΣ			
	κυβικά	κατακόρυφο		οριζόντιο	κυβικά	κατακόρυφο		οριζόντιο
		υψηλό $H=$ 1800 mm	χαμηλό $H=$ 600 mm			υψηλό $H=$ 1800 mm	χαμηλό $H=$ 600 mm	
<b>πλήθος ράβδων</b>	3 (ή *5)	9	3	9	3 (ή *5)	9	3	9
<b>κωδικοί συνθέσεων</b>	SCC16	SCC05	SCC16	SCC26	NVC08	NVC02	NVC08	NVC11
	SCC17	SCC06	SCC17	SCC27	NVC11*	NVC04	NVC11	NVC13
	SCC18	SCC07	SCC18	SCC28	NVC12*		NVC13	NVC14
	SCC19	SCC08	SCC19	SCC29	NVC13*		NVC14	
	SCC26	SCC10	SCC26	SCC31	NVC14*			
	SCC27	SCC11	SCC27	SCC32				
	SCC28*	SCC12	SCC28	SCC34				
	SCC29*	SCC13	SCC29	SCC36				
	SCC30*		SCC30					
	SCC31*		SCC31					
	SCC32		SCC32					
	SCC33*		SCC33					
	SCC34*		SCC34					
	SCC35*		SCC35					
	SCC36*		SCC36					
<b>πλήθος συνθέσεων</b>	15	8	15	8	5	2	4	3
<b>πλήθος δοκιμών</b>	61	72	45	72	23	18	12	27

**Πίνακας 64** Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας  
(υπο-ομάδα συνθέσεων Α, Πίν. 37, συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ )

τύπος δοκιμίων	σκοπός δοκιμών	κωδικός σύνθεσης				
		SCC	SCC	SCC	SCC	SCC
		WB1	WB2	WB3	WB4	WB5
		SCC29	SCC27	SCC26	SCC28	SCC31
κυβικά	χαρακτηριστικά συνάφειας	●	●	●	●	●
	επιρροή υψηλών θερμοκρασιών	●	×	×	●	●
κατακόρυφα	επιρροή θέσης ράβδου καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)	●	●	●	●	●
	επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος	●	●	●	●	●
οριζόντια	επιρροή απόστασης από σημείο έγχυσης	●	●	●	●	●
	επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη σκυροδέματος	●	●	×	×	●

**Πίνακας 65** Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας  
(υπο-ομάδα συνθέσεων Β1, Πίν. 38, συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ )

τύπος δοκιμίων	σκοπός δοκιμών	κωδικός σύνθεσης						
		SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC
		SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7
		SCC26	SCC34	SCC30	SCC35	SCC32	SCC33	SCC36
κυβικά	χαρακτηριστικά συνάφειας	●	●	●	●	●	●	●
	επιρροή υψηλών θερμοκρασιών	×	●	●	●	×	●	●
κατακόρυφα	επιρροή θέσης ράβδου καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)	●	●	●	●	●	●	●
	επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος	●	●	●	●	●	●	●
οριζόντια	επιρροή απόστασης από σημείο έγχυσης	●	●	×	×	●	×	●
	επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη σκυροδέματος	×	●	×	×	●	×	●

**Πίνακας 66** Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (υπο-ομάδα συνθέσεων B2, Πίν. 39, συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου *sf/b*)

τύπος δοκιμίων	σκοπός δοκιμών	κωδικός σύνθεσης				
		SCC	SCC	SCC	SCC	NVC
		SF7	SF8	SF9	SF10	SF
		SCC16	SCC17	SCC18	SCC19	NVC08
κυβικά	χαρακτηριστικά συνάφειας	•	•	•	•	•
κατακόρυφα	επιρροή θέσης ράβδου καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)	•	•	•	•	•

**Πίνακας 67** Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (υπο-ομάδα συνθέσεων E, Πίν. 42, συνθέσεις ΣΣ μεταβλητού λόγου *pce/b*)

τύπος δοκιμίων	σκοπός δοκιμών	κωδικός σύνθεσης			
		NVC	NVC	NVC	NVC
		000	013	025	050
		NVC11	NVC13	NVC12	NVC14
κυβικά	χαρακτηριστικά συνάφειας	•	•	•	•
κατακόρυφα	επιρροή υψηλών θερμοκρασιών	•	•	•	•
	επιρροή θέσης ράβδου καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)	•	•	×	•
οριζόντια	επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος	•	•	×	•
	επιρροή απόστασης από σημείο έγχυσης	•	•	×	•
	επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πύξη σκυροδέματος	×	•	×	•

**Πίνακας 68** Συνοπτική περιγραφή πραγματοποιηθεισών δοκιμών συνάφειας (επιλεγμένα μίγματα από υπο-ομάδες συνθέσεων B1 και H2, Πίν. 38 και 46, αντίστοιχα)

τύπος δοκιμίων	σκοπός δοκιμών	κωδικός σύνθεσης*			
		SCCSF1	SCCSF2	SCCSF4	SCCSF7
		SCC26	SCC34	SCC35	SCC36
κυβικά	διεργαστηριακή αναπαραγωγισιμότητα	•	•	•	•

\*οι συνθέσεις αφορούν μίγματα που παρασκευάστηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ (Πίν. 38, Κεφ. 2). Τα αντίστοιχα μίγματα που παρασκευάστηκαν στο ΕΔΥ/ΠΚ ήταν τα UCY-SCCWB2, UCY-SCCSF1, UCY-SCCSF2 και UCY-SCCSF3 (Πίν. 46, Κεφ. 2)

## 3.2. Περιγραφή πειραματικών δοκιμών

### 3.2.1. Περιγραφή δοκιμών

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, με σκοπό τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, παρασκευάστηκαν τέσσερις τύποι δοκιμών, όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 102**:

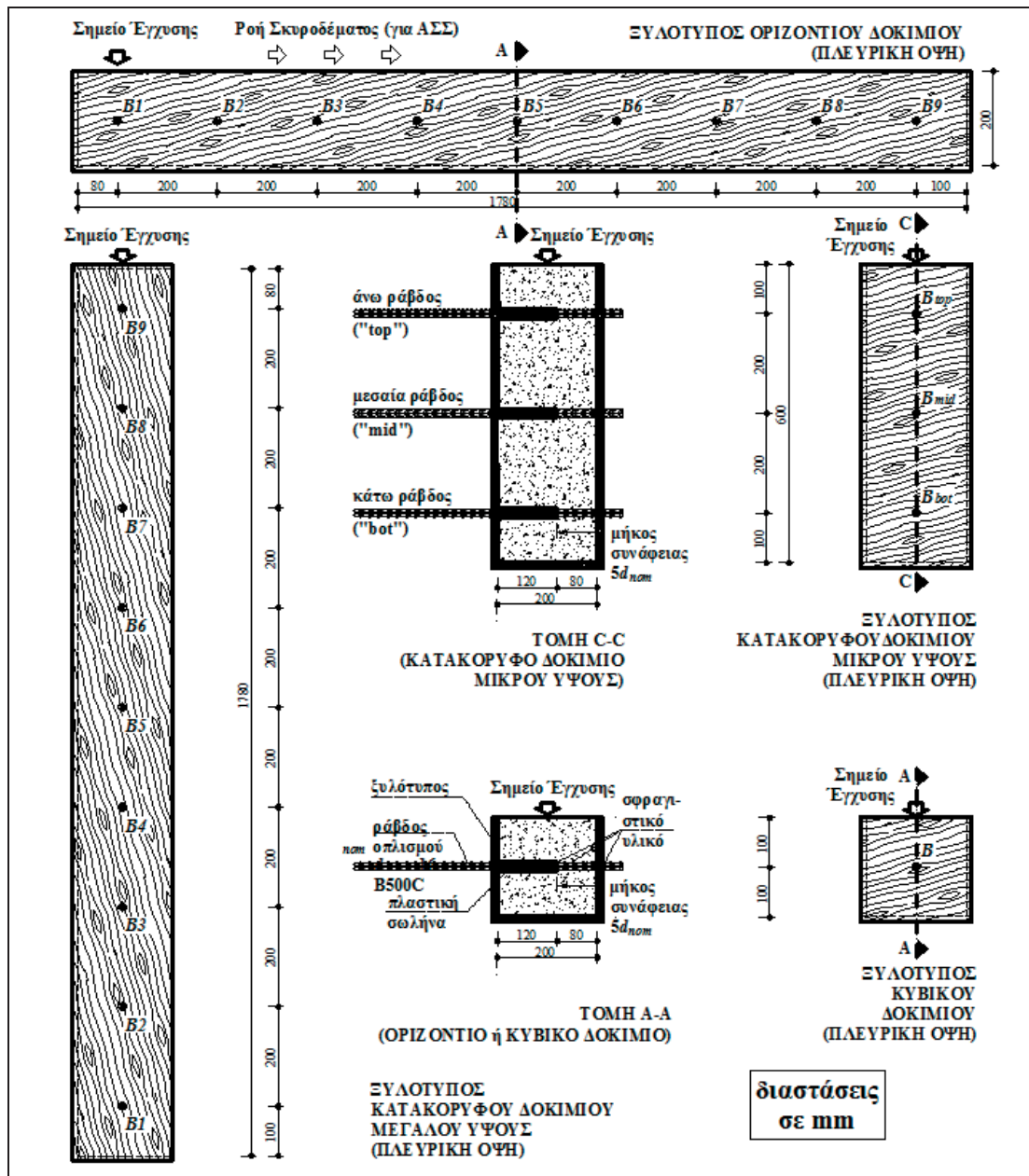
- (α) **κυβικά δοκίμια** (τρία ή πέντε δοκίμια ανά σύνθεση, Σχήμα 102α) ακμής 200 mm με μία κεντρικά εγκιβωτισμένη εγκάρσια ράβδο οπλισμού διαμέτρου Ø16, από νευροχάλυβα κατηγορίας B500C,
- (β) **οριζόντια δοκίμια** (ένα δοκίμιο ανά σύνθεση, Σχήμα 102β) διατομής 200 × 200 mm και μήκους 1780 mm με εννέα εγκιβωτισμένες εγκάρσιες ράβδους οπλισμού διαμέτρου Ø16, από νευροχάλυβα κατηγορίας B500C, κατανεμημένες κατά μήκος (ανά 200 mm, αρχής γενομένης από απόσταση 80 mm από το άκρο, όπου πραγματοποιούταν η έγχυση του μίγματος για τα δοκίμια ΑΣΣ),
- (γ) **κατακόρυφα δοκίμια** (ένα δοκίμιο ανά σύνθεση, Σχήμα 102γ) διατομής 200 × 200 mm και ύψους 1800 mm με εννέα εγκιβωτισμένες εγκάρσιες ράβδους

οπλισμού διαμέτρου  $\varnothing 16$ , από νευροχάλυβα κατηγορίας B500C, κατανεμημένες καθ' ύψος (ανά 200 mm, αρχής γενομένης από απόσταση 100 mm από τη βάση)

- (δ) **κατακόρυφα δοκίμια** (ένα δοκίμιο ανά σύνθεση, Σχήμα 102δ) διατομής  $200 \times 200$  mm και ύψους 600 mm με τρεις εγκιβωτισμένες εγκάρσιες ράβδους οπλισμού διαμέτρου  $\varnothing 16$ , από νευροχάλυβα κατηγορίας B500C, κατανεμημένες καθ' ύψος (ανά 200 mm, αρχής γενομένης από απόσταση 100 mm από τη βάση)



**Σχήμα 102** Ξυλότυποι (α) κυβικών δοκιμίων, (β) οριζόντιου δοκιμίου, (γ) κατακόρυφου δοκιμίου μεγάλου ύψους και (δ) κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους



Σχήμα 103 Διαστάσεις και διατάξεις δοκιμίων συνάφειας

Οι διαστάσεις και η διάταξη των δοκιμίων παρουσιάζονται αναλυτικά στο Σχήμα 103. Συγκεκριμένα, σε όλα τα δοκίμια και στις προκαθορισμένες θέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, εγκιβωτίζονταν οριζόντιες εγκάρσιες ράβδοι οπλισμού από νευροχάλυβα κατηγορίας B500C, ονομαστικής διαμέτρου  $d_{nom} = 16$  mm (Παρ. 2.2.1.6, Κεφ.2). Η φορά της σκυροδέτησης ήταν πάντοτε κάθετη στον προσανατολισμό των ράβδων. Σε κάθε θέση οπλισμού, η ράβδος επεκτεινόταν πέραν των δύο αντίθετων πλευρών του δοκιμίου, ώστε στη συνέχεια να μπορούν να τοποθετηθούν οι κατάλληλες διατάξεις για την εκτέλεση των δοκιμών. Το απαιτούμενο ενεργό μήκος συνάφειας των 80 mm ( $5 \times d_{nom}$ ) επετεύχθη μέσω της τοποθέτησης δύσκαμπτης πλαστικής σωλήνας μήκους 120 mm γύρω από το απομένον τμήμα της ράβδου εντός του δοκιμίου. Η ανοχή των σωλήνων γύρω από τις ράβδους ανερχόταν σε περίπου 1 mm, ενώ το πάχος τους δεν ξεπερνούσε το 1 mm. Οι πλαστικές ράβδοι προσαρμόζονταν στις επιθυμητές θέσεις και σφραγίζονταν με

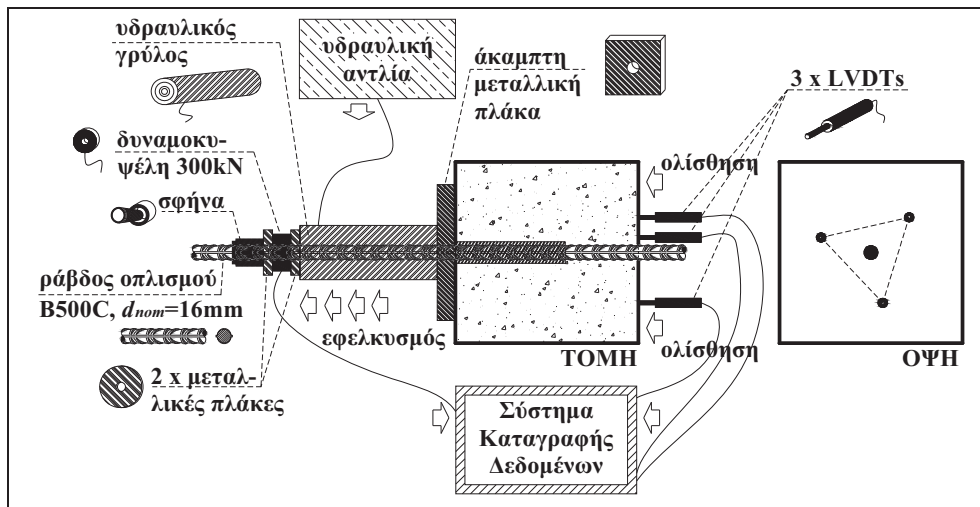


κατάλληλο σφραγιστικό υλικό (πλαστελίνη), έτσι ώστε να αποφευχθεί η εισροή της τσιμεντόπαστας.

Η παρασκευή των δοκιμίων που αφορούν στη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές είτε των Ευρωπαϊκών Οδηγιών για το ΑΣΣ [EFNARC (2005)] ή των Ευρωπαϊκών Προτύπων EN 12390-2 (2009) και EN 13670 (2009) για το ΣΣ. Ειδικότερα, τα δοκίμια ΑΣΣ παρασκευάστηκαν με συνεχή σκυροδέτηση, χωρίς μηχανική συμπύκνωση, ενώ τα δοκίμια ΣΣ πληρώθηκαν σε δύο ή τρεις, κατά περίπτωση, στρώσεις, καθεμία εκ των οποίων ακολουθείτο από επαρκή δόνηση με χρήση μηχανικού δονητή μάζας. Μετά τη σκυροδέτησή τους, όλα τα δοκίμια παρέμεναν σε ηρεμία για περίπου 18 έως 24 ώρες και, κατόπιν της αποσυναρμολόγησης των ξυλότυπων, διατηρούνταν σε συνήθεις συνθήκες (περιβάλλον εργαστηρίου) μέχρι την ηλικία ελέγχου (28 ημέρες).

### 3.2.2. Πρότυπη δοκιμή εξόλκευσης

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών συνάφειας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή εξόλκευσης, όπως αυτή περιγράφεται στο Παράρτημα D του σχετικού ευρωπαϊκού προτύπου EN 10080 (2005). Η εν λόγω δοκιμή βασίζεται στην Τεχνική Σύσταση RILEM RC6 [RILEM TC (1994)]. Η δοκιμή εξόλκευσης πραγματοποιήθηκε μέσω της επιβολής μιας εφελκυστικής δύναμης επί της εγκιβωτισμένης ράβδου οπλισμού.



Σχήμα 104 Διάταξη και περιγραφή εξαρτημάτων δοκιμής εξόλκευσης



Σχήμα 105 Διάταξη δοκιμής εξόλκευσης: (α) εφελκυσμένο άκρο ράβδου (β) άτονο άκρο ράβδου

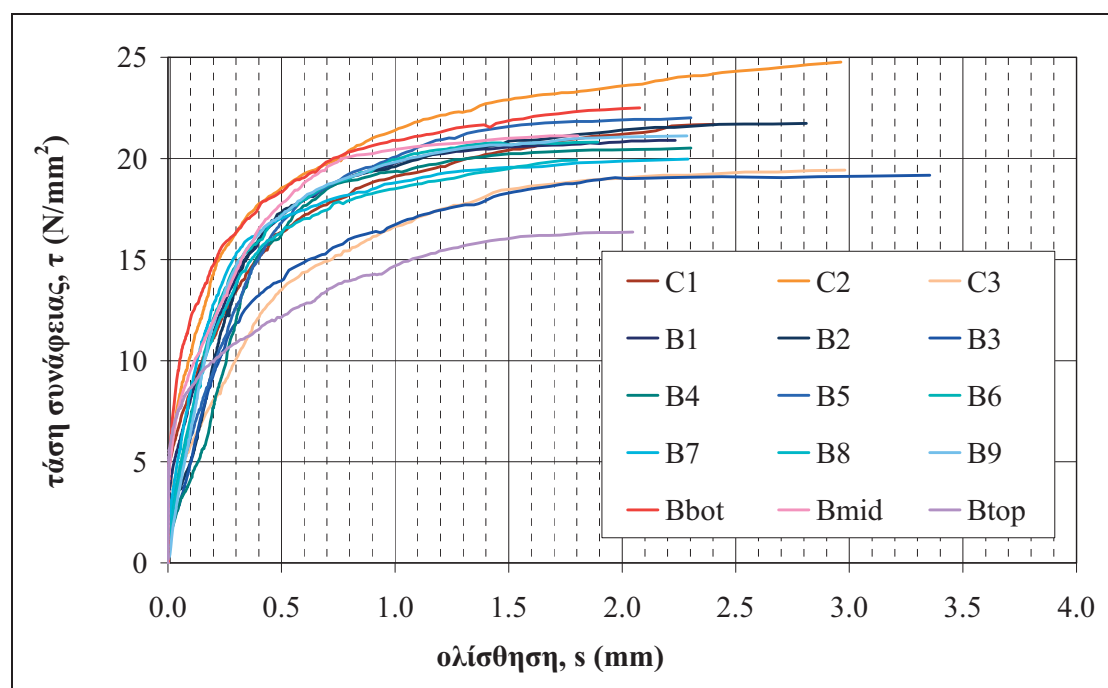
Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 104. Για την εφαρμογή της εφελκυστικής δύναμης χρησιμοποιήθηκε υδραυλικός γρύλος, ο

οποίος ήταν συνδεδεμένος σε υδραυλική αντλία. Η δύναμη εξόλκευσης,  $F$  (kN), εφαρμοζόταν αυξανόμενη σταδιακά έως την αστοχία και καταγραφόταν μέσω δυναμοκυψέλης μέγιστης δυναμικότητας 300 kN (**Σχήμα 105α**), ενώ η αντίστοιχη ολίσθηση,  $s$  (mm), της ράβδου καταγραφόταν μέσω τριών γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μετασχηματιστών (linear variable differential transformers, LVDTs) ή «βελομέτρων» που ήταν ακλόνητα στερεωμένα μέσω κατάλληλα διαμορφωμένου μεταλλικού σφιγκτήρα στο άτονο άκρο της εγκιβωτισμένης ράβδου (στο αντίθετο άκρο από εκείνο, στο οποίο επιβαλλόταν το φορτίο, **Σχήμα 105β**). Μία άκαμπτη μεταλλική πλάκα ήταν τοποθετημένη μεταξύ του δοκιμίου και του υδραυλικού γρύλου για την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Όλα τα εξαρτήματα ήταν συνδεδεμένα σε ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής δεδομένων, το οποίο κατέγραφε σε πραγματικό χρόνο τη δύναμη εξόλκευσης συναρτήσει των αντίστοιχων ολισθήσεων (σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα) των τριών βελομέτρων, με ρυθμό καταγραφής πέντε μετρήσεων το δευτερόλεπτο. Η εφελκυστική δύναμη καταγραφόταν με ακρίβεια 0.1 kN. Η εν λόγω ακρίβεια ήταν, κατ' απαίτηση του προτύπου, πάντοτε μικρότερη από το 1 % της μέγιστης δύναμης που καταγράφηκε σε οποιαδήποτε δοκιμή, ενώ η αντίστοιχη ακρίβεια για την ολίσθηση ανερχόταν σε 0.001 mm.

### 3.2.3. Καμπύλες τάσεων συνάφειας - ολισθήσεων

Η τάση συνάφειας,  $\tau$  (N/mm<sup>2</sup>), σε κάθε διαφορετική χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί μέσω της **Εξίσωσης (3.1)**, όπου  $F$  (N) η εφαρμοζόμενη δύναμη,  $d_{nom} = 16$  mm η διάμετρος της ράβδου οπλισμού και  $L = 80$  mm το ονομαστικό μήκος συνάφειας της ράβδου με το σκυρόδεμα, και να σχεδιαστεί σε συνάρτηση με την αντίστοιχη μέση ολίσθηση,  $s$  (mm), των τριών βελομέτρων. Ένα τυπικό διάγραμμα που περιλαμβάνει όλες τις καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για καθεμία από τις ράβδους όλων των δοκιμών μίας σύνθεσης, φαίνεται στο **Σχήμα 106**.

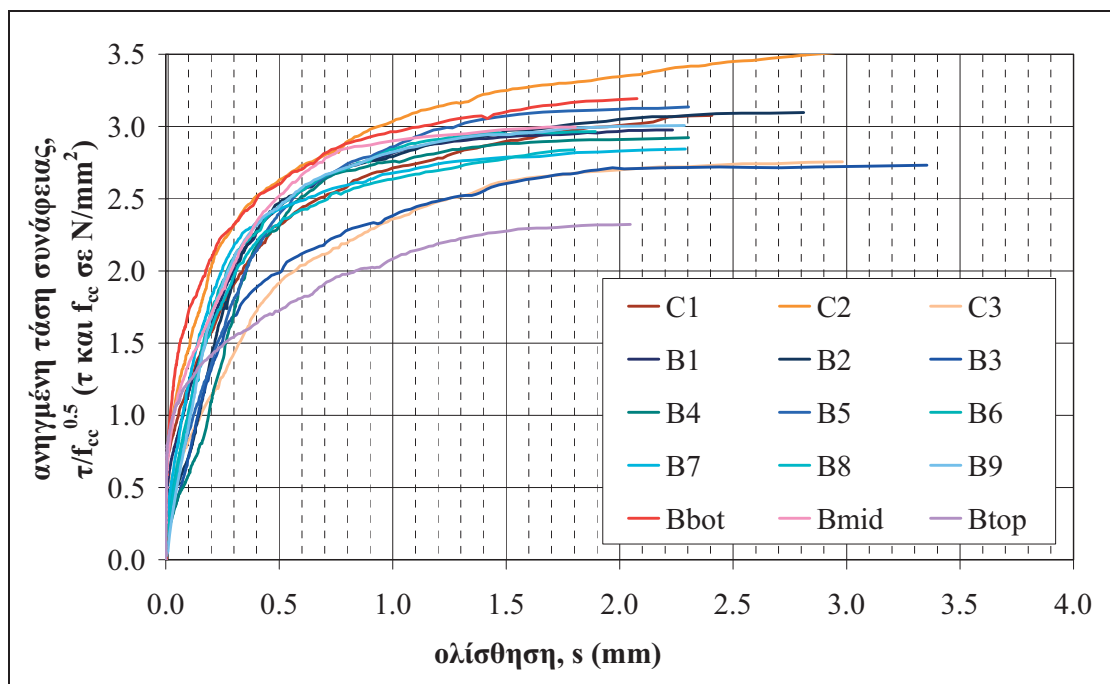
$$\tau = F / \pi d_{nom} L \quad (3.1)$$



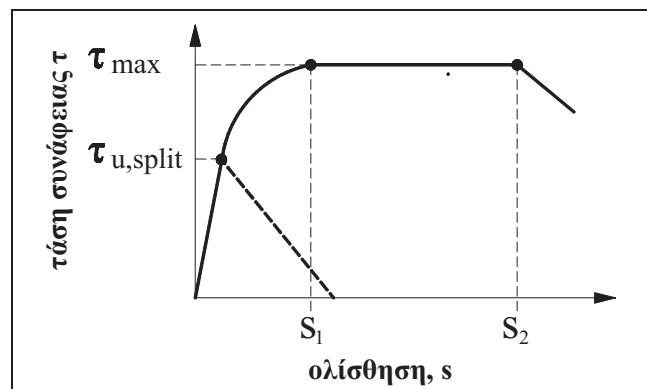
**Σχήμα 106** Τυπικές καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλους τους τύπους δοκιμών

Σημειώνεται ότι τυχόν υπέρβαση της τάσης διαρροής του χάλυβα λόγω εφελκυσμού οδηγεί σε πλευρική συστολή (lateral contraction) της ράβδου λόγω του φαινομένου Poisson και, συνεπώς, σε μείωση της αντίστασης λόγω συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και ράβδου [fib Bulletin 10 (2000), Ožbolt et al. (2002), Ruiz et al. (2007)]. Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητο η υπολογιζόμενη τάση συνάφειας να συγκρίνεται με την τάση διαρροής του χάλυβα και να αναφέρονται τυχόν υπερβάσεις, που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν την αξία του αποτελέσματος.

Με σκοπό τον περιορισμό της επιρροής της θλιπτικής αντοχής στη συνάφεια, οι αντιπροσωπευτικές τάσεις που μελετήθηκαν (όπως θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια, στην Παρ. 3.2.4) ανήχθησαν στην τετραγωνική ρίζα της αντίστοιχης μέσης θλιπτικής αντοχής,  $\tau/f_{cc}^{0.5}$  ( $\tau$  και  $f_{cc}$  σε  $\text{N/mm}^2$ ). Ένα τυπικό διάγραμμα των καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για καθεμία από τις ράβδους όλων των δοκιμών μίας σύνθεσης, φαίνεται στο **Σχήμα 107**.



**Σχήμα 107** Τυπικές καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλους τους τύπους δοκιμών (κυβικά, οριζόντια, κατακόρυφα)



**Σχήμα 108** Αναλυτική σχέση τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων υπό μονοτονική φόρτιση [πηγή: Model Code (2010)]

Οι εν λόγω καμπύλες συγκρίνονται με τις αναλυτικές καμπύλες τάσεων – ολισθήσεων υπό μονοτονική φόρτιση, όπως προτείνονται από τον πλέον πρόσφατο Κανονισμό **Model Code (2010)** (**Σχήμα 108**) και από τους **Huang et al. (1996)**. Άλλες πειραματικές καμπύλες μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [**Aslani and Nejadi (2012)**, **fib Bulletin 10 (2000)**, **Desnerck et al. (2010a)**]. Μέχρι την αστοχία, οι αναλυτικές καμπύλες προκύπτουν από τις **Εξισώσεις (3.2)** και **(3.3)**. Η συμπεριφορά μετά την αστοχία δεν ήταν δυνατό να διερευνηθεί λόγω πειραματικών περιορισμών (δεν ήταν δυνατή η καταγραφή των μεγάλων ολισθήσεων μετά την αστοχία).

$$\tau = \tau_{\max} (s / s_1)^a \quad \text{για } 0 \leq s \leq s_1 \quad (3.2)$$

$$\tau = \tau_{\max} \quad \text{για } s_1 \leq s \leq s_2 \quad (3.3)$$

Για καλές συνθήκες συνάφειας, ο **Model Code (2010)** προτείνει τον υπολογισμό της  $\tau_{\max}$  ως συνάρτηση της χαρακτηριστικής τιμής της θλιπτικής αντοχής κυλίνδρου,  $f_{ck}$ , σύμφωνα με τις **Εξισώσεις (3.4)** και **(3.5)** για αστοχία σε εξόλκευση (pull-out, PO) ή σε διάρρηξη (splitting, SP), αντίστοιχα.

$$\tau_{\max} = 2.5 f_{ck}^{0.5} \quad (3.4)$$

$$\tau_{u,split} = \tau_{\max} = 7.0 (f_{ck} / 20)^{0.25} \quad (3.5)$$

Για την περίπτωση της αστοχίας σε εξόλκευση (PO), οι τιμές των ολισθήσεων λαμβάνονται σταθερές και ίσες με  $s_1 = 1.0 \text{ mm}$  and  $s_2 = 2.0 \text{ mm}$ , αντίστοιχα. Για την περίπτωση της αστοχίας σε διάρρηξη (SP), η αναπτυσσόμενη μέγιστη ολίσθηση (που αντιστοιχεί στη στιγμή της αστοχίας), υπολογίζεται αντίστροφα, συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (3.2) και (3.4) για ολίσθηση  $s_1 = 1.0 \text{ mm}$  και τάση,  $\tau$  ( $\text{N/mm}^2$ ), υπολογισμένη βάσει της Εξίσωσης (3.5) για τη χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής κυλίνδρου,  $f_{ck}$  ( $\text{N/mm}^2$ ). Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, λαμβάνεται η μέση θλιπτική αντοχή κύβου,  $f_{cm}$ , αντί της προβλεπόμενης χαρακτηριστικής τιμής της θλιπτικής αντοχής κυλίνδρου,  $f_{ck}$ , γεγονός που αναμένεται να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της  $\tau_{\max}$ . Τέλος, για οποιονδήποτε τύπο αστοχίας, η σταθερά ‘α’, που επηρεάζει τη δυσκαμψία (κλίση) της καμπύλης, λαμβάνεται ίση με 0.4 [**Model Code (2010)**]. Οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων, σύμφωνα με τους **Huang et al. (1996)** και για σκυροδέματα υψηλής αντοχής, λαμβάνονται ως  $s_1 = 0.5 \text{ mm}$ ,  $s_2 = 1.5 \text{ mm}$  και  $\alpha = 0.3$ , ενώ η μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{\max}$ , υπολογίζεται από την **Εξίσωση (3.6)**, όπου  $f_{cm}$  η μέση θλιπτική αντοχή.

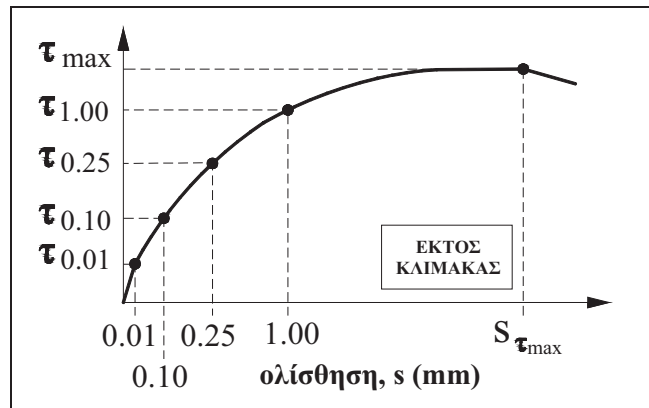
$$\tau_{\max} = 0.45 f_{cm} \quad (3.6)$$

#### 3.2.4. Αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (Παρ. 3.2.2), η καταγραφή του φορτίου (και συνεπώς ο υπολογισμός της αντίστοιχης τάσης συνάφειας) συναρτηθεί της ολίσθησης γινόταν σε πραγματικό χρόνο. Οι καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για κάθε δοκιμή εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής παρουσιάζονται στις Παραγράφους που ακολουθούν. Με εξαίρεση τις δοκιμές εξόλκευσης για τα κυβικά δοκίμια, για τις οποίες πραγματοποιήθηκε

λεπτομερέστερη μελέτη και σχολιασμός συγκριτικά με τις αναλυτικές σχέσεις τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων υπό μονοτονική φόρτιση του **Model Code (2010)** και των **Huang et al. (1996)** (Παρ. 3.3.1.4), για τη διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών σύνθεσης ακολουθήθηκε η συνήθης πρακτική προγενέστερων μελετών, σύμφωνα με την οποία οι καμπύλες δε συγκρίνονται στο σύνολο της ιστορίας φόρτισης, αλλά σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές στιγμές που συνήθως ορίζονται από την τιμή της ολίσθησης ή την αστοχία.

Ειδικότερα, από κάθε καμπύλη τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων (Σχήμα 106) διατηρούνται τέσσερις τάσεις:  $\tau_{0.01}$ ,  $\tau_{0.10}$  και  $\tau_{1.00}$ , που αντιστοιχούν στις ολισθήσεις  $s = 0.01$ ,  $0.10$  και  $1.00$  mm, καθώς και η μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{\max}$ , κατά τη στιγμή της αστοχίας. Σε μέρος των συνθέσεων διατηρήθηκε μία πέμπτη τάση συνάφειας, γνωστή και ως «κρίσιμη» τάση,  $\tau_{0.25}$ , που αντιστοιχεί σε ολίσθηση  $s = 0.25$  mm. Οι διατηρηθείσες τάσεις επί ενδεικτικής καμπύλης τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων απεικονίζονται γραφικά στο **Σχήμα 109**.



**Σχήμα 109** Ορισμός αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφόρων συνθέσεων ως αντιπροσωπευτικές τάσεις χρησιμοποιήθηκαν, κατά περίπτωση:

**(α) η μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{\max}$ :** σημαντικό πλήθος προγενέστερων μελετών [Khayat et al. (1997); Chan et al. (2003); Zhu et al. (2004); Castel et al. (2006); Söylev and François (2006); Almeida Fihlo et al. (2008); Esfahani et al. (2008); Hassan et al. (2009); Valcuende and Parra (2009); Desnerck et al. (2010)] προτείνουν την χρήση της μέγιστης τάσης συνάφειας,  $\tau_{\max}$ , λόγω του ξεκάθαρα και μονοσήμαντου ορισμού της. Τονίζεται, πάντως, ότι θα πρέπει να δίδεται προσοχή στον τρόπο αστοχίας (λόγω εξόλκευσης ράβδου ή αστοχίας σε διάρρηξη σκυροδέματος), καθώς διαφορετικοί τρόποι αστοχίας οδηγούν σε μη συγκρίσιμες τιμές της  $\tau_{\max}$ .

**(β) η μέση τάση συνάφειας,  $\tau_m$ :** η εν λόγω αντιπροσωπευτική τάση, η οποία χρησιμοποιείται επίσης εκτενώς στη βιβλιογραφία [Almeida Fihlo et al. (2008); Valcuende and Parra (2009); Desnerck et al. (2010)] και προτείνεται από την Τεχνική Σύσταση RILEM RC 6 [RILEM TC (1994)], υπολογίζεται σύμφωνα με την **Εξίσωση (3.7)**, ως ο αριθμητικός μέσος των τάσεων συνάφειας  $\tau_{0.01}$ ,  $\tau_{0.10}$  και  $\tau_{1.00}$ , που αντιστοιχούν στις ολισθήσεις  $s = 0.01$ ,  $0.10$  και  $1.00$  mm.

$$\tau_m = \frac{\tau_{0.01} + \tau_{0.10} + \tau_{1.00}}{3} \quad (3.7)$$

**(γ) η κρίσιμη τάση,  $\tau_{0.25}$ :** άλλοι ερευνητές, αλλά και επίσημες προδιαγραφές [Esfahani et al. (2008), Foroughi et al. (2008), Almeida Filho et al. (2008), fib Bulletin 10 (2000)] υιοθετούν τη χρήση της «κρίσιμης» τάσης συνάφειας,  $\tau_{0.25}$ , η οποία αντιστοιχεί σε ολίσθηση  $s = 0.25$  mm. Σημειώνεται ότι η ολίσθηση αυτή είναι πάντοτε χαμηλότερη από τις ολισθήσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας (και οι οποίες είναι, κατά περίπτωση, περίπου ίσες ή μεγαλύτερες από 1.00 mm). Η εν λόγω τάση μπορεί να θεωρηθεί ως πιο συντηρητική και ασφαλής για την ανάλυση και τη διαδικασία σχεδιασμού, λόγω του ότι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέγιστη τάση συνάφειας τείνει να υπερεκτιμά τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού [Foroughi et al. (2008); Almeida Filho et al. (2008)].

**(δ) η μέση τάση συνάφειας με ολοκλήρωση,  $\tau_{m,int}$ :** στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής εξετάστηκε μία επιπλέον τάση συνάφειας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη συνολική ιστορία φόρτισης της ράβδου, μέσω της ολοκλήρωσης των τάσεων συνάφειας στο διάστημα των αντίστοιχων ολισθήσεων (από  $s = 0$  έως  $s_{\tau_{max}}$ ). Συγκεκριμένα, η μέση τάση συνάφειας με ολοκλήρωση,  $\tau_{m,int}$ , υπολογίζεται σύμφωνα με την **Εξίσωση (3.8)**, ως το ορισμένο ολοκλήρωμα της τάσης συνάφειας από την έναρξη της δοκιμής εξόλκευσης έως την αστοχία, έως δηλαδή την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ .

$$\tau_{m,int} = \int_0^{s_{\tau_{max}}} \tau ds / s_{\tau_{max}} \quad (3.8)$$

### 3.3. Αποτελέσματα & Σχολιασμός<sup>1</sup>

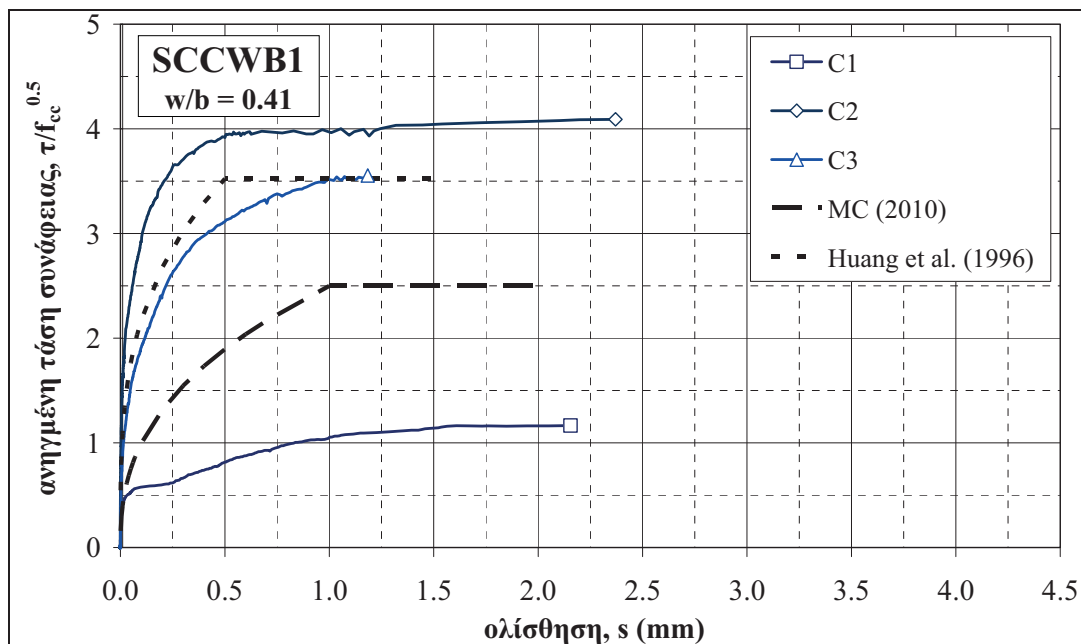
#### 3.3.1. Χαρακτηριστικά συνάφειας μέσω πρότυπων δοκιμών εξόλκευσης σε κυβικά δοκίμια<sup>2</sup>

Για τον υπολογισμό της τάσης συνάφειας και τη διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης ΑΣΣ, καθώς και τη σύγκριση με τυπικές συνθέσεις ΣΣ, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης σε πρότυπα κυβικά δοκίμια ακμής 200 mm. Όλες οι συνθέσεις, για τις οποίες προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά συνάφειας, εξετάστηκαν βάσει των τεσσάρων αντιπροσωπευτικών τάσεων,  $\tau_m$ ,  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ , όπως αυτές περιγράφηκαν στην Παρ. 3.2.4. Επιπροσθέτως, μελετήθηκε η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ . Για κάθε εξεταζόμενο μέγεθος, οι συγκρίσεις μεταξύ των συνθέσεων πραγματοποιούνται στη βάση της μέσης τιμής των τριών δοκιμών,  $m$  ή  $\tau_{cub}$ , ενώ σχολιάζεται και η τυπική απόκλιση,  $\sigma$ .

##### 3.3.1.1. Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

##### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολίσθησεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 110 έως Σχήμα 114), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολίσθησεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  (υπο-ομάδα συνθέσεων Α, χωρίς θερμική καταπόνηση, Πίν. 37, Κεφ.2).

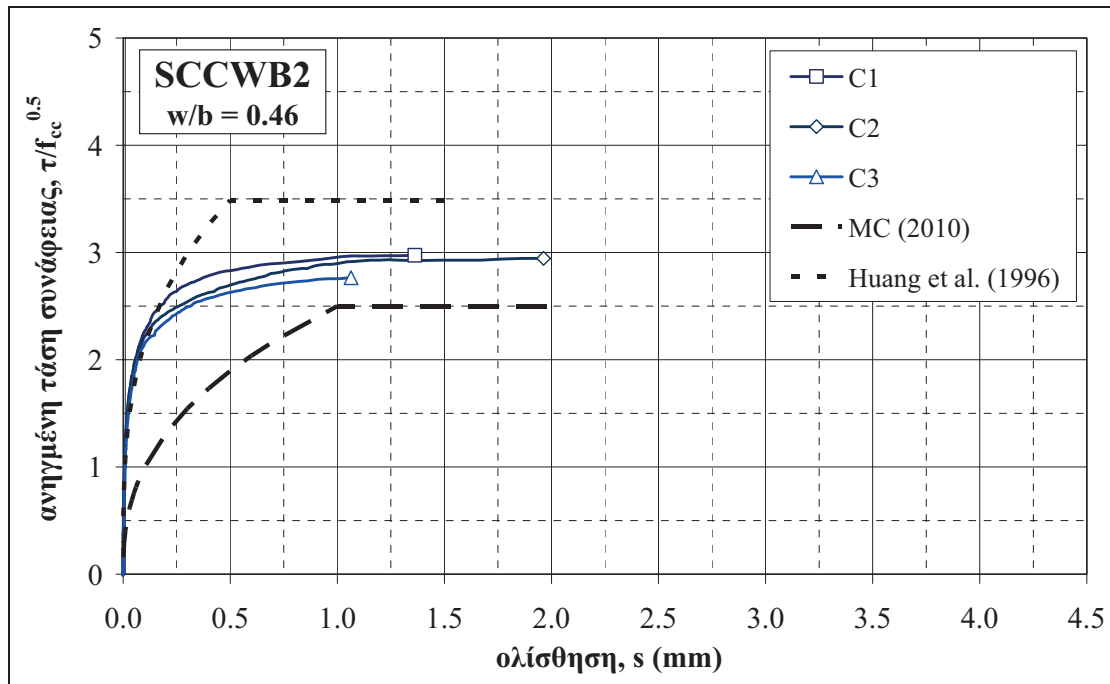


Σχήμα 110 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCWB1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

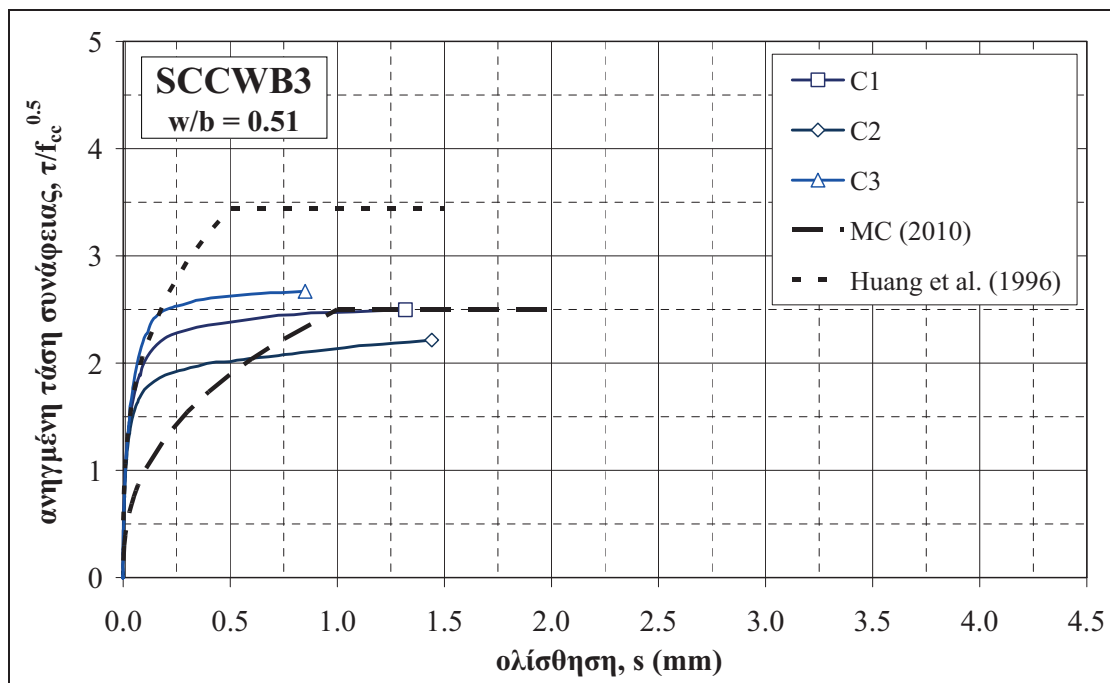
<sup>1</sup> Στα κεφάλαια που ακολουθούν αντλήθηκαν στοιχεία και αποτελέσματα από τις ακόλουθες διπλωματικές εργασίες, όπου ο γράφων συμμετείχε στις πειραματικές διεργασίες και αναλύσεις: Πάλμος και Σωτηροπούλου (2010), Στύλος (2011), Πάσιος (2011), Ορφανόπουλος (2011).

<sup>2</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

- στα πρακτικά του 4<sup>ου</sup> Διεθνούς Συμποσίου fib: Bond, Anchorage, Detailing (BIC 2012), 17-20 Ιουνίου 2012, Μπρέσια, Ιταλία [Sfikas and Trezos (2012)]
- στα επιστημονικά περιοδικά Construction & Building Materials [Sfikas and Trezos (2013)] και Cement & Concrete Composites [Trezos et al. (2014)].

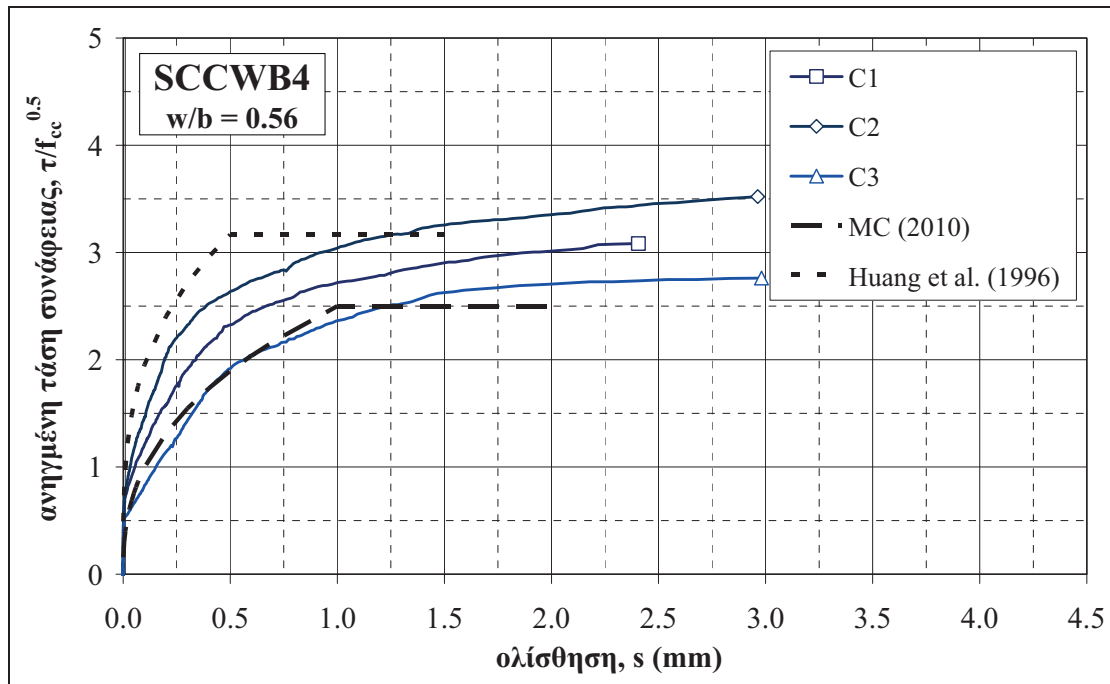


Σχήμα 111 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCWB2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

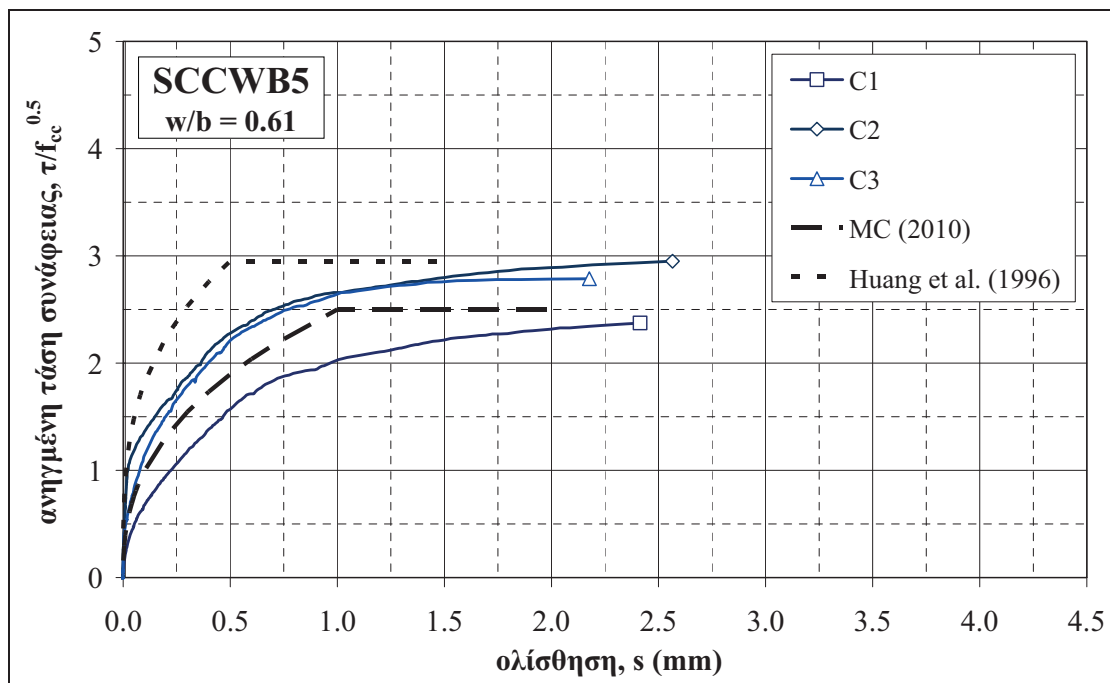


Σχήμα 112 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCWB3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας





Σχήμα 113 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 114 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 69 περιλαμβάνει τον τύπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στα τρία κυβικά δοκίμια των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Στον Πίνακα σημειώνονται οι ράβδοι, στις οποίες η τάση εξόλκευσης ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα. Η μοναδική σύνθεση που παρουσίασε αστοχία σε διάρρηξη σκυροδέματος (splitting, SP) ήταν εκείνη με τον χαμηλότερο λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b = 0.41$ , SCCWB1) και μόνο για μία ράβδο κυβικού δοκιμίου (C3). Λόγω της υψηλής τιμής της μέγιστης τάσης συνάφειας, η εν λόγω ράβδος συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό της μέσης τιμής, σε αντίθεση με τη ράβδο του δοκιμίου C1, η οποία αγνοήθηκε λόγω της πολύ χαμηλής τιμής της  $\tau_{max}$ . Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO). Όσο αφορά στην τάση των ράβδων, αυτή ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα στα κυβικά δοκίμια C2 και C3 της σύνθεσης SCCWB1.

Πίνακας 69 Τύπος αστοχίας και διαρροή χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμίων, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

κωδικός σύνθεση	SCCWB1 SCC29	SCCWB2 SCC27	SCCWB3 SCC26	SCCWB4 SCC28	SCCWB5 SCC31
C1	PO*	PO	PO	PO	PO
C2	PO**	PO	PO	PO	PO
C3	SP**	PO	PO	PO	PO

\*αγνοήθηκε κατά τον υπολογισμό της μέσης τιμής, λόγω πολύ χαμηλής  $\tau_{max}$  \*\*διαρροή χάλυβα

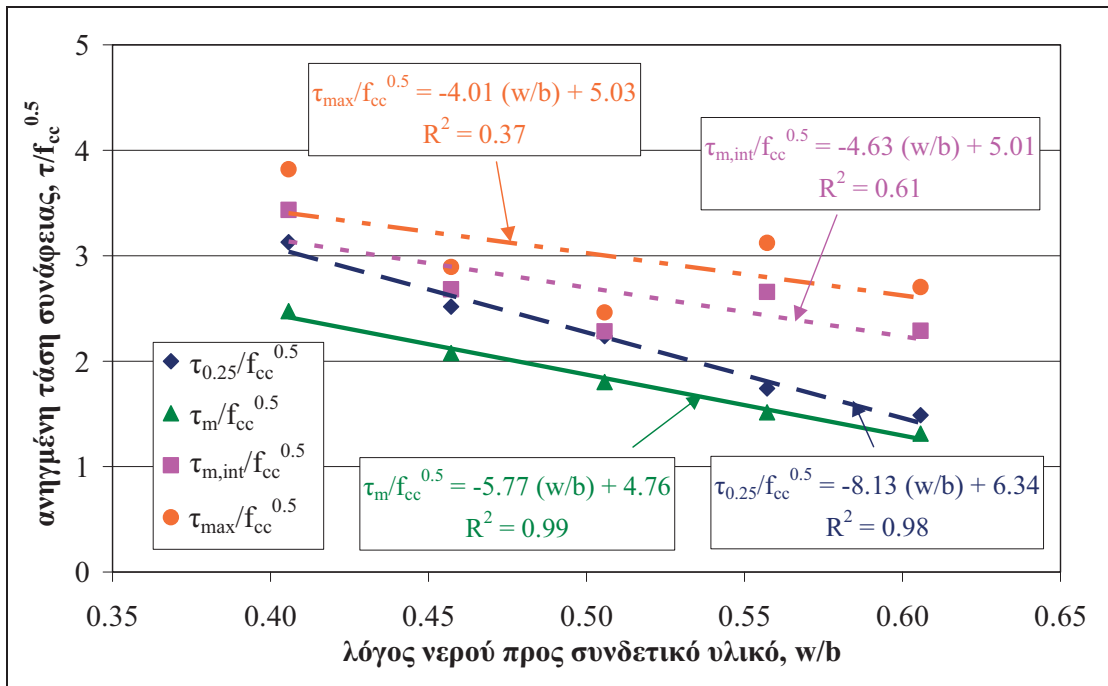
### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 70 περιλαμβάνει τις αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας, ανηγμένες στην αντίστοιχη μέση θλιπτική αντοχή,  $\tau/f_{cc}$  (για  $\tau$ :  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  and  $\tau_{max}$ ), καθώς και οι τιμές της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$  (mm) για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Για κάθε μίγμα και για κάθε ανηγμένη τάση ή για την ολίσθηση, έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές,  $m$  ή  $\tau_{cub}$ , και οι τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , των τριών επιμέρους δοκιμίων που δοκιμάστηκαν. Επιπλέον, στην τελευταία στήλη κάθε πίνακα, έχουν υπολογιστεί οι συνολικοί μέσοι όροι, ώστε να είναι δυνατή μια μακροσκοπική αξιολόγηση συγκριτικά με τα μίγματα ΣΣ.

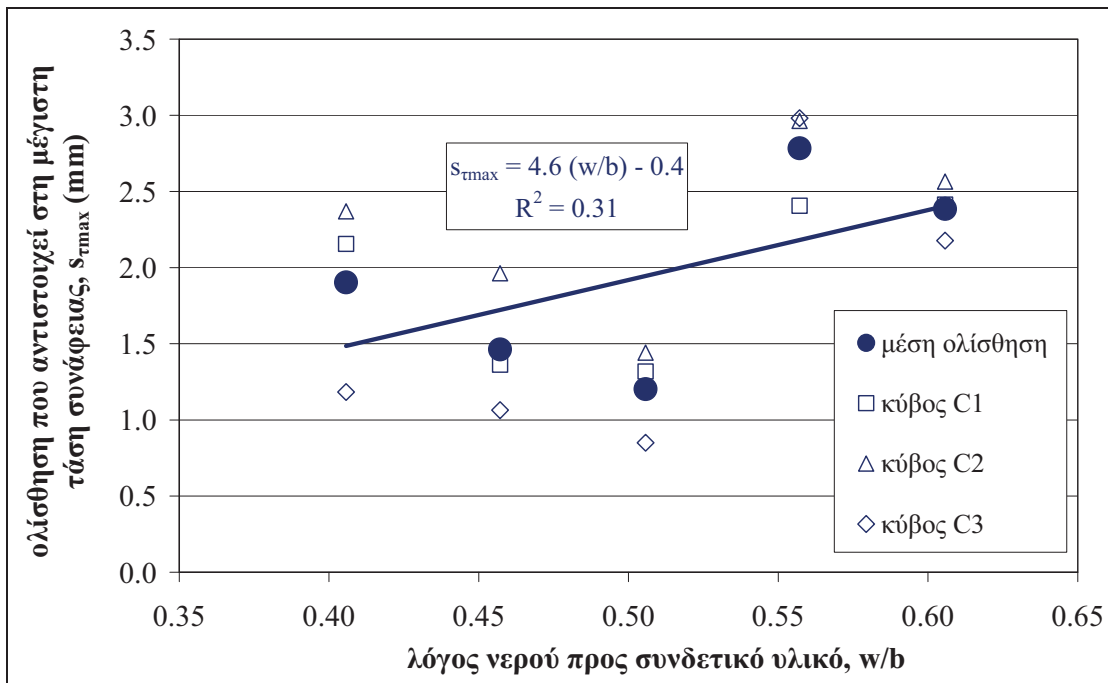
Πίνακας 70 Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές,  $m$ , και τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμίων) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

κωδικός σύνθεση		SCCWB1*	SCCWB2	SCCWB3	SCCWB4	SCCWB5	M.O.
$w/b$		0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	
$\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	3.13	2.52	2.24	1.74	1.49	2.22
	$\sigma$	0.71	0.11	0.31	0.47	0.37	
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$m$	2.48	2.08	1.80	1.51	1.31	1.84
	$\sigma$	0.52	0.08	0.18	0.26	0.31	
$\tau_{m,int}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	3.44	2.68	2.28	2.66	2.29	2.67
	$\sigma$	0.63	0.14	0.24	0.35	0.34	
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	3.82	2.89	2.46	3.12	2.70	3.00
	$\sigma$	0.38	0.11	0.23	0.38	0.30	
$s_{\tau_{max}}$ (mm)	$m$	1.9	1.5	1.2	2.8	2.4	1.9
	$\sigma$	0.6	0.5	0.3	0.3	0.2	

\*για τον υπολογισμό των μέσων τιμών εξαιρέθηκε το δοκίμιο C1, λόγω της σημαντικής απόκλισης που εμφάνισε η καμπύλη τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων εν σχέσει προς τις αντίστοιχες καμπύλες των C2 και C3



Σχήμα 115 Επιρροή λόγου  $w/b$  στις ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας,  $\tau/f_{cc}$



Σχήμα 116 Επιρροή λόγου  $w/b$  στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας

Στο **Σχήμα 115** εξετάζονται αποκλειστικά τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  (από 0.41 έως 0.61), ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της εν λόγω μεταβολής στις αναπτυσσόμενες ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας. Παρατηρείται ότι οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, ενώ το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και μεταξύ των ανηγμένων τάσεων  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ . Πιο συγκεκριμένα, οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  φαίνεται να μειώνονται γραμμικά με την αύξηση του λόγου  $w/b$ , με τη μεταβολή να είναι εξαιρετικά σταθερή, γεγονός που αποδεικνύεται από τους υψηλούς συντελεστές συσχέτισης ( $R^2 = 0.96$  και  $0.95$ , αντίστοιχα). Η μείωση της τάσης είναι εντονότερη στην περίπτωση της τάσης  $\tau_{0.25}$ . Συγκεκριμένα, για μια αύξηση του λόγου  $w/b$  από 0.41 σε 0.61 η ανηγμένη τάση  $\tau_m$  μειώνεται κατά περίπου 35 %, έναντι μείωσης περίπου 50 % για την ανηγμένη τάση  $\tau_{0.25}$ . Από την άλλη πλευρά οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$  φαίνεται επίσης να έχουν μια ελαφρώς μειωτική τάση μεταβολής για την αύξηση του λόγου  $w/b$ , αν και η σημαντική διακύμανση των αποτελεσμάτων δεν εξασφαλίζει την υψηλή αξιοπιστία της παρατήρησης αυτής.

Η επιρροή του λόγου  $w/b$  στην ολίσθηση  $s_{\tau_{max}}$  παρουσιάζεται στο **Σχήμα 116**. Η ολίσθηση φαίνεται να αυξάνεται για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ , αν και θα πρέπει να σημειωθεί ότι, και στην περίπτωση αυτή, η γραμμική παλινδρόμηση είναι αρκετά ασθενής ( $R^2 = 0.31$ ) για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

### 3.3.1.2. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (**Σχήμα 117** έως **Σχήμα 127**), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  (υπο-ομάδες συνθέσεων Β1 και Β2, χωρίς θερμική καταπόνηση, Πίν. 38, Κεφ.2).

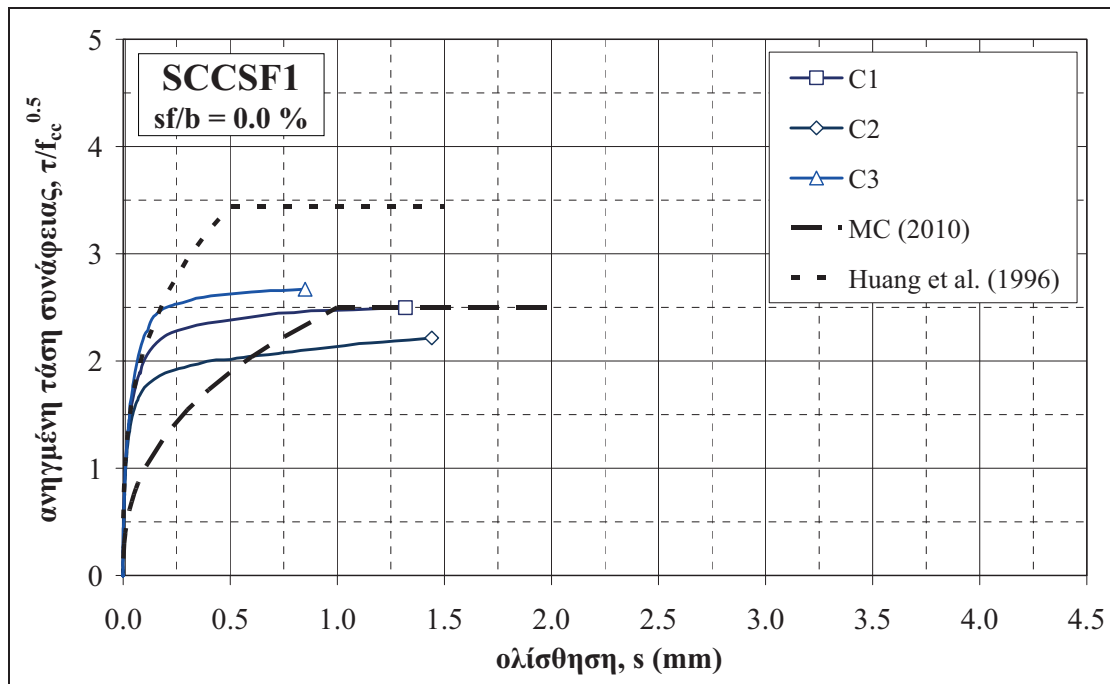
#### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο **Πίνακας 71** περιλαμβάνει τον τύπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στα τρία κυβικά δοκίμια των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Όλες οι ράβδοι αστόχησαν σε εξόλκευση (pull-out, PO), ενώ δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα.

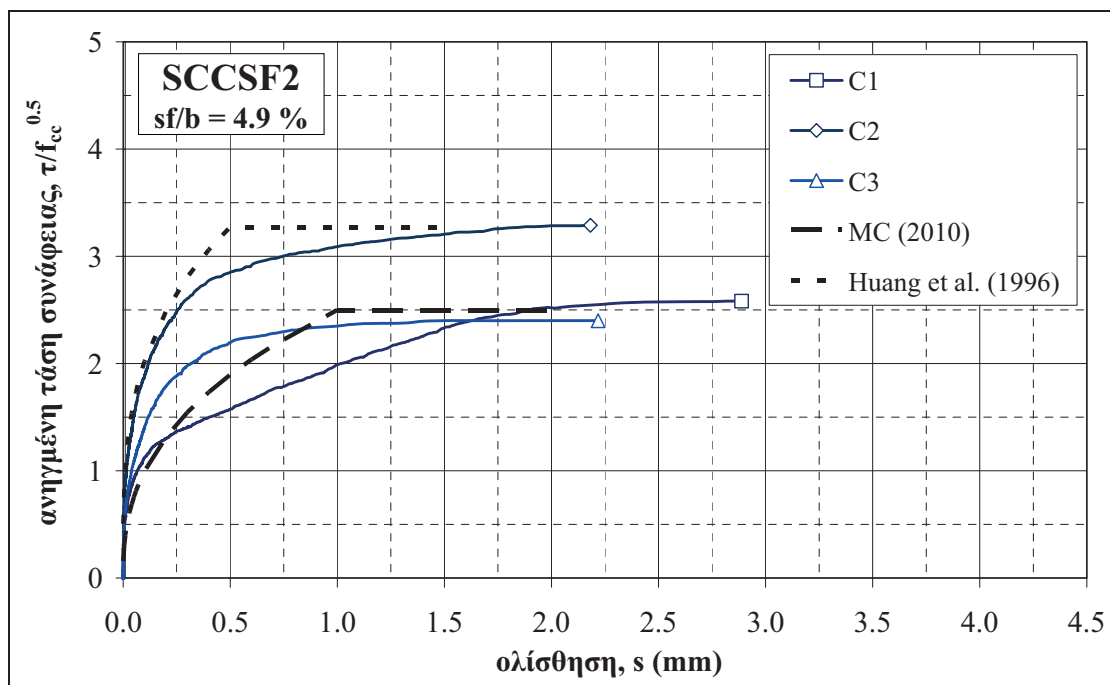
**Πίνακας 71** Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμίων, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$

κωδικός	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC
	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11
σύνθεση	SCC26	SCC34	SCC30	SCC35	SCC32	SCC33	SCC36	SCC16	SCC17	SCC18	SCC19
C1	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
C2	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
C3	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO

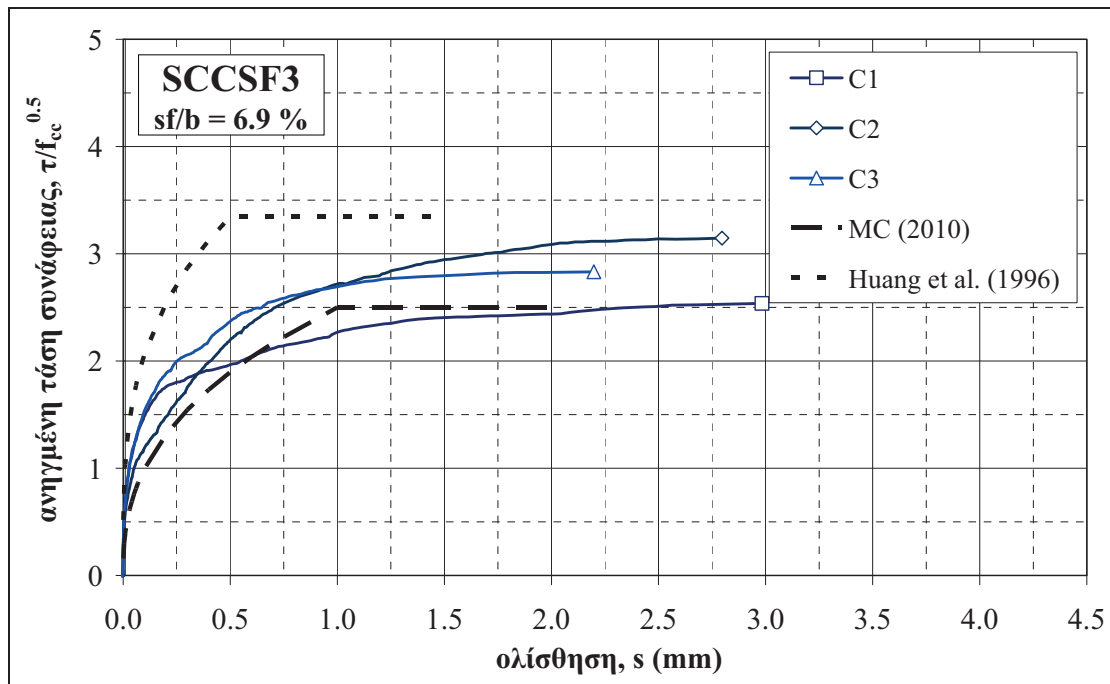
σημείωση: σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε διαρροή του χάλυβα



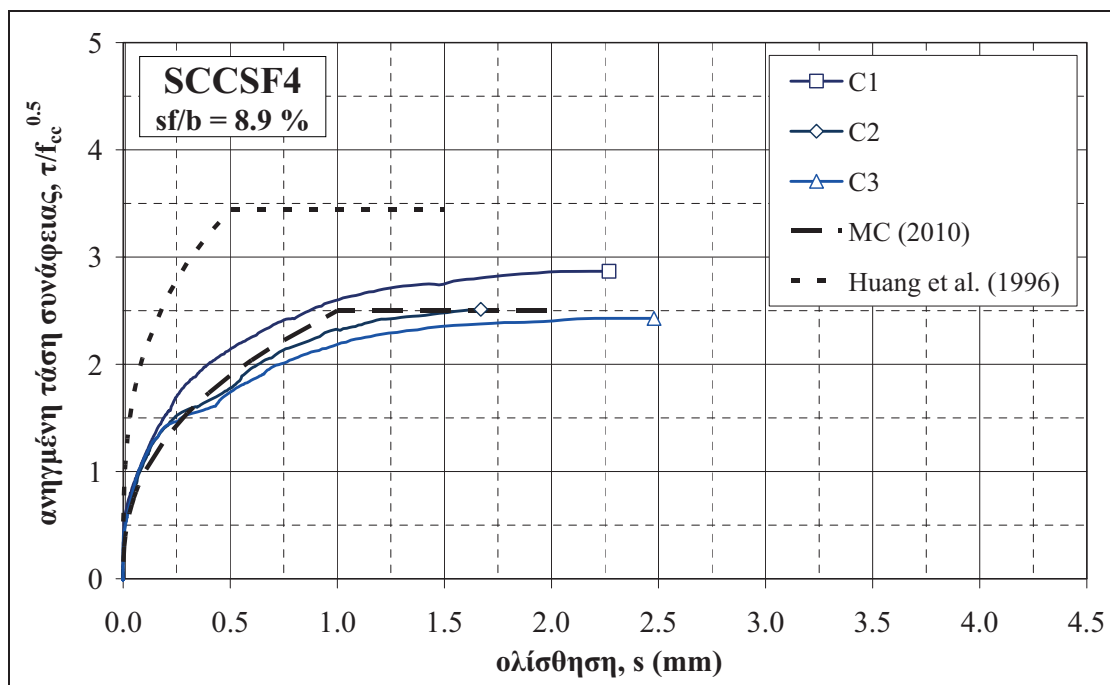
Σχήμα 117 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



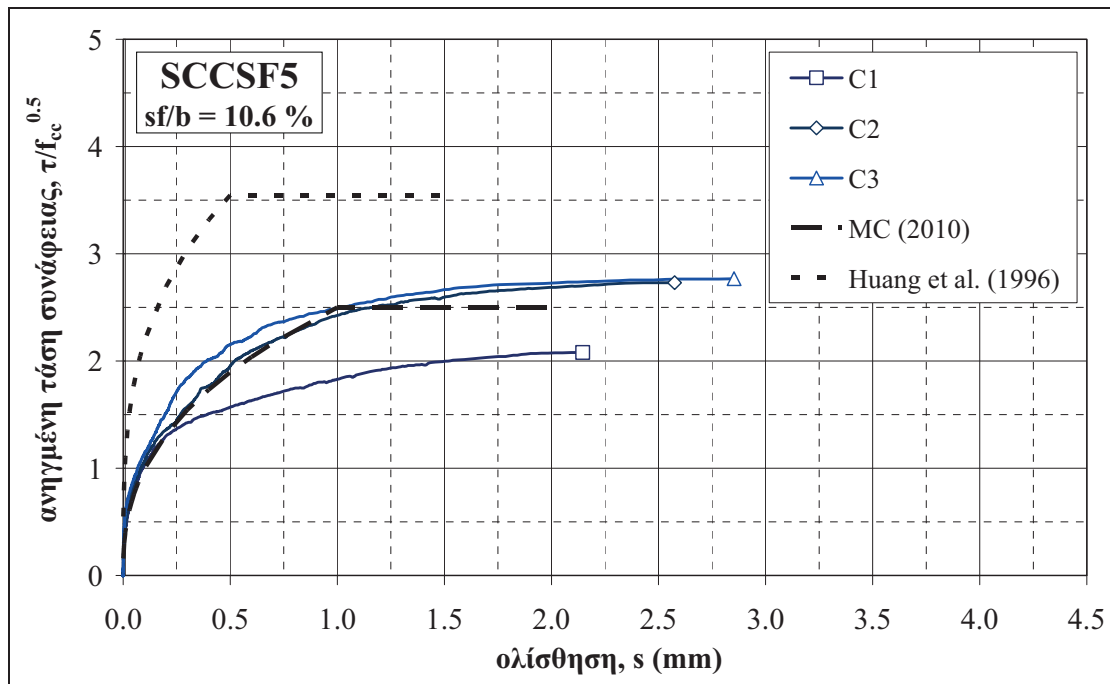
Σχήμα 118 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



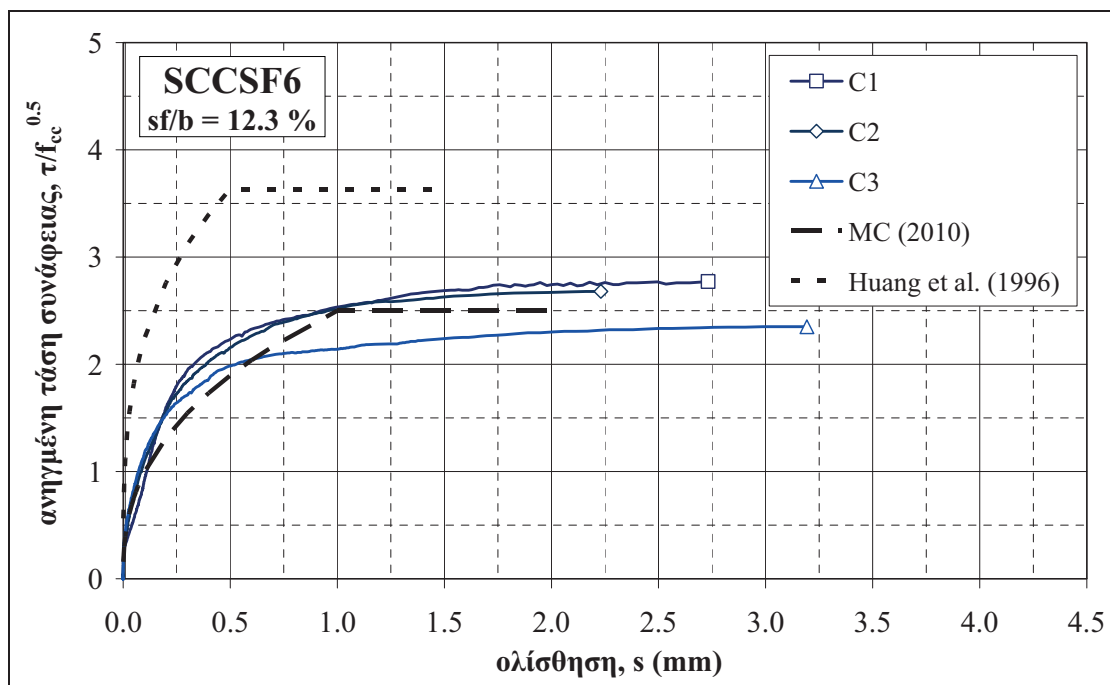
Σχήμα 119 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



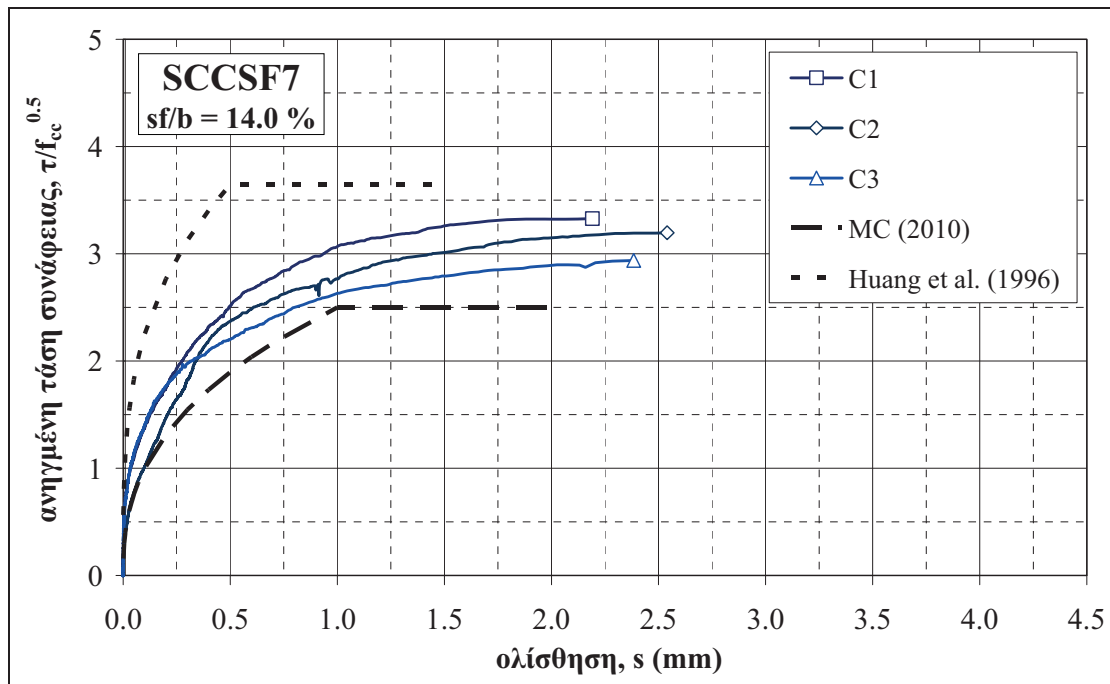
Σχήμα 120 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



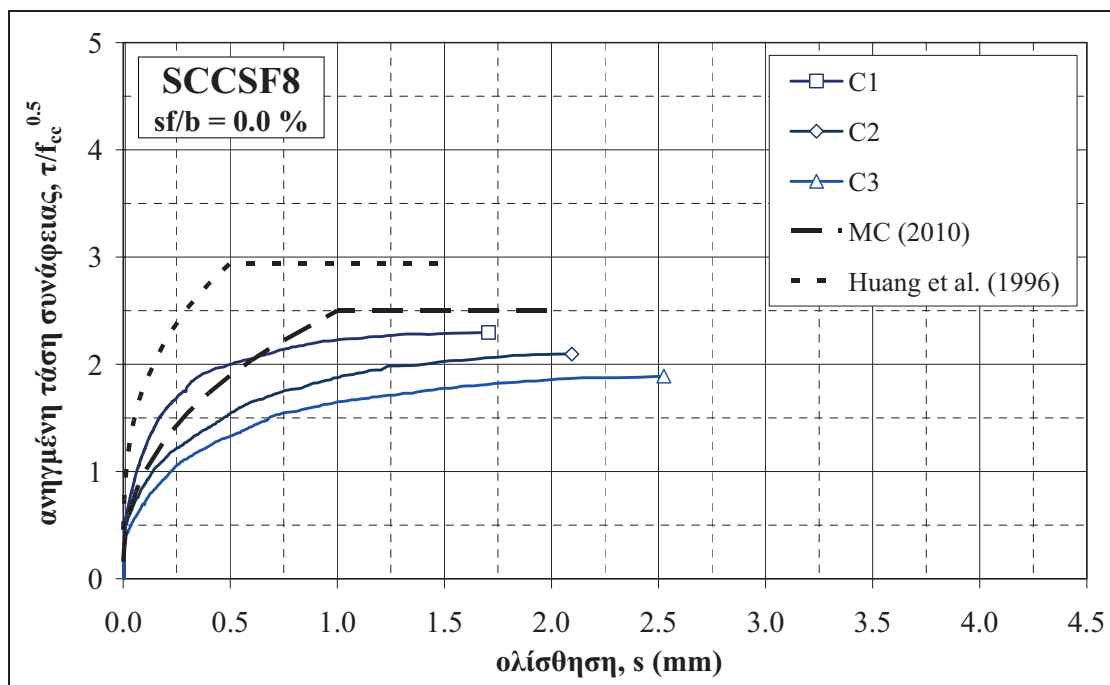
Σχήμα 121 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 122 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF6– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

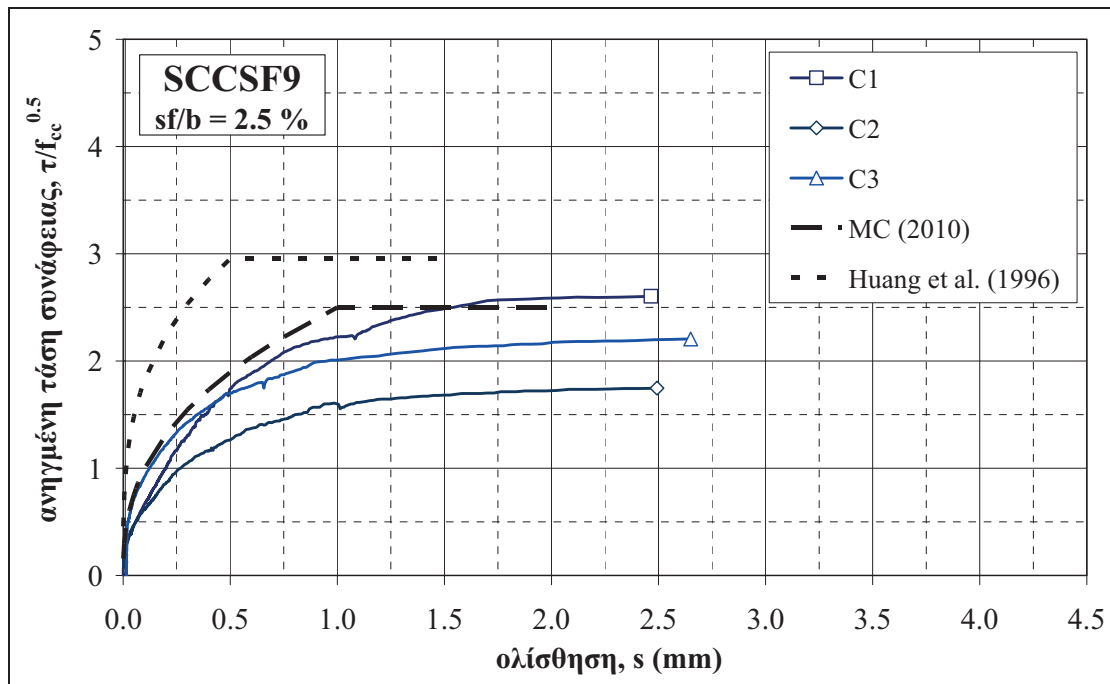


Σχήμα 123 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF7– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

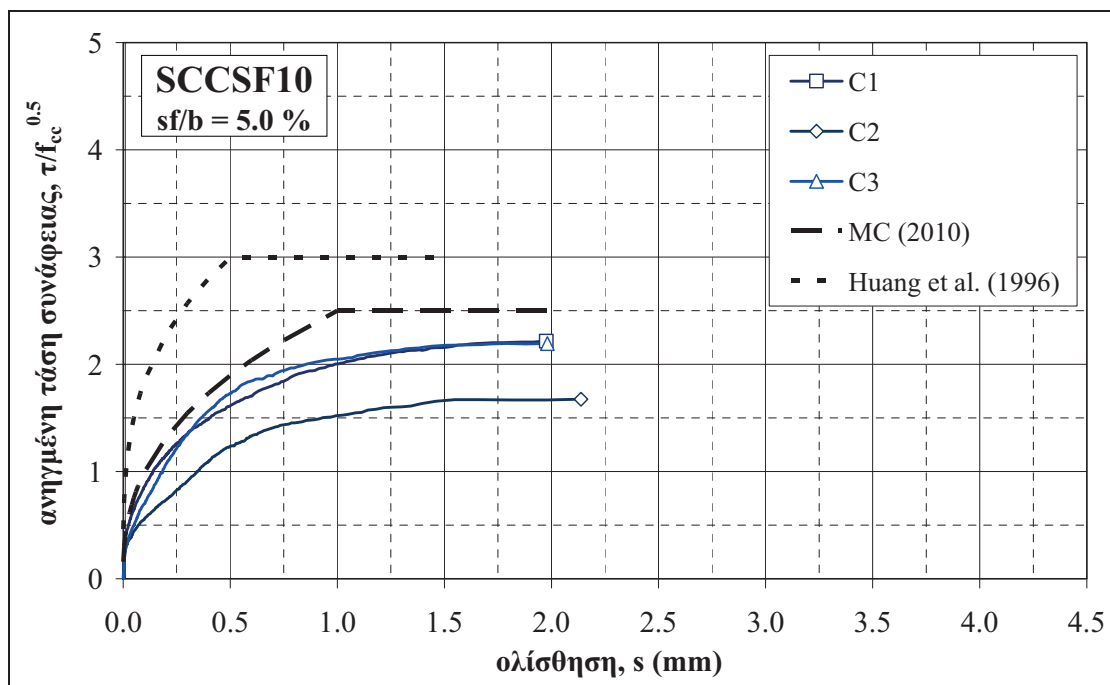


Σχήμα 124 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF8– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

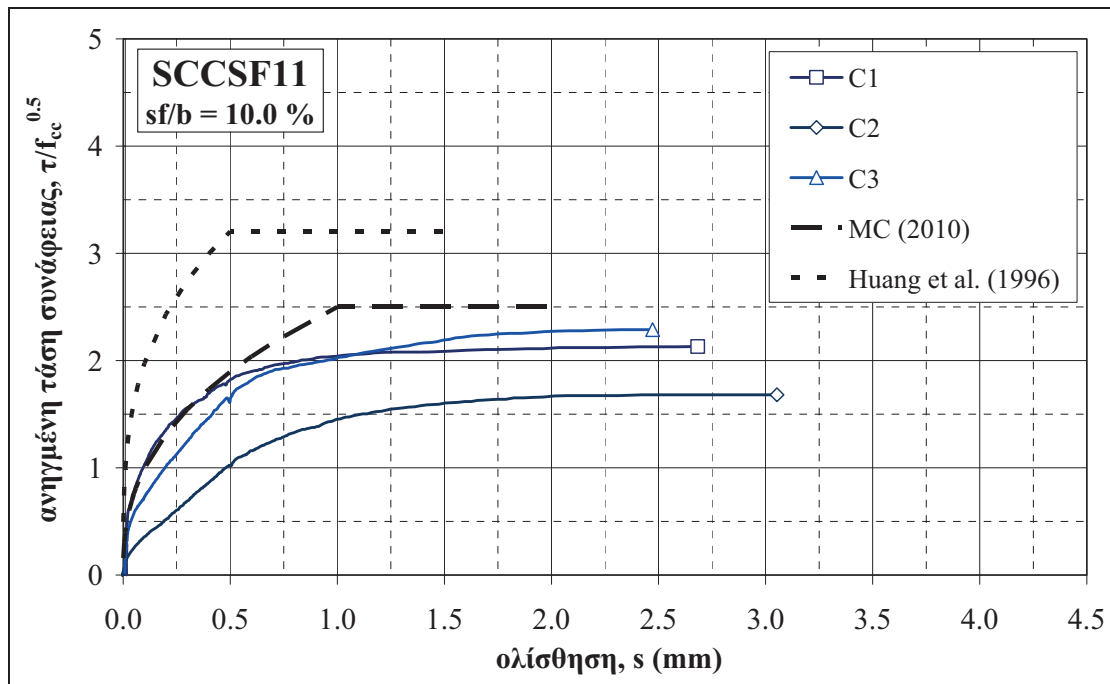




Σχήμα 125 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF9– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 126 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF10– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 127 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF11– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 72 και ο Πίνακας 73 περιλαμβάνουν τις αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας, ανηγμένες στην αντίστοιχη μέση θλιπτική αντοχή,  $\tau/f_{cc}$  (για  $\tau$ :  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  and  $\tau_{max}$ ), καθώς και οι τιμές της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$  (mm) για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Για κάθε μίγμα και για κάθε ανηγμένη τάση ή για την ολίσθηση, έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές,  $m$  ή  $\tau_{cub}$ , και οι τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , των τριών επιμέρους δοκιμίων που δοκιμάστηκαν. Επιπλέον, στην τελευταία στήλη κάθε πίνακα, έχουν υπολογιστεί οι συνολικοί μέσοι όροι, ώστε να είναι δυνατή μια μακροσκοπική αξιολόγηση συγκριτικά με τα μίγματα ΣΣ.

Πίνακας 72 Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές,  $m$ , και τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμίων) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$

κωδικός σύνθεση	SCCSF1* SCC26	SCCSF2 SCC34	SCCSF3 SCC30	SCCSF4 SCC35	SCCSF5 SCC32	SCCSF6 SCC33	SCCSF7 SCC36	M.O.
$sf/b$	0.0 %	4.9 %	6.9 %	8.9 %	10.6 %	12.3 %	14.0 %	
$\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$	$m$ 2.24	1.91	1.82	1.56	1.52	1.72	1.82	1.76
	$\sigma$ 0.31	0.56	0.19	0.12	0.18	0.08	0.15	
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$m$ 1.80	1.54	1.55	1.34	1.24	1.28	1.56	1.46
	$\sigma$ 0.18	0.37	0.08	0.09	0.13	0.04	0.16	
$\tau_{m,int}/f_{cc}^{0.5}$	$m$ 2.28	2.43	2.51	2.18	2.19	2.30	2.68	2.39
	$\sigma$ 0.24	0.46	0.21	0.22	0.37	0.16	0.16	
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$m$ 2.46	2.76	2.86	2.60	2.55	2.60	3.15	2.76
	$\sigma$ 0.23	0.47	0.31	0.23	0.39	0.22	0.20	
$s_{\tau_{max}}$ (mm)	$m$ 1.2	2.4	2.7	2.1	2.5	2.7	2.4	2.4
	$\sigma$ 0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	

\*σύνθεση αναφοράς, ταυτίζεται με τη σύνθεση SCCWB3

**Πίνακας 73** Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές,  $m$ , και τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμίων) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ 

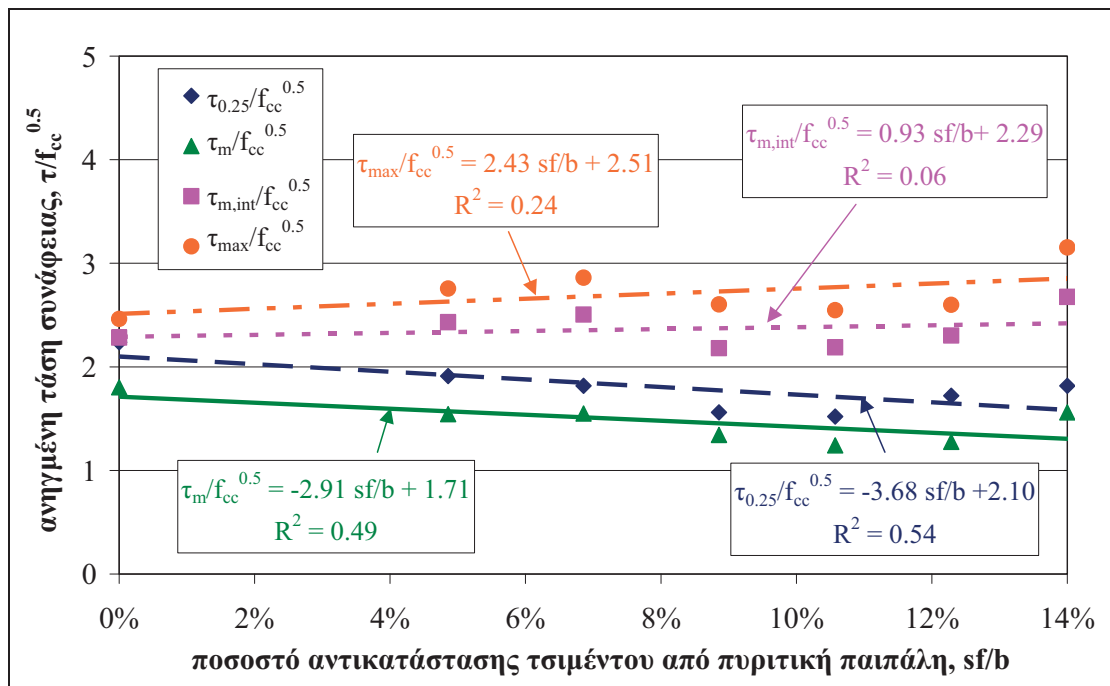
κωδικός		SCCSF8	SCCSF9	SCCSF10	SCCSF11	M.O.
σύνθεση		SCC16	SCC17	SCC18	SCC19	
$sf/b$		0.0 %	2.5 %	5.0 %	10.0 %	
$\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>1.32</b>	<b>1.15</b>	<b>1.10</b>	<b>1.06</b>	<b>1.16</b>
	$\sigma$	0.33	0.18	0.24	0.43	
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>1.11</b>	<b>0.95</b>	<b>0.96</b>	<b>0.88</b>	<b>0.97</b>
	$\sigma$	0.21	0.11	0.15	0.21	
$\tau_{m,int}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>1.78</b>	<b>1.84</b>	<b>1.68</b>	<b>1.75</b>	<b>1.77</b>
	$\sigma$	0.22	0.32	0.25	0.30	
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>2.09</b>	<b>2.19</b>	<b>2.03</b>	<b>2.03</b>	<b>2.09</b>
	$\sigma$	0.20	0.43	0.31	0.32	
$s_{tmax}$ (mm)	$m$	<b>2.1</b>	<b>2.5</b>	<b>2.0</b>	<b>2.7</b>	<b>2.4</b>
	$\sigma$	0.4	0.1	0.1	0.3	

Στο **Σχήμα 128** και στο **Σχήμα 129** εξετάζονται τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , από 0.0 % (μίγμα αναφοράς) έως 14.0 % (υπο-ομάδα συνθέσεων B1) ή 10.0 % (υπο-ομάδα συνθέσεων B2), ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της εν λόγω μεταβολής στις αναπτυσσόμενες ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας.

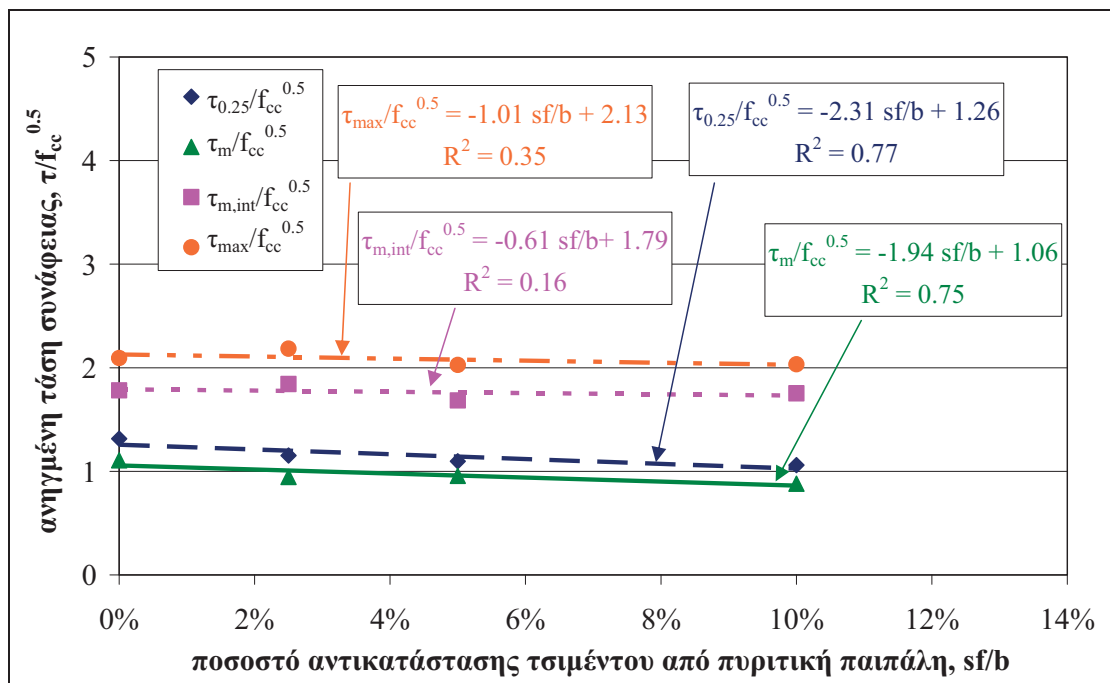
Για την υπο-ομάδα συνθέσεων B1 παρατηρείται ότι, όπως και στην περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $w/b$ , οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, ενώ το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και μεταξύ των ανηγμένων τάσεων  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ . Συγκεκριμένα, οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  φαίνεται να μειώνονται γραμμικά με την αύξηση του λόγου  $sf/b$ , με τη μεταβολή να είναι αρκετά πιο σταθερή, γεγονός που αποδεικνύεται από τους ικανοποιητικούς –αν και σχετικά χαμηλούς– συντελεστές συσχέτισης ( $R^2 = 0.54$  και  $0.49$ , αντίστοιχα). Η μείωση της τάσης είναι παρόμοια για τις δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις. Συγκεκριμένα, για μια αύξηση του λόγου  $sf/b$  από 0.0 σε 14.0 %, τόσο η ανηγμένη τάση  $\tau_{0.25}$ , όσο και η ανηγμένη τάση  $\tau_m$  μειώνονται κατά περίπου 30 %. Από την άλλη πλευρά οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$  δε φαίνεται να έχουν κάποια προφανή τάση μεταβολής και παραμένουν πρακτικώς σταθερές για όλο το εξεταζόμενο εύρος λόγων  $sf/b$ , με μία αυξομείωση των ανηγμένων τιμών κατά μέγιστο  $\pm 15$  %.

Για την υπο-ομάδα συνθέσεων B2, όλες οι ανηγμένες τάσεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με την αύξηση του λόγου  $sf/b$ . Συγκεκριμένα, όλες οι ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις φαίνεται να μειώνονται ελαφρώς με την αύξηση του λόγου  $sf/b$  από 0.0 έως 10.0 %. Η μείωση αυτή είναι εξαιρετικά μικρή έως ασήμαντη και, επομένως, θα μπορούσε να υποτεθεί, ότι μέχρι το ποσοστό  $sf/b = 10.0$  % οι ανηγμένες τάσεις παραμένουν πρακτικώς σταθερές. Συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες ανηγμένες τάσεις της υπο-ομάδας B1 (έως 10.0 %), οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$  φαίνεται να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, ενώ οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  φαίνεται να μειώνονται ελαφρώς ηπιότερα στην περίπτωση των συνθέσεων της υπο-ομάδας B2.

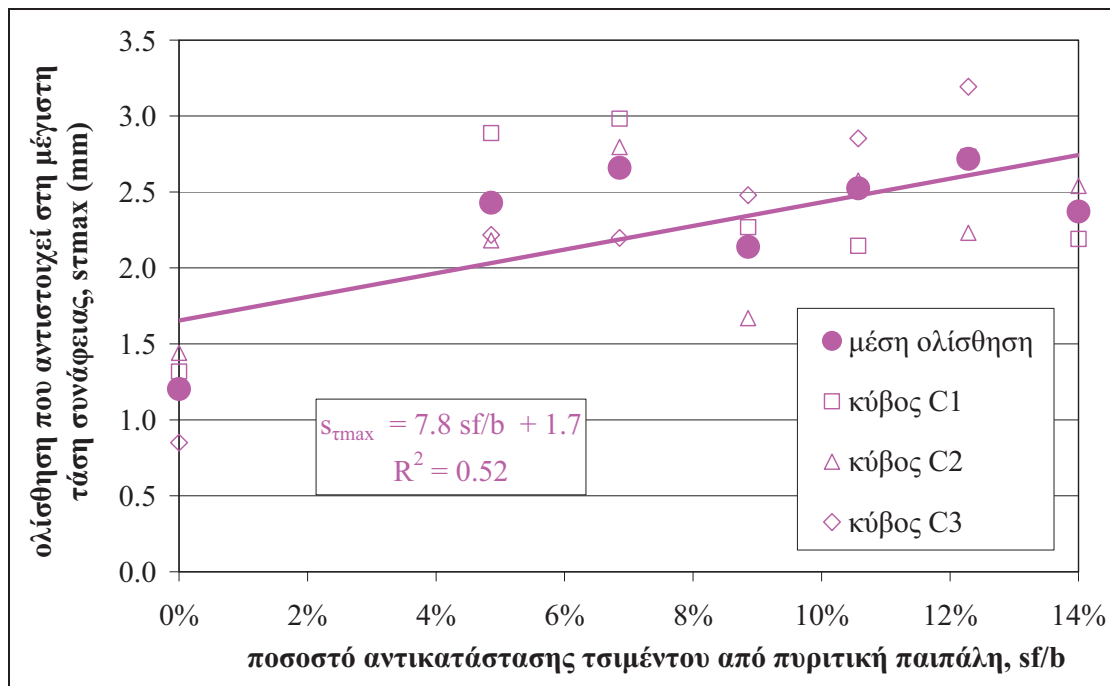
Η επιρροή του λόγου  $sf/b$  στην ολίσθηση  $s_{tmax}$  παρουσιάζεται στο **Σχήμα 130** και στο **Σχήμα 131** για τις υπο-ομάδες συνθέσεων B1 και B2, αντίστοιχα. Η ολίσθηση φαίνεται να αυξάνεται γραμμικά για μεγαλύτερους λόγους  $sf/b$ , αν και πάλι ηπιότερα στην περίπτωση της υπο-ομάδας συνθέσεων B2.



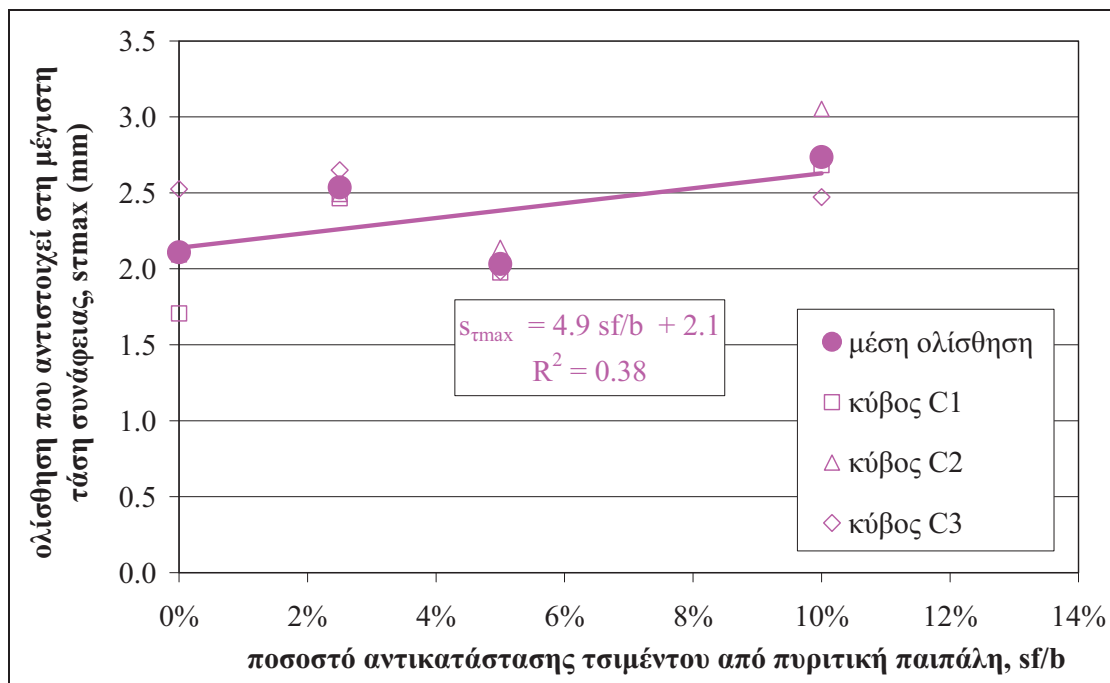
Σχήμα 128 Επιρροή λόγου  $sf/b$  (υπο-ομάδα συνθέσεων B1) στις ανηγμένες τάσεις συνάφειας,  $\tau/f_{cc}$



Σχήμα 129 Επιρροή λόγου  $sf/b$  (υπο-ομάδα συνθέσεων B2) στις ανηγμένες τάσεις συνάφειας,  $\tau/f_{cc}$



Σχήμα 130 Επιρροή λόγου  $sf/b$  στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{tmax}$

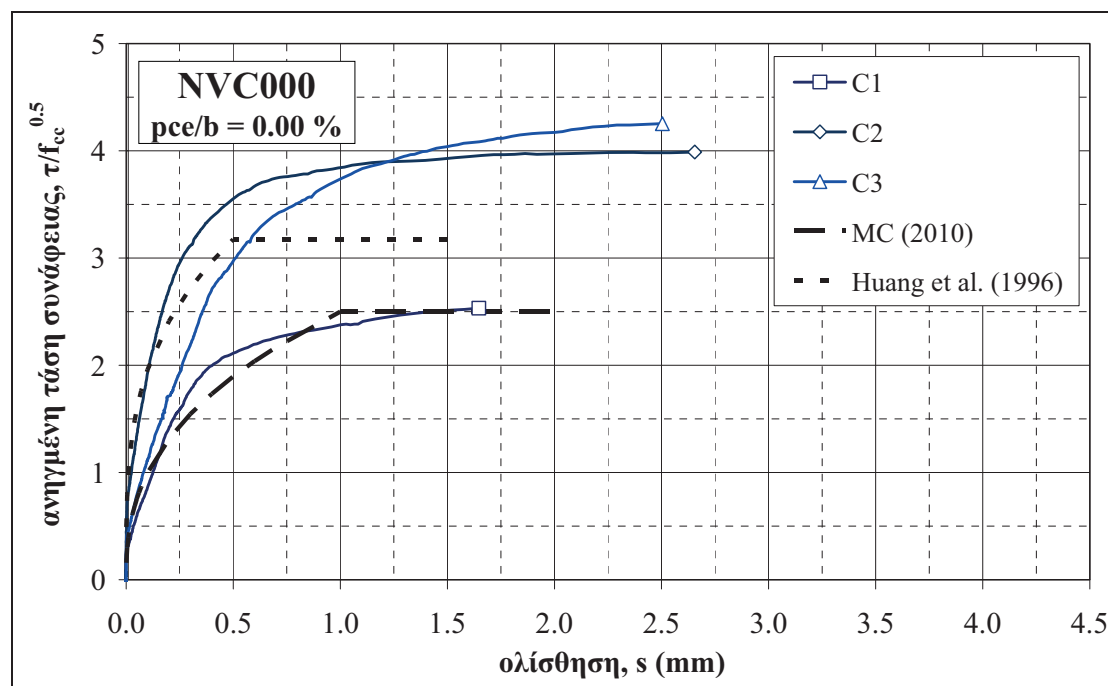


Σχήμα 131 Επιρροή λόγου  $sf/b$  στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{tmax}$

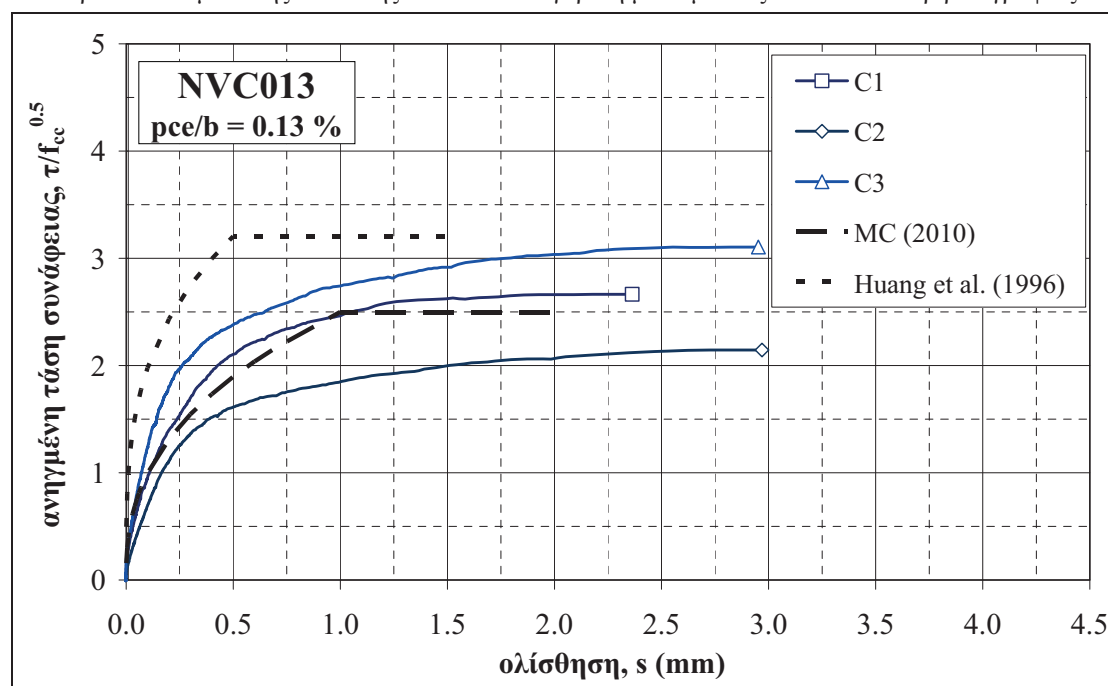
### 3.3.1.3. Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

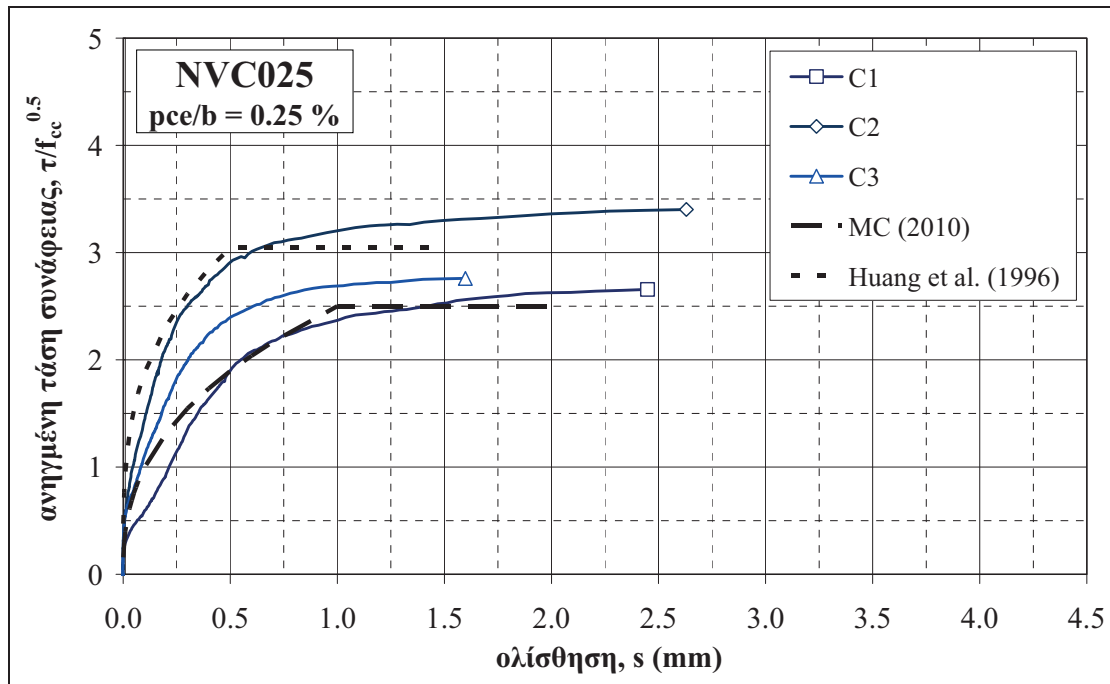
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 132 έως Σχήμα 136), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  (υπο-ομάδα συνθέσεων Ε, χωρίς θερμική καταπόνηση, Πίν. 41, Κεφ. 2) και του μίγματος αναφοράς NVCSF της υπο-ομάδας συνθέσεων Β2.



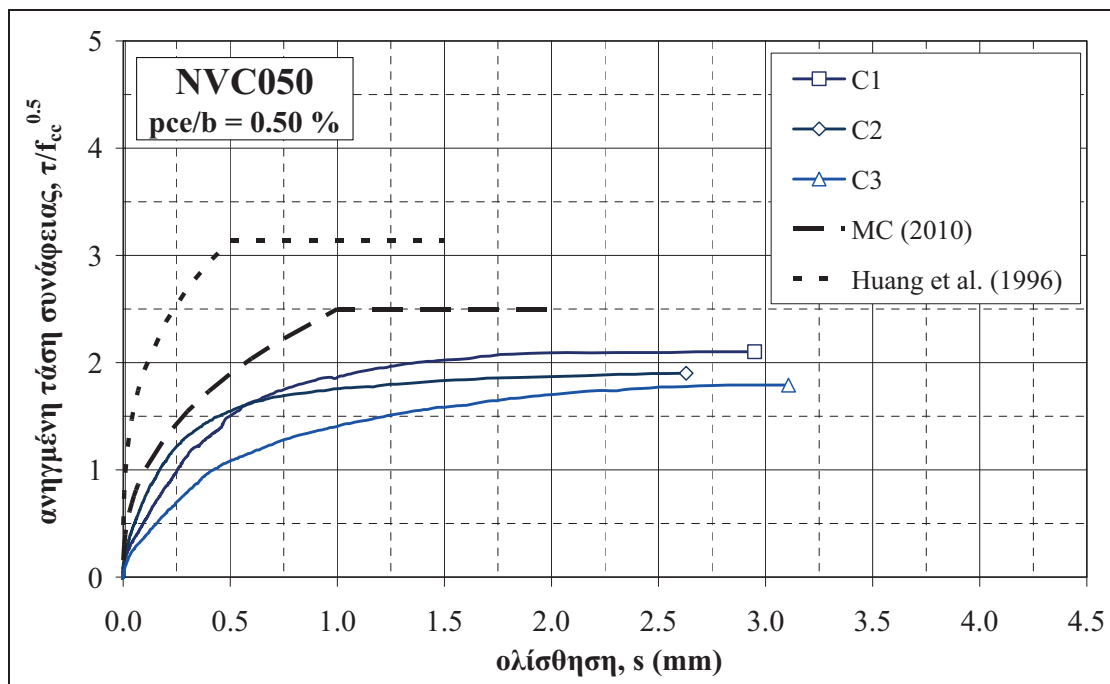
Σχήμα 132 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC000– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



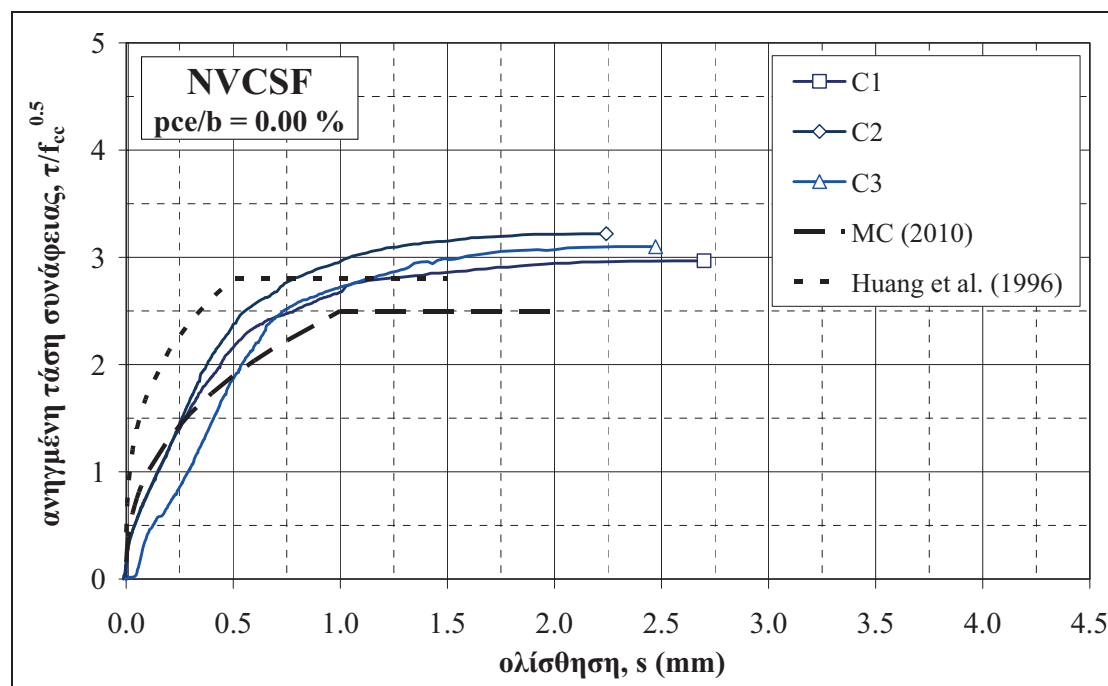
Σχήμα 133 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC013– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 134 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC025– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 135 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC050– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 136 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης NVCSF– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 74 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στα τρία κυβικά δοκίμια των μίγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  και του μίγματος αναφοράς NVCSF της υπο-ομάδας συνθέσεων B2. Στον Πίνακα σημειώνονται οι ράβδοι, στις οποίες η τάση εξόλκευσης ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO). Όσο αφορά στην τάση των ράβδων, αυτή ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα στα κυβικά δοκίμια C2 και C3 της σύνθεσης NVC000.

Πίνακας 74 Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμών, ανά σύνθεση ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  και μίγματος αναφοράς NVCSF

κωδικός σύνθεση	NVC000	NVC013	NVC025	NVC050	NVCSF
C1	PO	PO	PO	PO	PO
C2	PO*	PO	PO	PO	PO
C3	PO*	PO	PO	PO	PO

\*διαρροή χάλυβα

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 75 περιλαμβάνει τις αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας, ανηγμένες στην αντίστοιχη μέση θλιπτική αντοχή,  $\tau/f_{cc}$  (για  $\tau$ :  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  and  $\tau_{max}$ ), καθώς και οι τιμές της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$  (mm) για τα μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Για κάθε μίγμα και για κάθε ανηγμένη τάση ή για την ολίσθηση, έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές,  $m$  ή  $\tau_{cub}$ , και οι τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , των τριών επιμέρους δοκιμών που δοκιμάστηκαν. Επιπλέον, στην τελευταία στήλη κάθε πίνακα, έχουν υπολογιστεί οι μέσοι όροι (περιλαμβάνουν μόνο τα μίγματα της υπο-ομάδας συνθέσεων E), ώστε να είναι δυνατή μια μακροσκοπική αξιολόγηση συγκριτικά με τα μίγματα ΑΣΣ (Παρ. 3.3.1.1 και 3.3.1.2).



**Πίνακας 75** Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (μέσες τιμές,  $m$ , και τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma$ , τριών κυβικών δοκιμίων) μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ 

κωδικός		NVC000	NVC013	NVC025	NVC050	NVCSF	M.O.*
σύνθεση		NVC11	NVC13	NVC12	NVC14	NVC08	
$pce/b$		<b>0.00 %</b>	<b>0.13 %</b>	<b>0.25 %</b>	<b>0.50 %</b>	<b>0.00 %</b>	
$\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>2.16</b>	<b>1.59</b>	<b>1.71</b>	<b>0.97</b>	<b>1.25</b>	<b>1.60</b>
	$\sigma$	0.71	0.36	0.59	0.26	0.33	
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>1.71</b>	<b>1.19</b>	<b>1.37</b>	<b>0.79</b>	<b>1.23</b>	<b>1.27</b>
	$\sigma$	0.51	0.27	0.32	0.14	0.15	
$\tau_{m,int}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>3.09</b>	<b>2.29</b>	<b>2.45</b>	<b>1.64</b>	<b>2.58</b>	<b>2.37</b>
	$\sigma$	0.86	0.44	0.44	0.18	0.11	
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$m$	<b>3.59</b>	<b>2.64</b>	<b>2.84</b>	<b>1.93</b>	<b>3.13</b>	<b>2.75</b>
	$\sigma$	0.93	0.48	0.39	0.16	0.13	
$s_{tmax}$ (mm)	$m$	<b>2.3</b>	<b>2.8</b>	<b>2.2</b>	<b>2.9</b>	<b>2.5</b>	<b>2.5</b>
	$\sigma$	0.5	0.3	0.6	0.2	0.2	

\*Στον M.O. έχουν συνυπολογιστεί μόνο τα μίγματα της υπο-ομάδας συνθέσεων E

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 137 έως Σχήμα 140) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ καθεμίας εκ των τεσσάρων ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων και του λόγου  $pce/b$ .

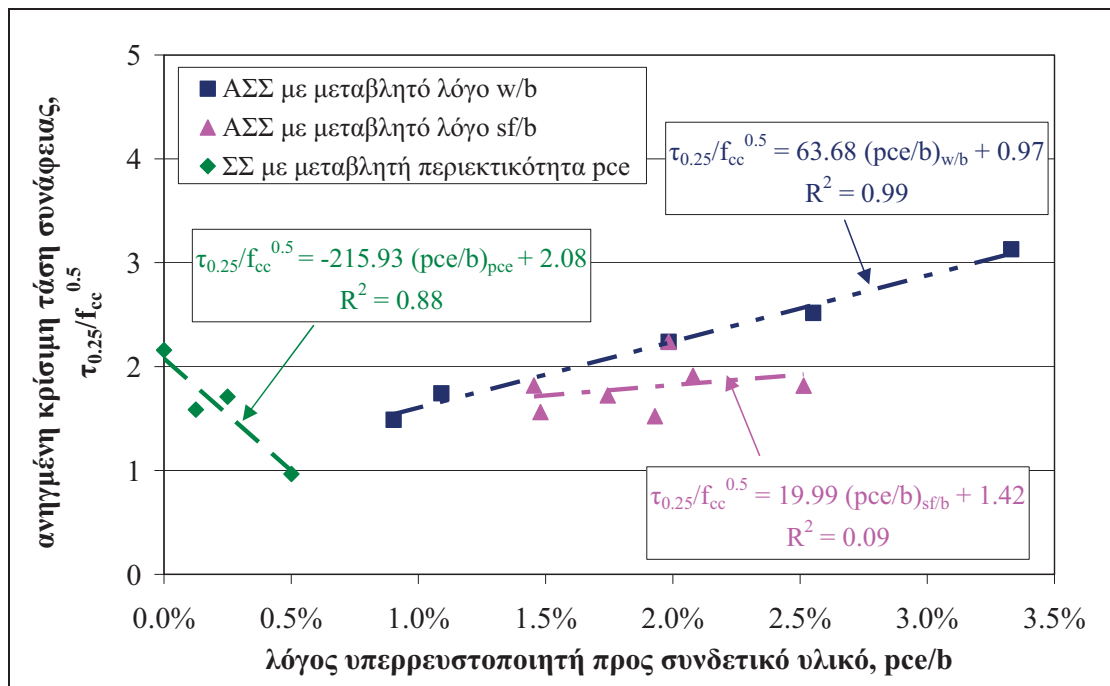
Όσο αφορά στη διερεύνηση του λόγου  $pce/b$  στα μίγματα ΑΣΣ, όπως και στην περίπτωση των λόγων  $w/b$  και  $sf/b$ , τα ευρήματα φαίνεται να είναι παρεμφερή μεταξύ των τάσεων  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$ , αλλά και μεταξύ των τάσεων  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ . Από τη μακροσκοπική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου  $pce/b$  στα μίγματα ΑΣΣ οδηγεί σε αύξηση όλων των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων. Σημειώνεται, πάντως, ότι η εν λόγω αύξηση είναι ισχυρά γραμμική μόνο στην περίπτωση των μιγμάτων μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μόνο για τις ανηγμένες τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$ , με συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0.99$  και στις δύο περιπτώσεις. Αντίθετα, για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις (μίγματα μεταβλητού λόγου  $sf/b$  για οποιαδήποτε αντιπροσωπευτική τάση ή μίγματα μεταβλητού λόγου  $w/b$  για τις τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ ), η αυξητική τάση είναι ασθενής και ενδεχομένως να οφείλεται σε τυχαία διακύμανση των αποτελεσμάτων.

Σημαντικά διαφορετική εικόνα παρουσιάζουν τα μίγματα ΣΣ, στα οποία πάντως ο λόγος  $pce/b$  περιορίζεται σε πολύ χαμηλότερες τιμές και μικρότερο εύρος. Συγκεκριμένα, για όλες τις περιπτώσεις αντιπροσωπευτικών τάσεων, η αύξηση του λόγου  $pce/b$  οδηγεί σε έντονη μείωση της ανηγμένης τάσης συνάφειας, η οποία είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση των τάσεων  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ . Οι συντελεστές συσχέτισης είναι σε όλες τις περιπτώσεις υψηλοί ( $R^2 > 0.81$ ).

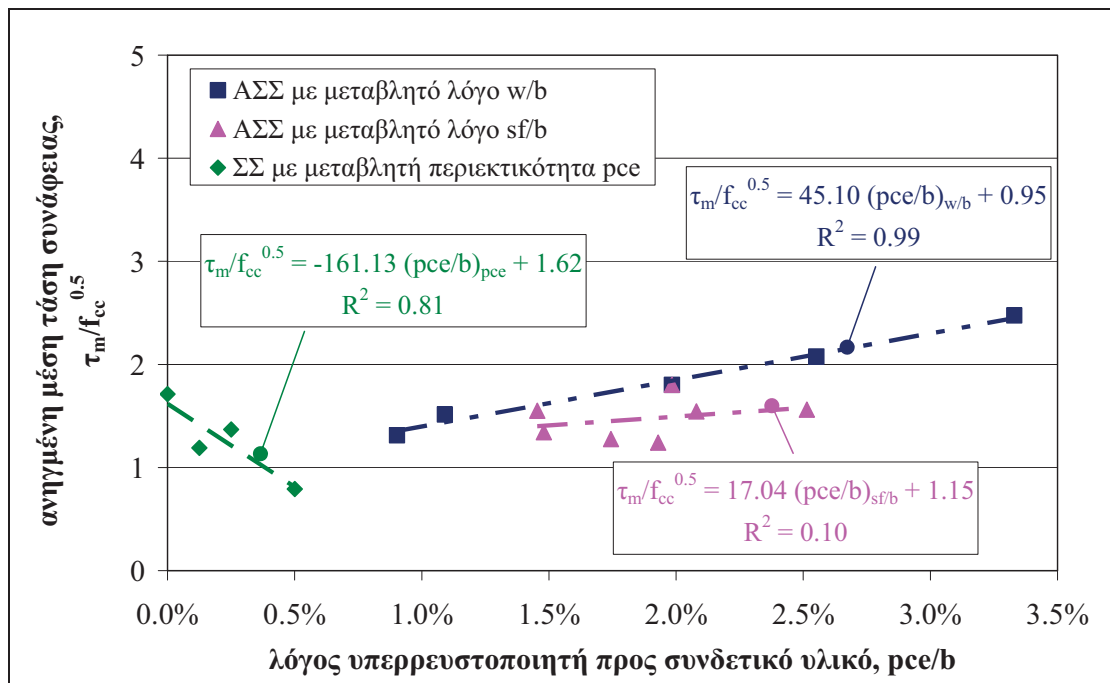
### 3.3.1.4. Επιρροή τύπου σκυροδέματος (ΑΣΣ & ΣΣ)

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

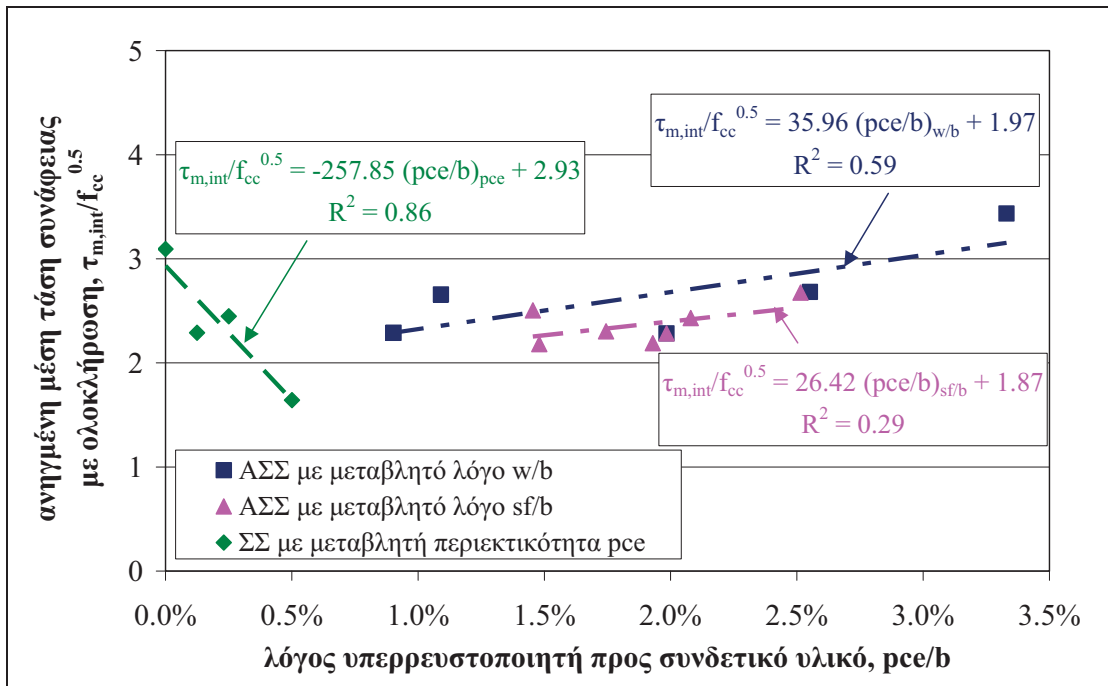
Αξιολογώντας μακροσκοπικά τις καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες Παραγράφους 3.3.1.1 έως 3.3.1.3, μπορεί να αναφερθεί ότι η διασπορά μεταξύ των καμπυλών που αφορούν στις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων ΑΣΣ είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την αντίστοιχη διασπορά των αντίστοιχων καμπυλών που αφορούν στο ΣΣ. Η παρατήρηση αυτή αφορά σε όλα τα χαρακτηριστικά συνάφειας, δηλαδή της δυσκαμψίας της καμπύλης, της μέγιστης αναπτυχθείσας τάσης συνάφειας,  $\tau_{max}$ , και της αντίστοιχης σε αυτήν ολίσθησης,  $s_{tmax}$ .



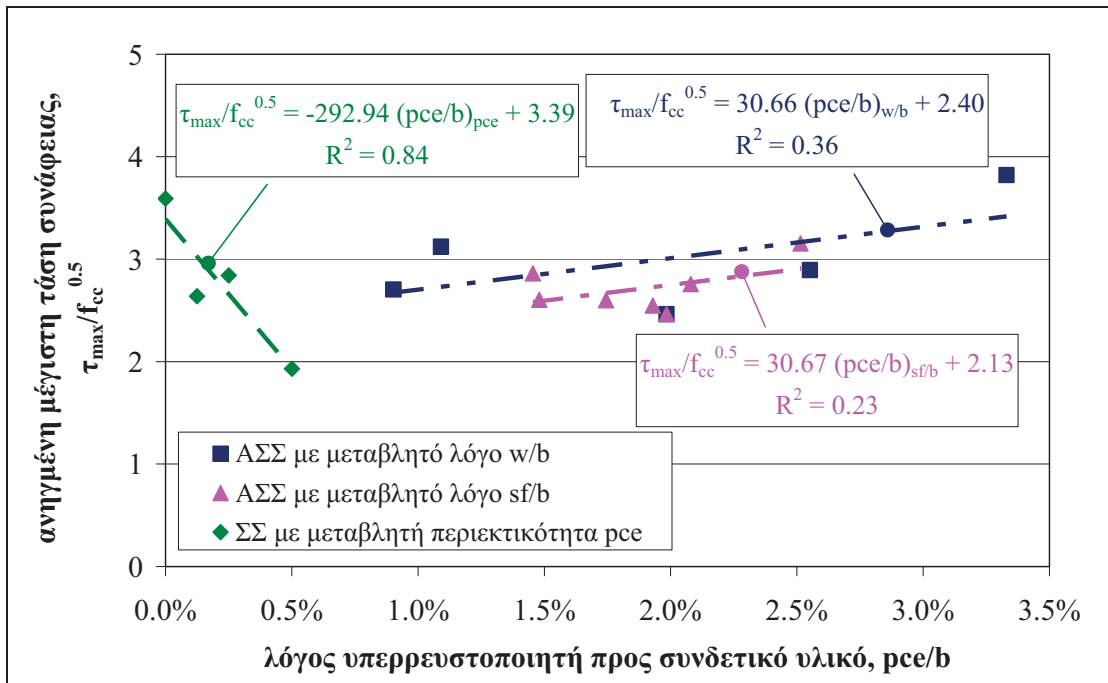
Σχήμα 137 Επιρροή λόγου pce/b στην ανηγμένη κρίσιμη τάση συνάφειας,  $\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$



Σχήμα 138 Επιρροή λόγου pce/b στην ανηγμένη μέση τάση συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$



Σχήμα 139 Επιρροή λόγου  $pce/b$  στην ανηγμένη μέση τάση συνάφειας με ολοκλήρωση,  $\tau_{m,int}/f_{cc}^{0.5}$



Σχήμα 140 Επιρροή λόγου  $pce/b$  στην ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$

Όσο αφορά στις αναλυτικές κανονιστικές καμπύλες για το ΣΣ του κανονισμού Model Code (2010), μπορεί να παρατηρηθεί ότι για το μίγμα SCCWB1 οι πειραματικές καμπύλες είναι ευμενέστερες των αναλυτικών, υπό την έννοια ότι έχουν τουλάχιστον ίση δυσκαμψία και μεγαλύτερη μέγιστη τάση  $\tau_{\max}$  και αντίστοιχη σε αυτήν ολίσθηση  $s_{\tau_{\max}}$  από εκείνες που υπολογίζονται αναλυτικά. Εξαιρουμένου του μίγματος SCCWB1, φαίνεται ότι μίγματα με χαμηλότερο λόγο  $w/b$  (SCCWB2, SCCWB3) απαιτούν σημαντικά χαμηλότερες τιμές της σταθεράς 'α', ώστε να περιγράφεται καλύτερα η δυσκαμψία (κλίση) της καμπύλης (Παρ. 3.2.3). Συγκεκριμένα, μία μείωση της σταθεράς 'α' κατά 25 % (από 0.4 σε 0.3), όπως προτείνεται και από τους Huang et al. (1996), φαίνεται να οδηγεί σε καλύτερη απεικόνιση της δυσκαμψίας των μιγμάτων. Από την άλλη πλευρά, για μίγματα με μεγαλύτερο λόγο  $w/b$  (SCCWB4, SCCWB5), μία μείωση της προβλεπόμενης μέγιστης τάσης,  $\tau_{\max}$ , κατά 20 %, σε  $2.0 f_{cc}^{0.5}$ , μπορεί να απαιτηθεί, καθώς ο κανονισμός Model Code (2010) τείνει είτε να υπερεκτιμά την πραγματική  $\tau_{\max}$  ή να συγκλίνει με τις πειραματικές τιμές, μειώνοντας έτσι το περιθώριο ασφαλείας. Θα πρέπει, πάντως, να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μείωση αφορά υπολογισμό με τη μέση θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$ , αντί της χαρακτηριστικής αντοχής,  $f_{ck}$ . Επομένως, η μείωση της προβλεπόμενης μέγιστης τάσης βάσει της χαρακτηριστικής αντοχής ενδεχομένως θα είναι ελαφρώς μικρότερη. Μια αντίστοιχη μείωση της προβλεπόμενης  $\tau_{\max}$  μπορεί, επιπλέον, να απαιτηθεί και για τα μίγματα ΣΣ, ειδικά για εκείνα με μεγαλύτερη εργασιμότητα (NVC050).

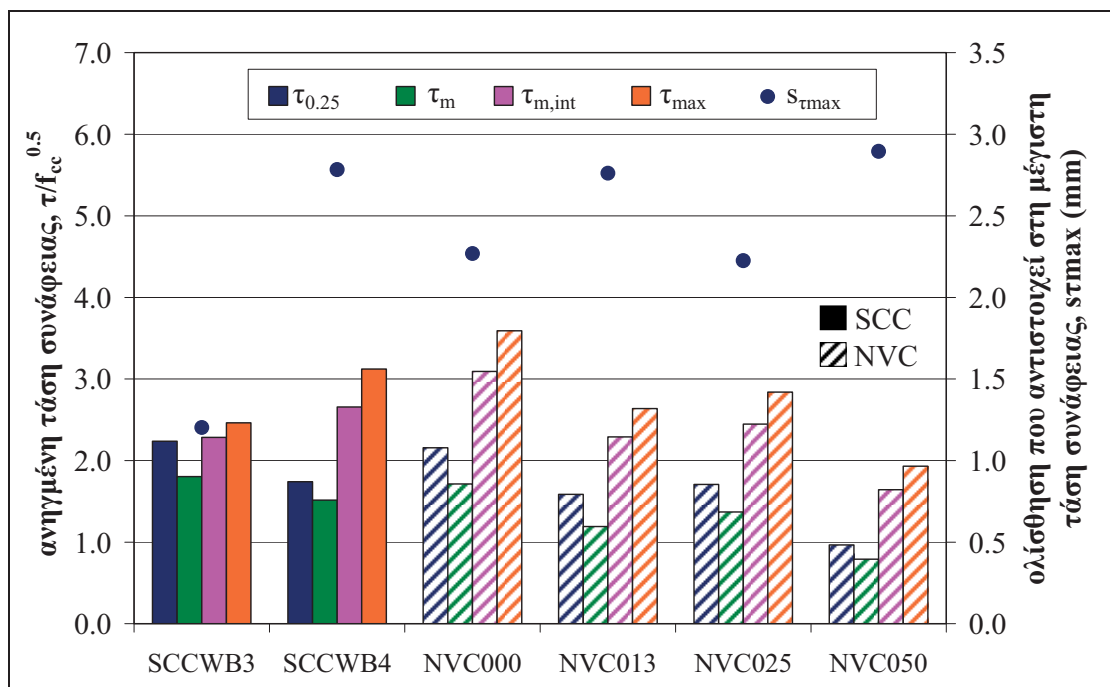
#### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Συγκρίνοντας τους συνολικούς μέσους όρους κάθε αντιπροσωπευτική τάσης συνάφειας ( $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{\max}$ ) μεταξύ των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οποιαδήποτε αντιπροσωπευτική ανηγμένη τάση συνάφειας για το ΑΣΣ είναι εν γένει υψηλότερη ή το λιγότερο ίση με την αντίστοιχη ανηγμένη τάση συνάφειας για το ΣΣ. Αξίζει να σημειωθεί ότι άλλοι ερευνητές έχουν καταλήξει σε αρκετά διαφορετικά, ακόμη και αλληλοσυγκρουόμενα, συμπεράσματα. Ειδικότερα, υπάρχουν προγενέστερες μελέτες της βιβλιογραφίας που έχουν αποδείξει ότι το ΑΣΣ αναπτύσσει υψηλότερες [Desnerck et al. (2010b), Almeida Filho et al. (2008a), Valcuende and Parra (2009), Hassan et al. (2010), Foroughi et al (2008), Domone (2007), Sonebi and Bartos (2002), Sonebi and Bartos (1999)] ή χαμηλότερες [Esfahani et al. (2008), Koning et al. (2001), Schiessl and Zilch (2001)] ή και παρεμφερείς [Almeida Filho et al. (2008a), Valcuende and Parra (2009), Esfahani et al. (2008), Domone (2007), Gibbs and Zhu (1999), Lorrain and Daoud (2002)] τάσεις συνάφειας εν σχέσει προς το ΣΣ. Τα εν λόγω αντίθετα ευρήματα έχουν, πάντως, αποδοθεί στις διαφορές μεταξύ των μιγμάτων σκυροδέματος, τις πειραματικές συνθήκες και τις διατάξεις [Castel et al. (2006)]. Επιπλέον, δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός ότι μέρος των διαφορών στα ευρήματα οφείλεται στις διαφορετικές διαδικασίες ανάλυσης των αποτελεσμάτων, υπό την έννοια της επιλογής της αντιπροσωπευτικής τάσης συνάφειας για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ένα άλλο σημαντικό εύρημα είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα μίγματα ΑΣΣ παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη διασπορά των τιμών της τάσης συνάφειας (όπως αυτή εκτιμάται από τις τυπικές αποκλίσεις των τριών δοκιμίων που ελέγχθηκαν). Η παρατήρηση αυτή έχει επιβεβαιωθεί από προγενέστερες σχετικές μελέτες [Chan et al. (2003), Almeida Filho et al. (2008a), Almeida Filho et al. (2008)]. Η αντίστοιχη διασπορά για τα μίγματα ΣΣ είναι, εν γένει, σημαντικά

υψηλότερη, ειδικά όταν συγκρίνεται με τη διασπορά των τιμών των μιγμάτων ΑΣΣ με υψηλότερους λόγους  $w/b$  και  $sf/b$ .

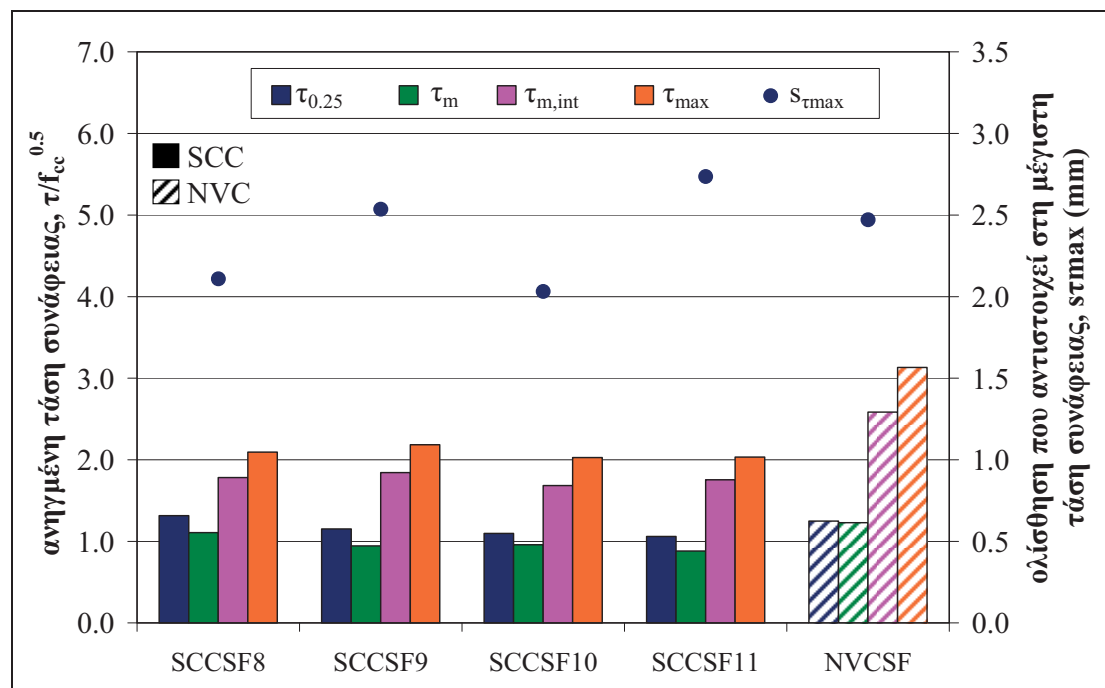
Μια πιο ακριβής σύγκριση μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταξύ των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ ίδιου λόγου  $w/b = 0.51$  ή ίδιας μέσης θλιπτικής αντοχής,  $f_{cc} \sim 50 \text{ N/mm}^2$ . Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 141** η σύνθεση SCCWB3 ( $w/b = 0.51$ ) και η σύνθεση SCCWB4 ( $f_{cc} \sim 50 \text{ N/mm}^2$ ) συγκρίνονται με τα μίγματα ΣΣ ( $w/b = 0.51$ ,  $f_{cc} \sim 50 \text{ N/mm}^2$ ), ως προς τις τέσσερις αντιπροσωπευτικές τάσεις,  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ , ανηγμένες στην τετραγωνική ρίζα της μέσης θλιπτικής αντοχής, καθώς και ως προς την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση,  $s_{\tau_{max}}$ . Παρατηρείται ότι, για τις αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$ , το μίγμα NVC000 αναπτύσσει πρακτικώς ίσες ή οριακά μεγαλύτερες ανηγμένες τάσεις από τα μίγματα SCCWB3 και SCCWB4, αντίστοιχα. Η σταδιακά αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή (από το μίγμα NVC000 προς το μίγμα NVC050) φαίνεται, πάντως, να μειώνει τις αντίστοιχες ανηγμένες τάσεις. Από την άλλη πλευρά, για τις αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ , το μίγμα NVC000 αναπτύσσει εμφανώς μεγαλύτερες ανηγμένες τάσεις από τα δύο μίγματα ΑΣΣ, οι οποίες είναι έως και περίπου κατά περίπου 50 % αυξημένες στο ΣΣ για την περίπτωση του ίδιου λόγου  $w/b$  (σύγκριση NVC000 με SCCWB3), ενώ και στην περίπτωση αυτή η σταδιακά αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή φαίνεται να μειώνει τις τιμές των ανηγμένων τάσεων. Όσο αφορά στην ολίσθηση  $s_{\tau_{max}}$  του ΑΣΣ, αυτή φαίνεται να είναι αρκετά χαμηλότερη από την αντίστοιχη ολίσθηση του ΣΣ για την περίπτωση ίδιου λόγου  $w/b$ , αλλά πρακτικώς ίση ή μεγαλύτερη από οποιαδήποτε ολίσθηση των ΣΣ για την περίπτωση ίδιας μέσης θλιπτικής αντοχής.



**Σχήμα 141** Σύγκριση αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας και ολίσθησεων μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ ίδιου λόγου  $w/b$  (0.51) ή ίδιας μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cc}$  ( $\sim 50 \text{ N/mm}^2$ )

Μία δεύτερη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ μιγμάτων με κοινή κεντρική σύνθεση, χωρίς όμως ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ στα μίγματα ΑΣΣ, και ίδιο λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b = 0.62$ , παρουσιάζεται στο **Σχήμα 142**. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μίγματα ΑΣΣ της υπο-ομάδας

συνθέσεων B2, με μεταβλητό λόγο  $sf/b$  από 0.0 έως 10.0 %, και ένα μίγμα αναφοράς ΣΣ. Όπως και προηγουμένως, οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  είναι πρακτικώς ίσες μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος, ενώ οι ανηγμένες τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$  είναι έως και 50 % υψηλότερες στο ΣΣ. Όσο αφορά στις ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας, φαίνεται ότι είναι ελαφρώς χαμηλότερες στο ΑΣΣ ή το πολύ ίσες μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος.



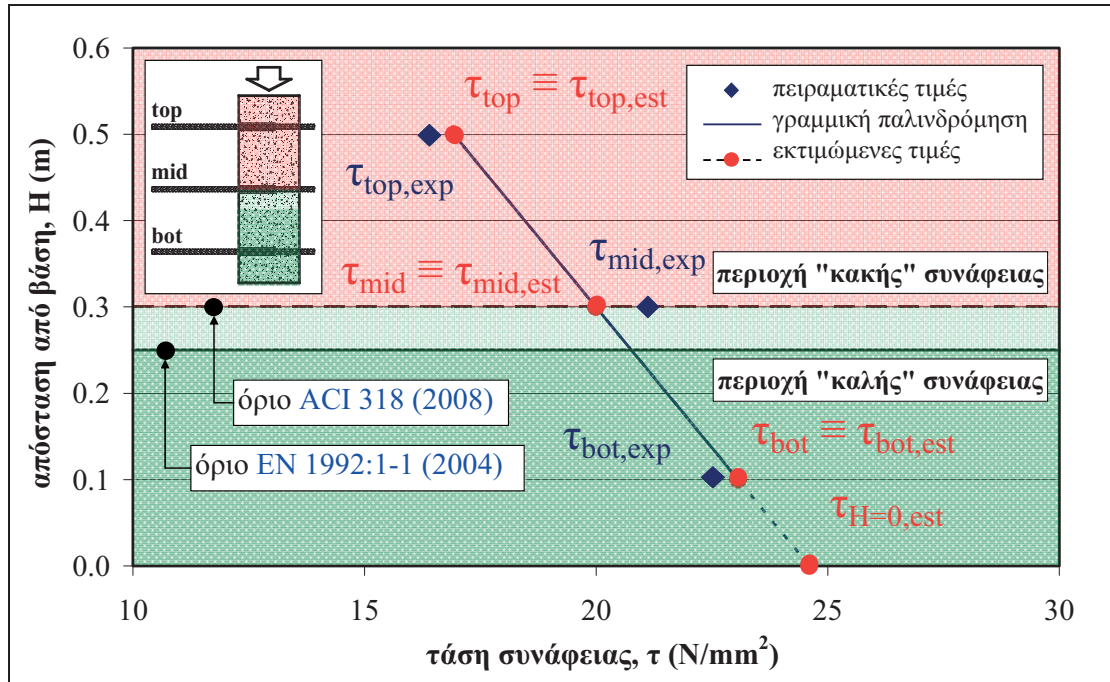
Σχήμα 142 Σύγκριση αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας και ολισθήσεων μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  με μίγμα αναφοράς ΣΣ ίδιου λόγου  $w/b$  (0.62)

### 3.3.2. Επιρροή θέσης ράβδου καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)

Για τη διερεύνηση του φαινομένου άνω ράβδων και, συγκεκριμένα, της έντασής του, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της σύνθεσης ΑΣΣ, καθώς και για τη σύγκριση με τυπικές συνθέσεις ΣΣ, εξετάστηκαν συγκριτικά οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{max}$  και  $\tau_m$ , όπως αυτές προέκυψαν για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων (μικρού ή μεγάλου ύψους). Οι άλλες δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις,  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_{m,int}$ , δεν εξετάστηκαν περαιτέρω, μιας και, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των κυβικών δοκιμίων και τα οποία θα σχολιάστηκαν αναλυτικά στην Παρ. 3.3.1, τα ευρήματά τους οδηγούν σε παραπλήσια αποτελέσματα με τις τάσεις  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ , αντίστοιχα.

Για κάθε κατακόρυφο δοκίμιο μικρού ύψους και για κάθε μία εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων, πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση (Σχήμα 143) μεταξύ των πειραματικών τιμών της τάσης συνάφειας,  $\tau_{bot,exp}$ ,  $\tau_{mid,exp}$  και  $\tau_{top,exp}$ , των τριών υπό έλεγχο ράβδων  $B_{bot}$ ,  $B_{mid}$  και  $B_{top}$  (εξαρτημένη μεταβλητή), αντίστοιχα, και της απόστασής τους,  $H$  (m), από τη βάση του δοκιμίου (ανεξάρτητη μεταβλητή). Στη συνέχεια, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούνται οι εκτιμώμενες, μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης, τιμές των τάσεων συνάφειας,  $\tau_{bot,est}$ ,  $\tau_{mid,est}$  και  $\tau_{top,est}$ . Για την απλοποίηση των συμβολισμών, για τις εκτιμώμενες τιμές θα χρησιμοποιούνται εφεξής τα σύμβολα  $\tau_{bot}$ ,  $\tau_{mid}$  και  $\tau_{top}$ . Για κάθε αντιπροσωπευτική τάση που εξετάστηκε, την  $\tau_m$  και την  $\tau_{max}$ , οι συνθέσεις

συγκρίνονται ως προς τους λόγους τάσεων συνάφειας ( $\alpha$ ) άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$ , και ( $\beta$ ) μεσαίας προς κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ .



Σχήμα 143 Γραφική απεικόνιση διαδικασίας ανάλυσης κατακόρυφων δοκιμίων

Αντιστοίχως, για κάθε κατακόρυφο δοκίμιο μεγάλου ύψους και για κάθε μία εκ των αντιπροσωπευτικών τάσεων  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ , πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των πειραματικών τιμών της τάσης συνάφειας,  $\tau_{B1,exp}$  έως  $\tau_{B9,exp}$ , των εννέα υπό έλεγχο ράβδων B1 έως B9 (εξαρτημένη μεταβλητή), αντίστοιχα, και της απόστασής τους,  $H$  (m), από τη βάση του δοκιμίου (ανεξάρτητη μεταβλητή). Στη συνέχεια, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούνται οι εκτιμώμενες, μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης, τιμές των τάσεων συνάφειας,  $\tau_{B1,est}$  έως  $\tau_{B9,est}$ . Για την απλοποίηση των συμβολισμών, για τις διορθωμένες τιμές θα χρησιμοποιούνται εφεξής τα σύμβολα  $\tau_{B1}$  έως  $\tau_{B9}$ . Για κάθε αντιπροσωπευτική τάση που εξετάστηκε, την  $\tau_m$  και την  $\tau_{max}$ , οι συνθέσεις συγκρίνονται ως προς τους λόγους τάσεων συνάφειας καθεμίας εκ των ράβδων B2 έως B9 προς την αντίστοιχη τάση συνάφειας της ράβδου B1,  $\tau_{Bi}/\tau_{B1}$  ( $i = 2$  έως 9).

Για κάθε περίπτωση, οι υπολογιζόμενοι λόγοι αξιολογούνται, επίσης, ως προς την επάρκειά τους, σύμφωνα με τις προδιαγραφές διεθνών κατασκευαστικών κανονισμών [EN 1992:1-1 (2004), ACI 318/318R (2008), Model Code (2010)]. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και γραφικά στο Σχήμα 143, ο ευρωπαϊκός κανονισμός EN 1992:1-1 (2004) και ο Model Code (2010) προδιαγράφουν μία μείωση της αντοχής σε συνάφεια των κάτω ράβδων κατά 70 % για ράβδους που βρίσκονται στην ανώτερη περιοχή «κακής» συνάφειας μέλους με βάθος 600 mm ή μεγαλύτερου και, συγκεκριμένα, άνω των 250 ή 300 mm, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, ο αμερικάνικος κανονισμός ACI 318/318R (2008) προδιαγράφει έναν συντελεστή θέσης οπλισμού (rebar location factor) ίσο με 1.3, για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης ράβδων που βρίσκονται σε θέσεις άνω των 300 mm από τη βάση βαθέων μελών. Ο εν λόγω συντελεστής θέσης οδηγεί σε μία μείωση της αντοχής σε συνάφεια που αντιστοιχεί στις προδιαγραφές των άλλων δύο κανονισμών.

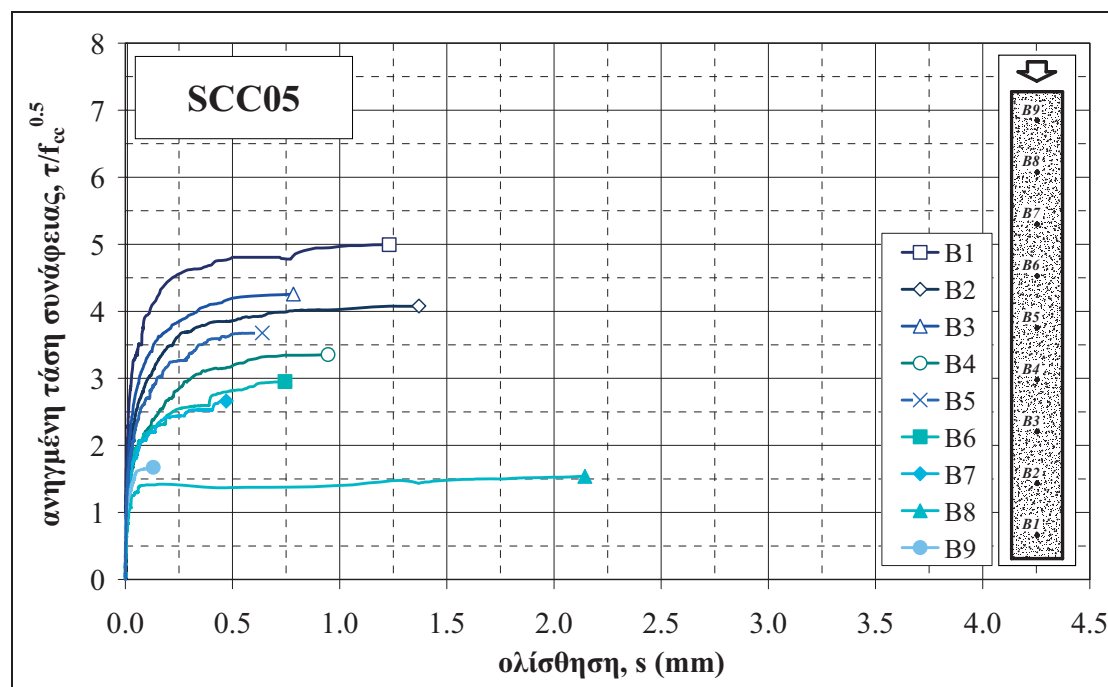
### 3.3.2.1. Διάφορες συνθέσεις<sup>3</sup>

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 144 έως Σχήμα 153), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους για τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ διαφόρων συνθέσεων. Οι εν λόγω συνθέσεις δεν έχουν κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμες. Παρ' όλα αυτά, από την αξιολόγησή τους είναι δυνατός ένας γενικότερος σχολιασμός του φαινομένου άνω οπλισμών.

#### Μεταβολή τάσεων καθ' ύψος

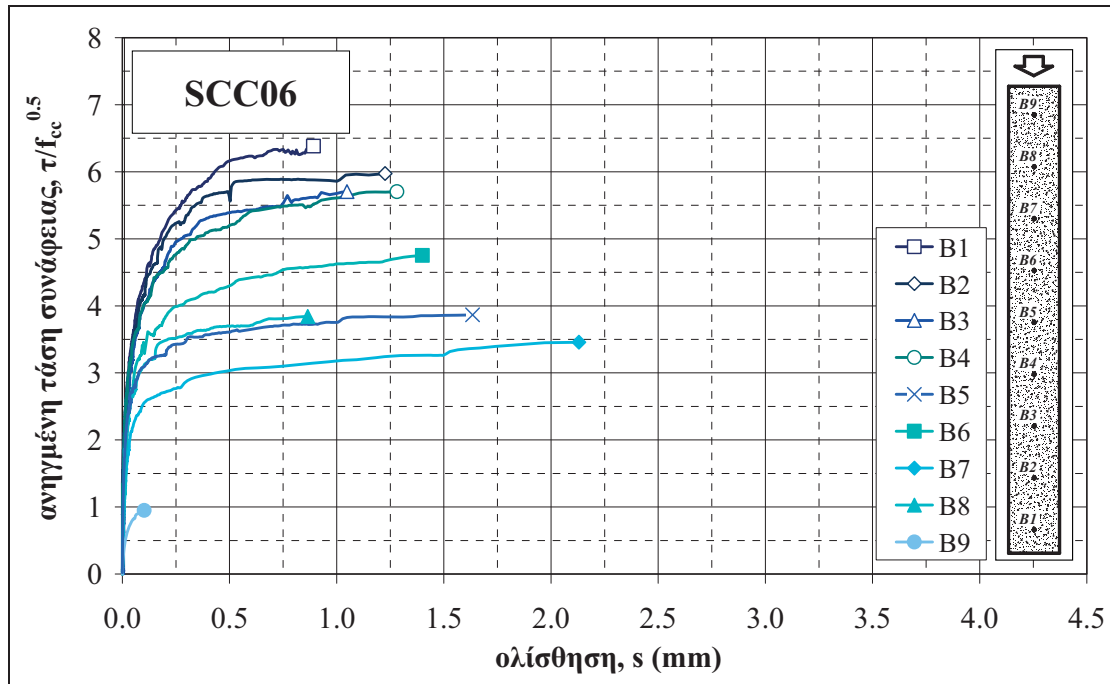
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 154 έως Σχήμα 155) παρουσιάζονται οι γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ των ανηγμένων τιμών των τριών αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας (κρίσιμη τάση  $\tau_{0,25}$ , μέση τάση  $\tau_m$  και μέγιστη τάση  $\tau_{max}$ ) για όλα τα κατακόρυφα δοκίμια μεγάλου ύψους που παρασκευάστηκαν με μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ. Παρατηρείται ότι οι μειώσεις των τάσεων καθ' ύψος των κατακόρυφων δοκιμίων ΑΣΣ είναι εν γένει ίσες ή μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μειώσεις για το ΣΣ.



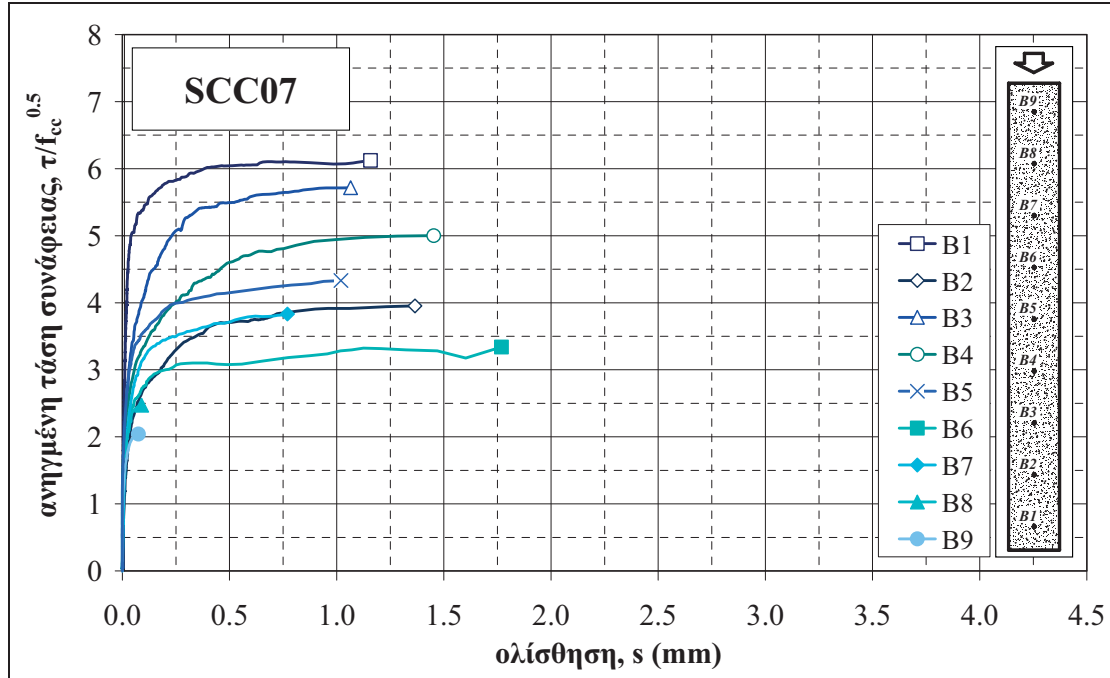
Σχήμα 144 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολισθήσης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC05

<sup>3</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν ανακοινωθεί στο 6<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο RILEM για το ΑΣΣ [Trezos et al. (2010)]

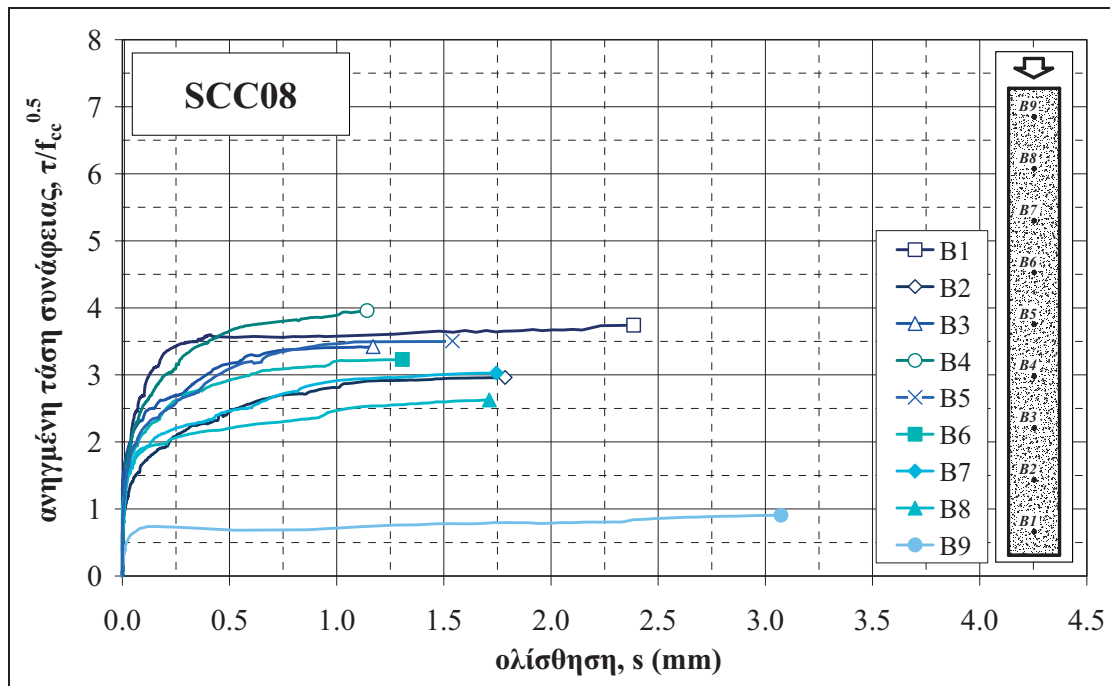




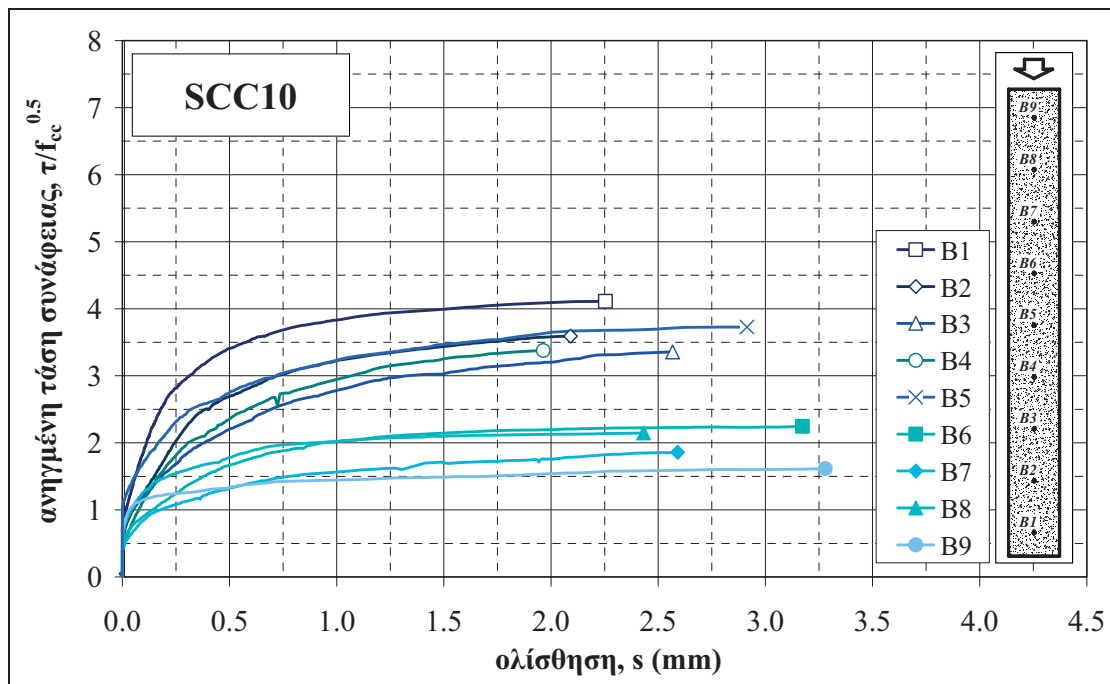
Σχήμα 145 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC06



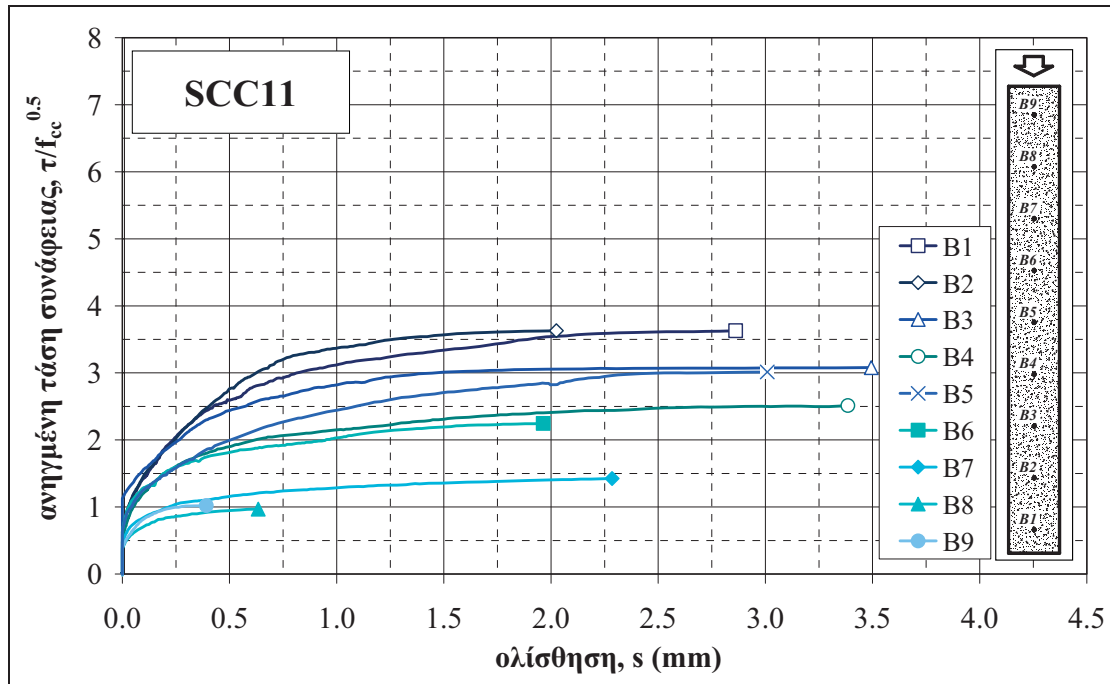
Σχήμα 146 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC07



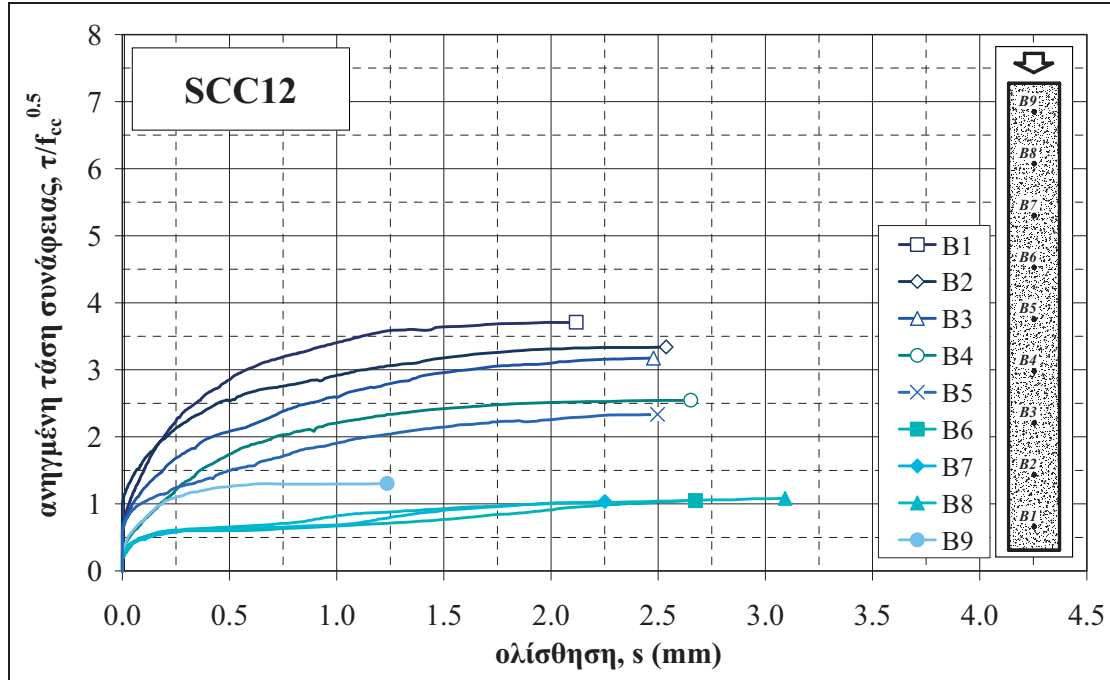
Σχήμα 147 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC08



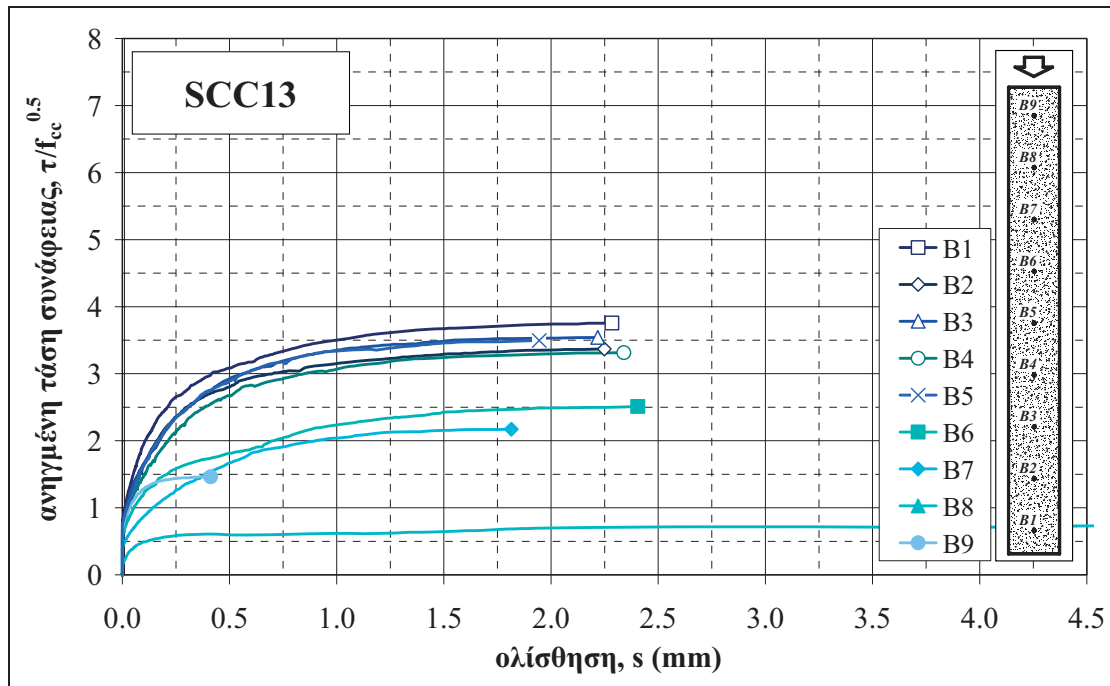
Σχήμα 148 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC10



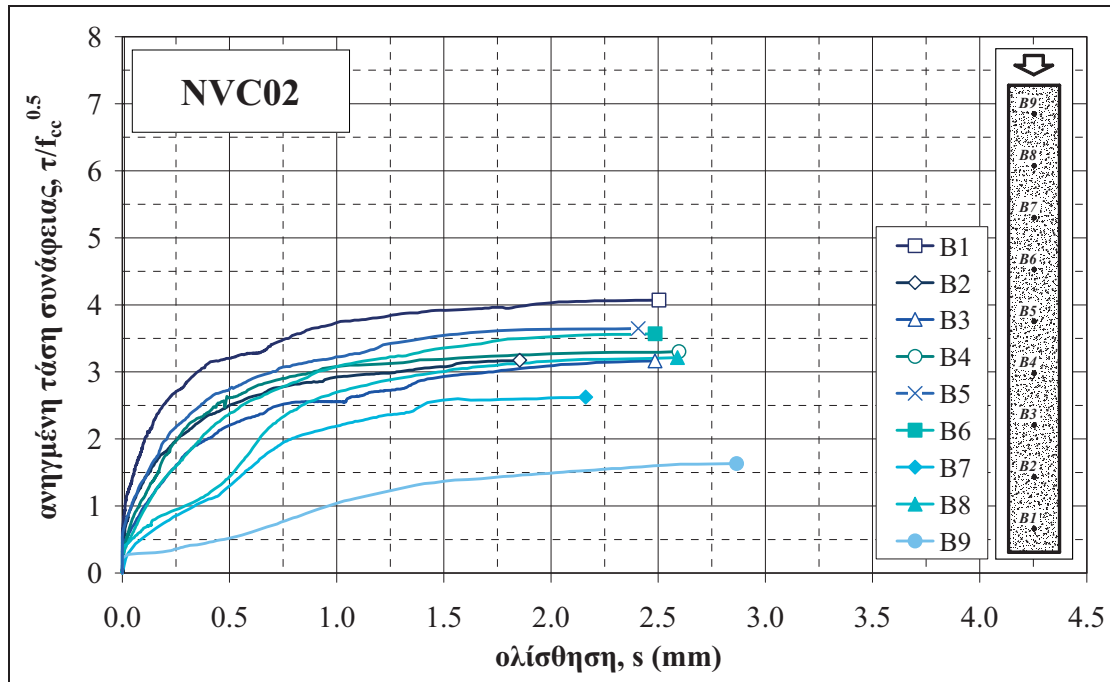
Σχήμα 149 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC11



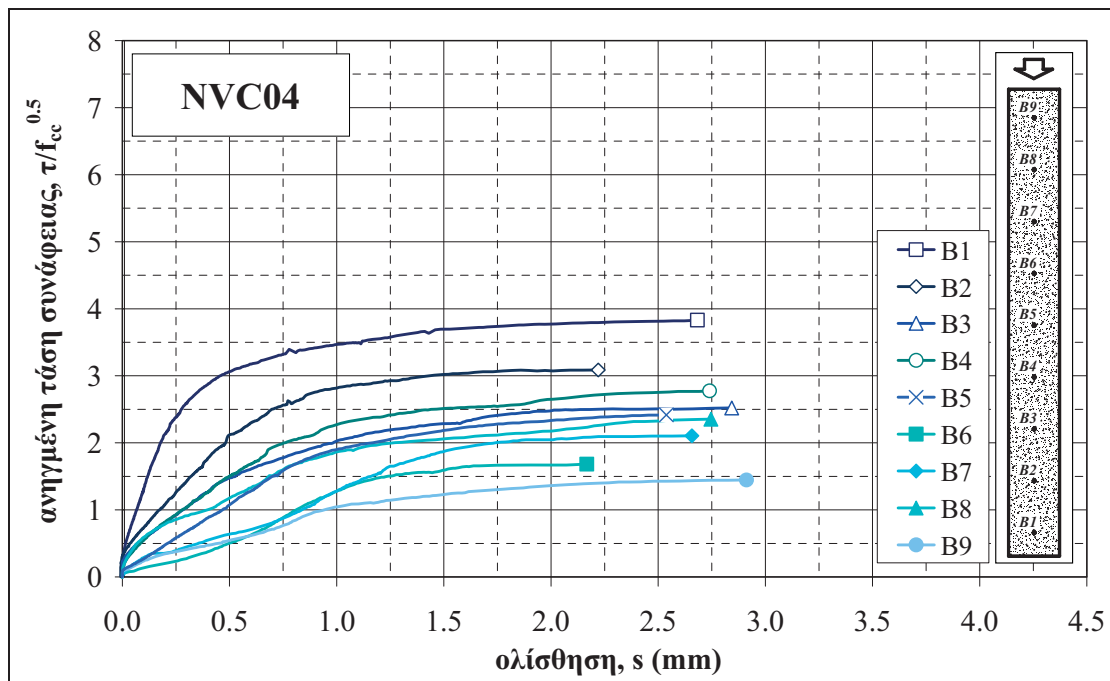
Σχήμα 150 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC12



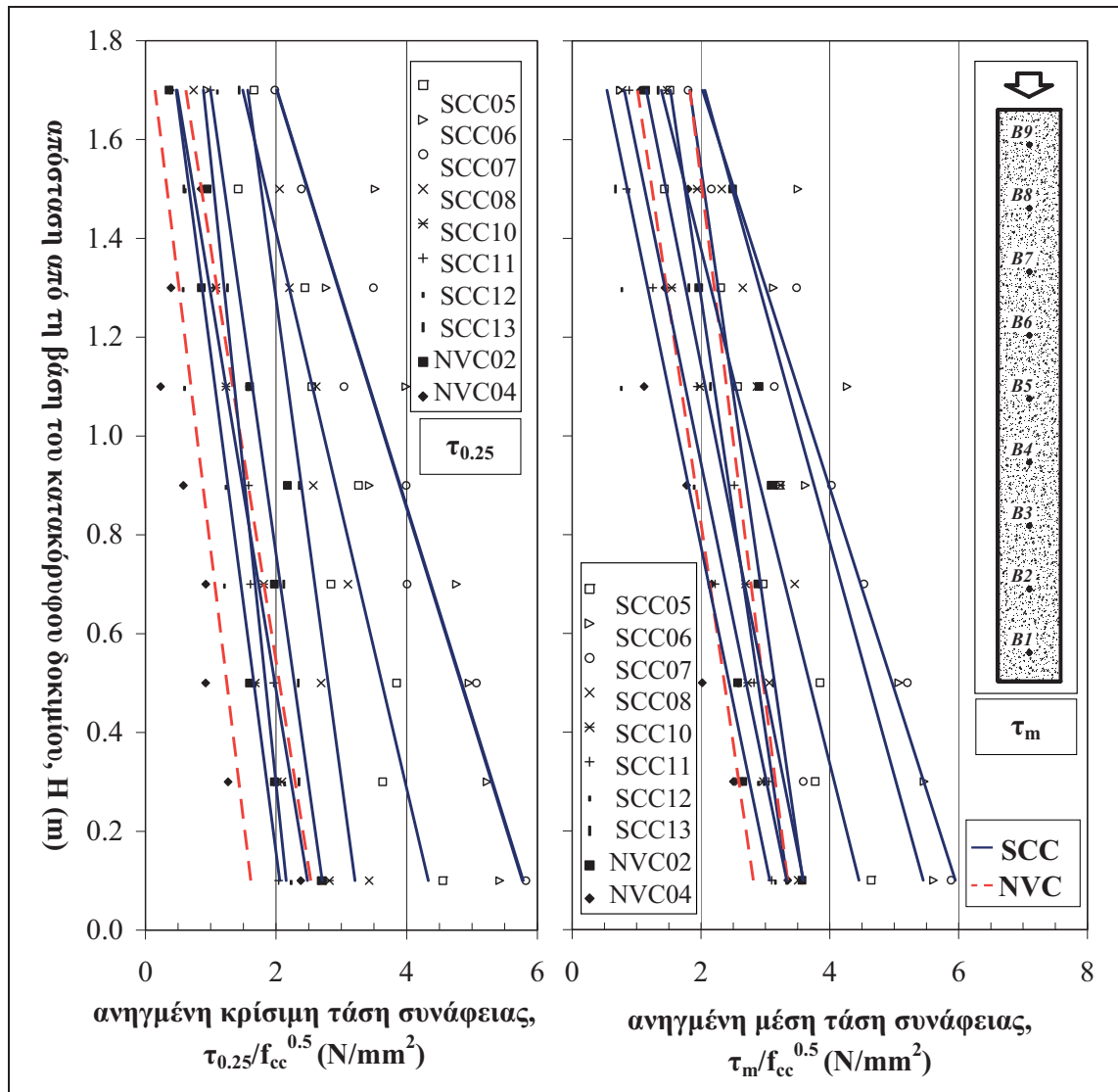
Σχήμα 151 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης SCC13



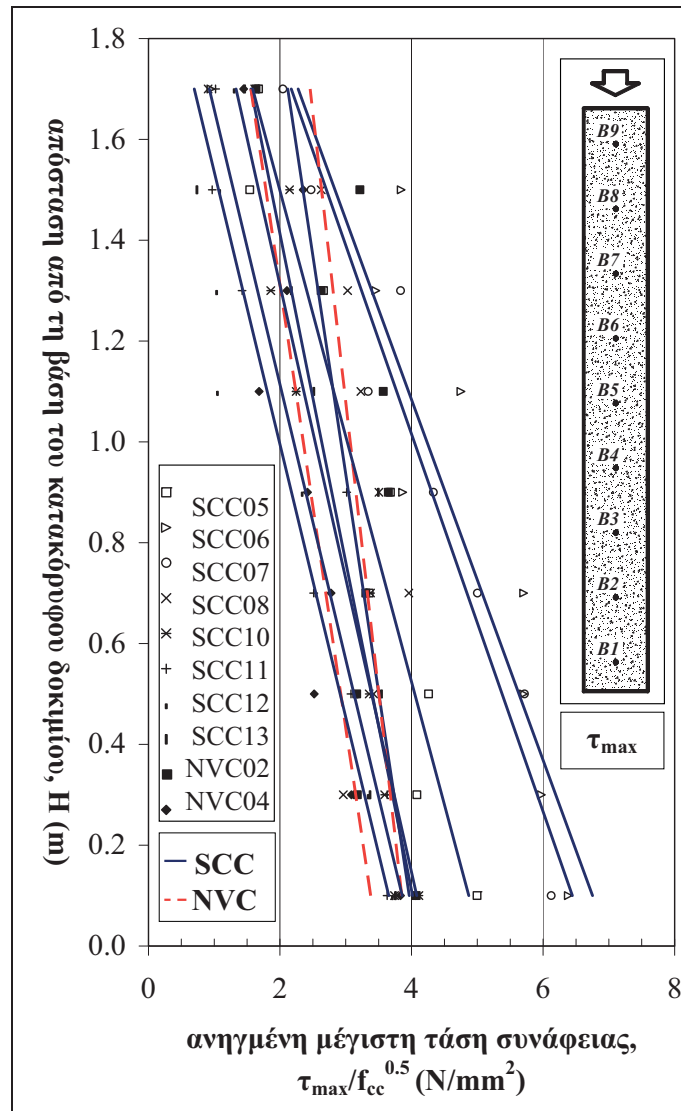
Σχήμα 152 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης NVC02



Σχήμα 153 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μεγάλου ύψους της σύνθεσης NVC04



Σχήμα 154 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) κρίσιμων και (β) μέσων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μεγάλου ύψους για διάφορες συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ

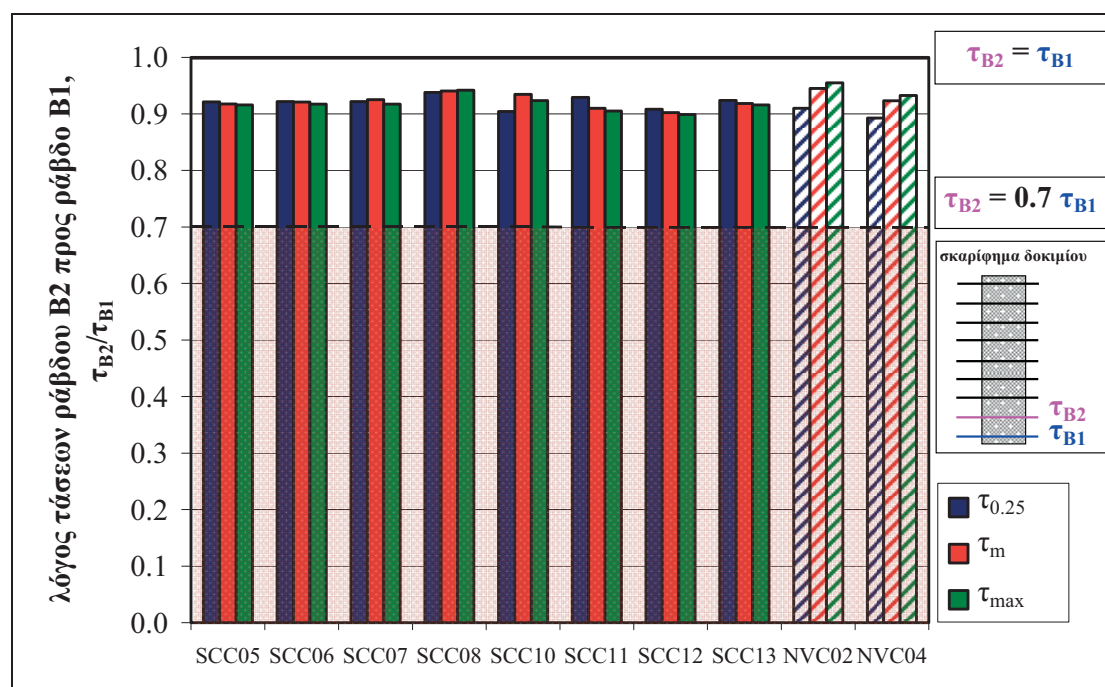


**Σχήμα 155** Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μεγάλου ύψους για διάφορες συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ

### Φαινόμενο άνω οπλισμών

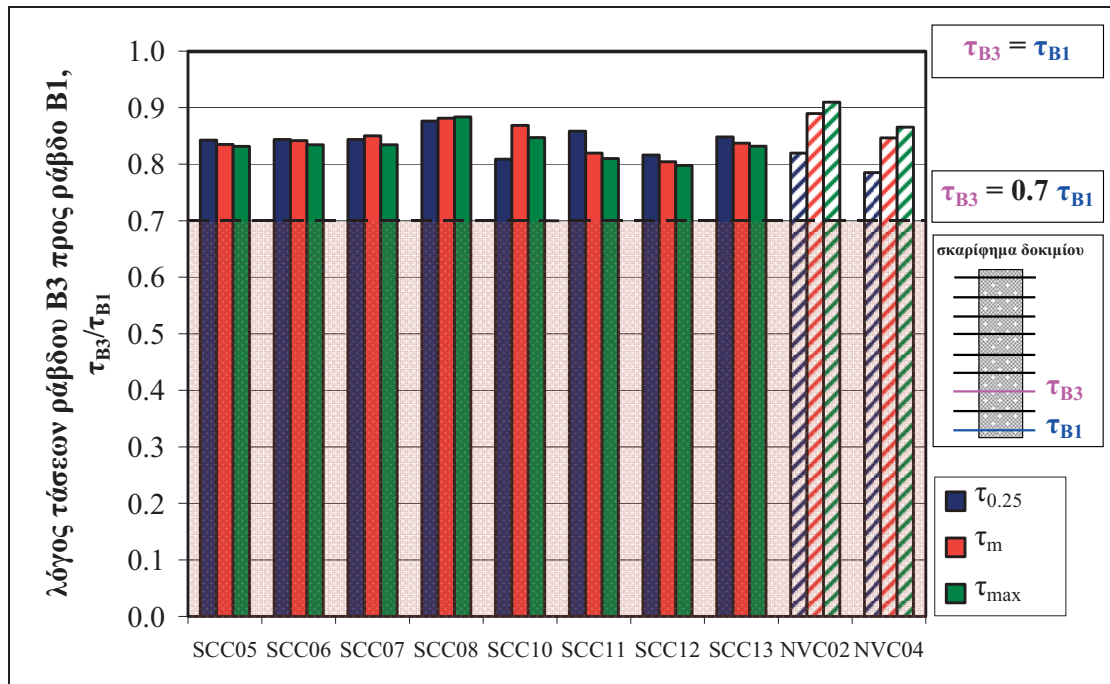
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 156 έως Σχήμα 163) αξιολογείται συγκριτικά μεταξύ των κατακόρυφων δοκιμίων ΑΣΣ και ΣΣ μεγάλου ύψους η μείωση των τάσεων συνάφειας σε κάθε στάθμη. Για τον υπολογισμό των λόγων των τριών αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας (κρίσιμη τάση  $\tau_{0,25}$ , μέση τάση  $\tau_m$  και μέγιστη τάση  $\tau_{max}$ ) για καθεμία από τις καθ' ύψος υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου καταναμημένες ράβδους (Σχήμα 103, ράβδοι B2 έως B9, σε απόσταση 0.30 έως 1.70 m από τον πόδα του δοκιμίου, αντίστοιχα) προς την αντίστοιχη αντιπροσωπευτική τάση της κάτω ράβδου (ράβδος B1, σε απόσταση 0.10 m από τον πόδα του δοκιμίου), χρησιμοποιήθηκαν οι εκτιμώμενες τάσεις, όπως προέκυψαν από τις γραμμικές παλινδρομήσεις. Παρά το γεγονός ότι οι εν λόγω συνθέσεις έχουν διαφορετικές αναλογίες συστατικών, είναι δυνατός ένας γενικός σχολιασμός των ακραίων τιμών των λόγων που εξετάστηκαν και μία μακροσκοπική αξιολόγηση της επιρροής των διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ και ΣΣ στο φαινόμενο άνω οπλισμών.

Από την αξιολόγηση των Σχημάτων προκύπτει ότι στην κανονιστικώς προβλεπόμενη απόσταση από το κάτω άκρο (Σχήμα 143, 0.25 ή 0.30 m κατά EN 1992-1-1 (2004) ή ACI 318/318R, αντίστοιχα), η οποία λαμβάνεται ως κρίσιμο όριο μεταξύ των περιοχών «καλής» και «κακής» συνάφειας, η τάση συνάφειας έχει μειωθεί κατά περίπου 10 % από την τάση συνάφειας της κάτω ράβδου (Σχήμα 156), ανεξαρτήτως της εξεταζόμενης αντιπροσωπευτικής τάσης ή του τύπου σκυροδέματος.

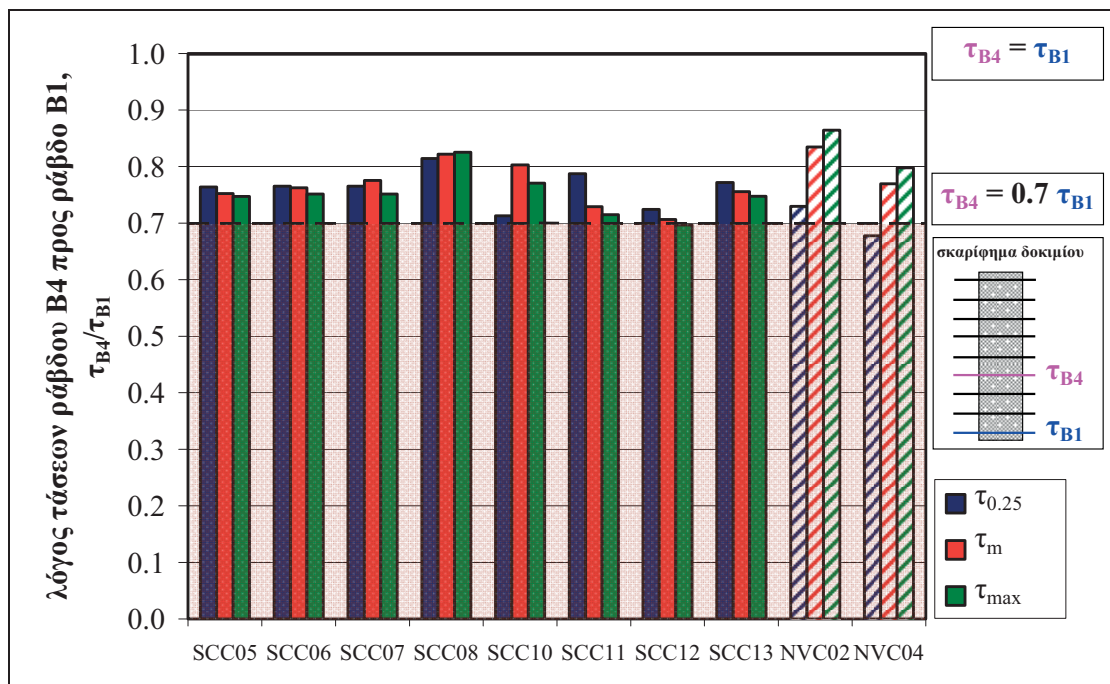


Σχήμα 156 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B2 (σε απόσταση 0.30 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω ράβδου – Σύγκριση με ΣΣ

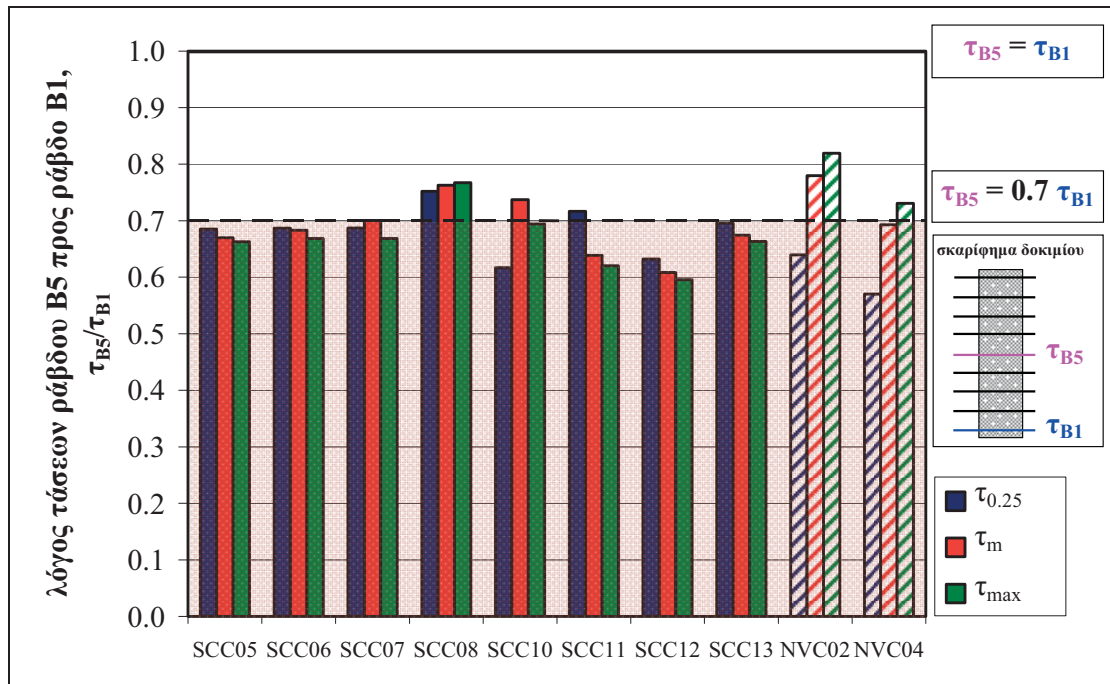




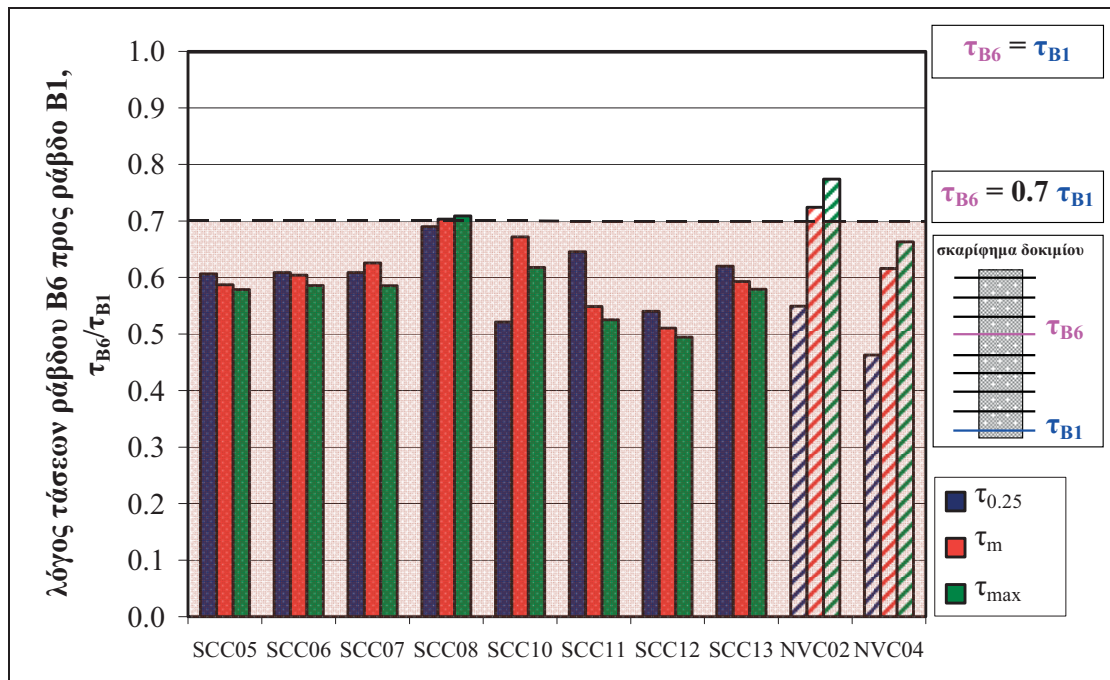
Σχήμα 157 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B3 (σε απόσταση 0.50 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω - Σύγκριση με ΣΣ



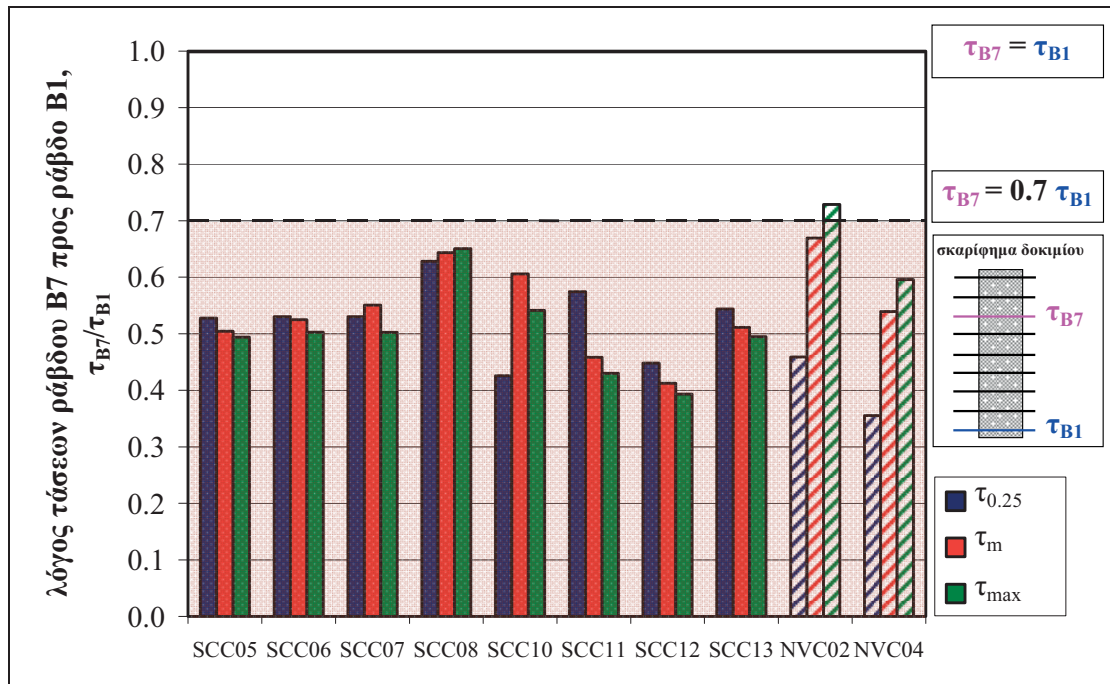
Σχήμα 158 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B4 (σε απόσταση 0.70 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω - Σύγκριση με ΣΣ



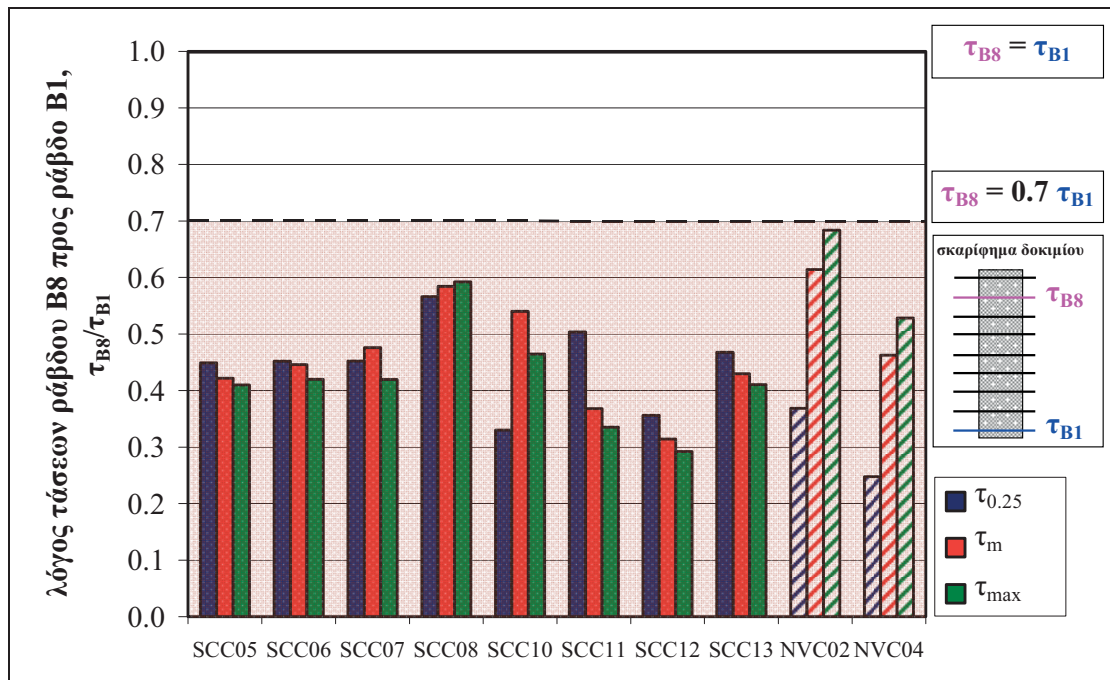
Σχήμα 159 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B5 (σε απόσταση 0.90 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ



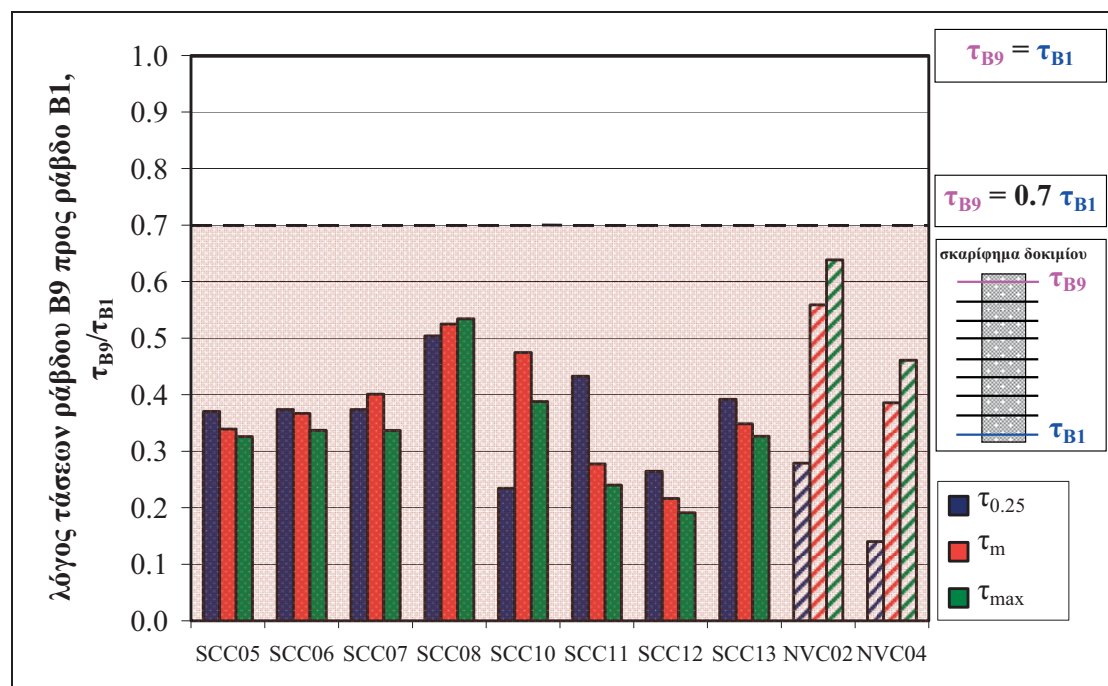
Σχήμα 160 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B6 (σε απόσταση 1.10 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ



Σχήμα 161 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B7 (σε απόσταση 1.30 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ



Σχήμα 162 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B8 (σε απόσταση 1.50 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ



Σχήμα 163 Επιρροή διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ στον λόγο τάσης της ράβδου B9 (σε απόσταση 1.70 m από τον πόδα υψηλού κατακόρυφου δοκιμίου) προς την τάση της κάτω – Σύγκριση με ΣΣ

Μελετώντας τις διαδοχικά υψηλότερες ράβδους, παρατηρείται ότι ο προτεινόμενος από τους κανονισμούς μειωτικός συντελεστής 0.7 της τάσης συνάφειας για τον συνυπολογισμό του φαινομένου άνω σπλισμών είναι επαρκής –έστω και οριακά– για οποιαδήποτε αντιπροσωπευτική τάση και για οποιοδήποτε τύπο σκυροδέματος για ράβδους που βρίσκονται σε απόσταση από τον πόδα δοκιμίου μεγάλου βάρους έως 0.70 m (Σχήμα 158). Για μεγαλύτερες αποστάσεις η μείωση της τάσης συνάφειας μπορεί να φτάσει και σε ποσοστά περί του 60 έως 70 %, που θα αντιστοιχούσαν σε μια απαίτηση ενός μειωτικού συντελεστή μεταξύ 0.4 έως 0.3.

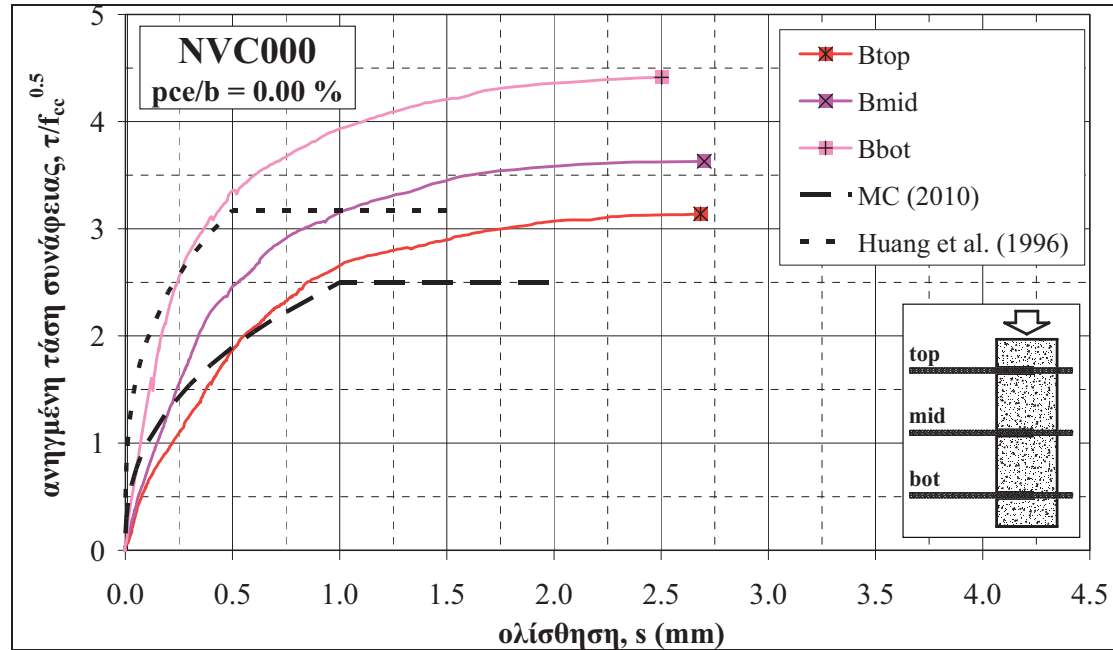
Πάντως, αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τις χαμηλότερες ράβδους, για τις οποίες τα επιμέρους χαρακτηριστικά των διαφορετικών συνθέσεων δεν φαίνεται να επηρεάζουν τη μείωση της τάσης, η επιρροή των διαφορών στη σύνθεση αναδεικνύονται για τις ράβδους που είναι τοποθετημένες σε αποστάσεις από τον πόδα μεγαλύτερες από 0.70 m. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα μίγματα ΣΣ που εξετάστηκαν φαίνεται να εμφανίζουν ίσες ή μικρότερες μειώσεις εν σχέσει προς τα μίγματα ΑΣΣ για τις αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ , αλλά ίσες ή μεγαλύτερες μειώσεις για την κρίσιμη τάση  $\tau_{0.25}$ . Οι εν λόγω διαφορές μεταξύ των ΑΣΣ και των ΣΣ γίνονται εντονότερες για υψηλότερες ράβδους.

Για το ΑΣΣ, οι μικρότερες μειώσεις παρατηρήθηκαν σε μίγματα με υψηλότερες αντοχές, ως αποτέλεσμα της υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο (SCC07, SCC08, SCC10), του χαμηλού λόγου  $w/b$  (SCC08) και της ενσωμάτωσης πυριτικής παιπάλης (SCC10). Άλλοι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν το επίπεδο της μείωσης είναι η λεπτότητα και η περιεκτικότητα του ασβεστολιθικού φίλερ (SCC05, SCC13). Υπενθυμίζεται πάντως, ότι οι παραπάνω παράγοντες δρουν συνδυαστικά στις συνθέσεις που εξετάστηκαν και, για το λόγο αυτό, δεν είναι διακριτός ο πιο ακριβής τρόπος επιρροής τους.

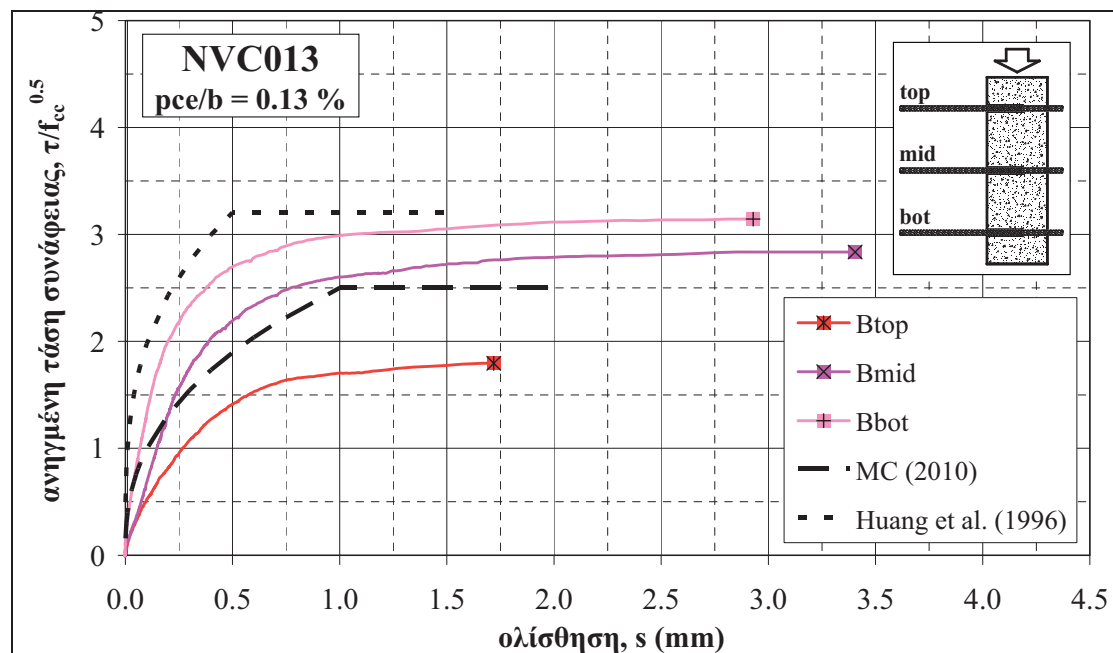
### 3.3.2.2. Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

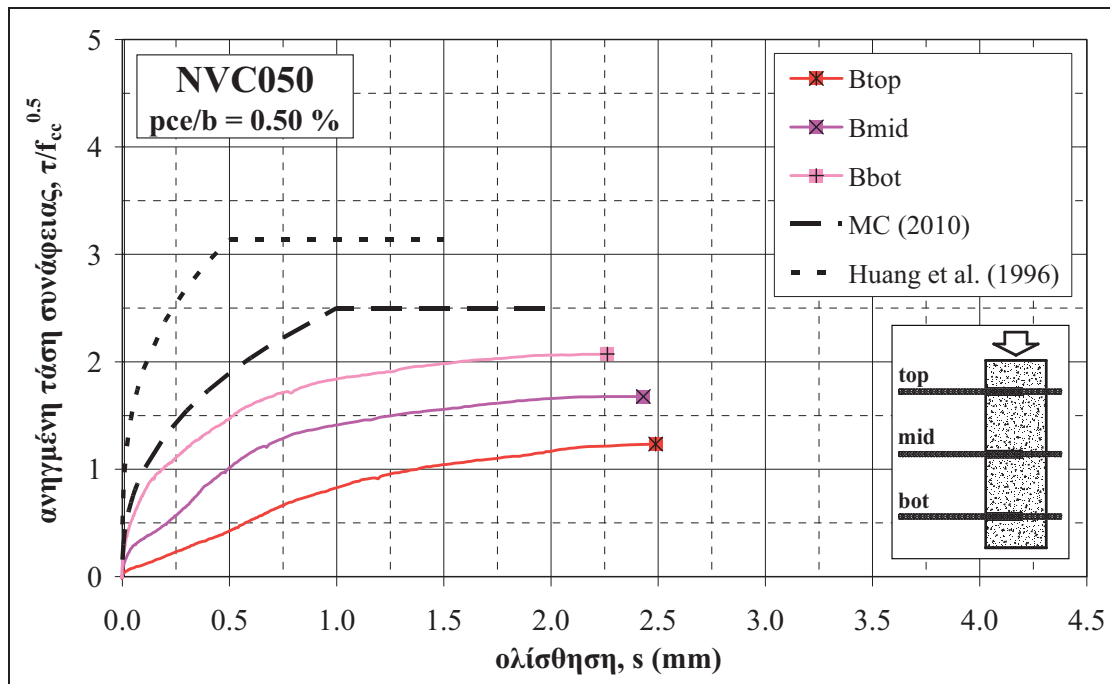
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 164 έως Σχήμα 167), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους για τα μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ .



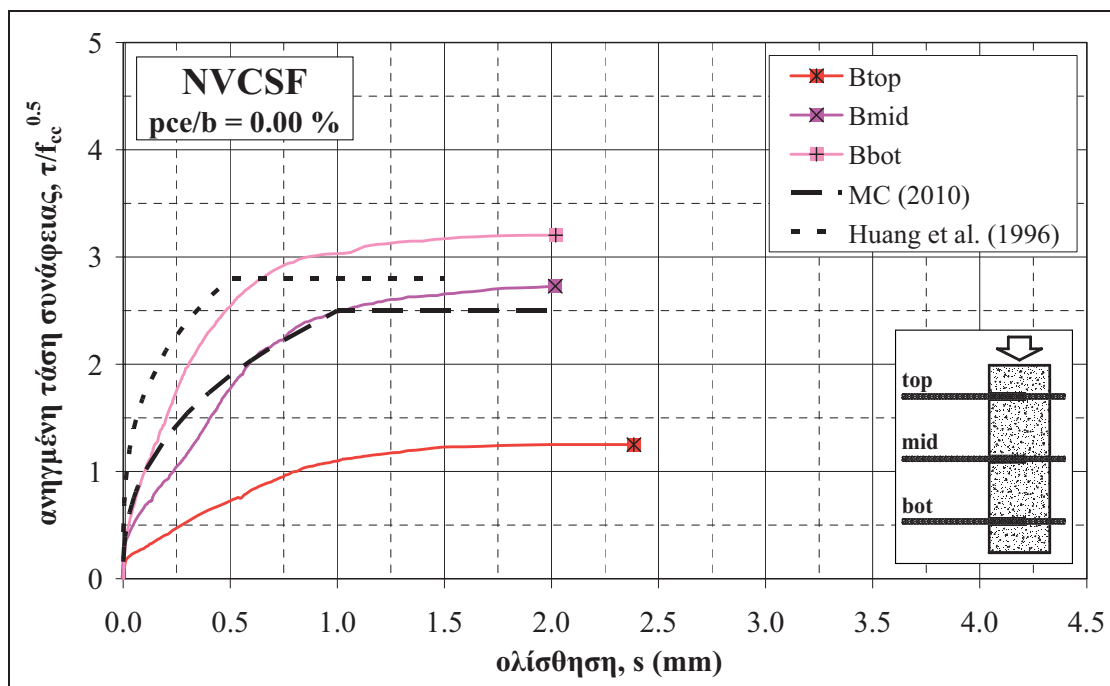
Σχήμα 164 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης NVC000– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 165 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης NVC013– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 166 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης NVC050– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 167 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης NVCSF– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 76 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις τρεις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους των μίγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  (Πίν. 42, Κεφ. 2, εκτός της NVC025, για την οποία δεν παρασκευάστηκε κατακόρυφο δοκίμιο) και του μίγματος αναφοράς NVCSF της υπο-ομάδας συνθέσεων B2 (Πίν. 39, Κεφ. 2). Στον Πίνακα σημειώνονται οι ράβδοι, στις οποίες η τάση εξόλκευσης ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO). Όσο αφορά στην τάση των ράβδων, αυτή ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα μόνο στη ράβδο  $B_{bot}$  της σύνθεσης NVC000.

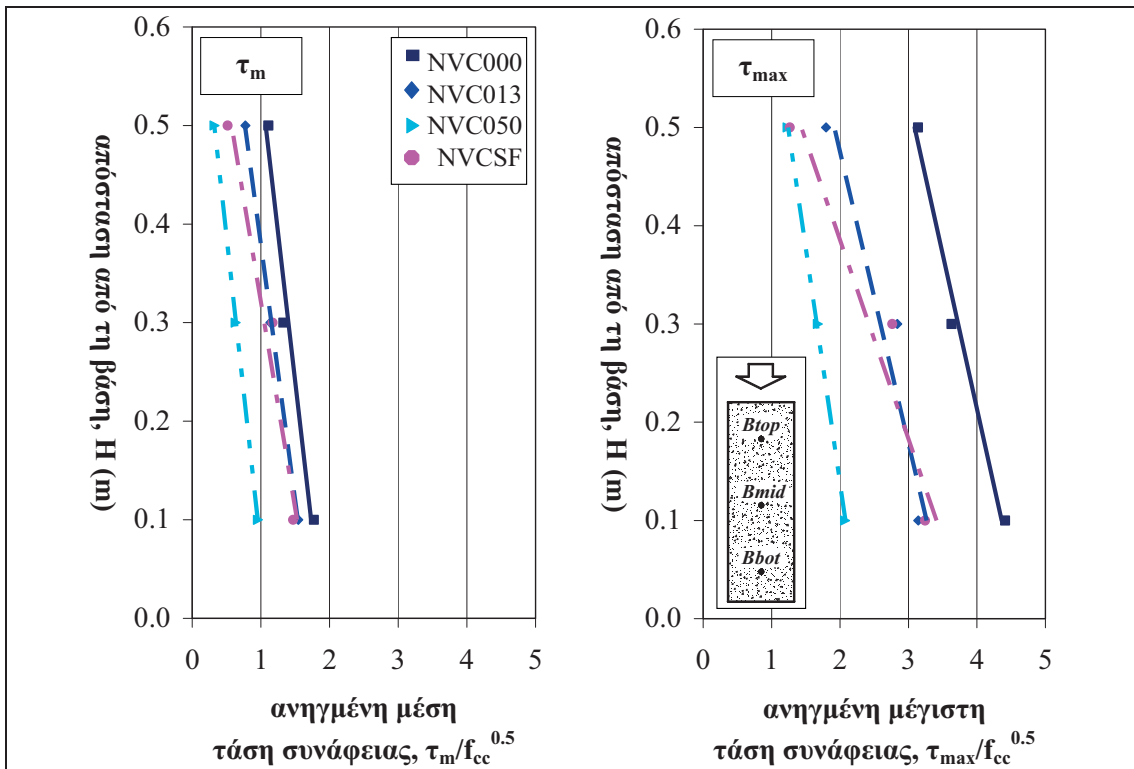
Πίνακας 76 Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κατακόρυφων δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

κωδικός σύνθεση	NVC000 NVC11	NVC013 NVC13	NVC050 NVC14	NVCSF NVC08
$B_{top}$	PO	PO	PO	PO
$B_{mid}$	PO	PO	PO	PO
$B_{bot}$	PO*	PO	PO	PO

\*διαρροή χάλυβα

### Μεταβολή τάσεων καθ' ύψος

Στο Σχήμα 168 παρουσιάζονται οι γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ των ανηγμένων τιμών των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας (μέση τάση  $\tau_m$  και μέγιστη τάση  $\tau_{max}$ ) για όλα τα κατακόρυφα δοκίμια μικρού ύψους που παρασκευάστηκαν με μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι τάσεις μειώνονται συναρτήσει της απόστασης από τη βάση.



Σχήμα 168 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

**Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)**

Ο Πίνακας 77 και ο Πίνακας 78 περιλαμβάνουν τις ανηγμένες πρωτογενείς και εκτιμώμενες, αντίστοιχα, αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας (Σχήμα 143, Παρ. 3.3.2) για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο του κατακόρυφου δοκιμίου για τα μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  (Πίν. 42, Κεφ. 2). Ο Πίνακας 77 περιλαμβάνει επιπλέον τις ολισθήσεις των ράβδων που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας. Τα χαρακτηριστικά συνάφειας των μιγμάτων ΣΣ δε σχολιάζονται εδώ, αλλά θα αξιολογηθούν συγκριτικά με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας των μιγμάτων ΑΣΣ, στις παραγράφους που ακολουθούν (Παρ. 3.3.2.3 και 3.3.2.4).

**Πίνακας 77** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (πρωτογενείς τιμές) και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  και μίγματος αναφοράς NVCSF, για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

αντιπρ.τάση	ράβδος	NVC000	NVC013	NVC050	NVCSF
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	1.11	0.77	0.32	0.51
	$B_{mid}$	1.33	1.14	0.63	1.17
	$B_{bot}$	1.77	1.54	0.96	1.47
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	3.14	1.80	1.23	1.27
	$B_{mid}$	3.63	2.84	1.68	2.76
	$B_{bot}$	4.41	3.14	2.07	3.24
$s_{\tau_{max}}$	$B_{top}$	2.7	1.7	2.5	2.4
	$B_{mid}$	2.7	3.4	2.4	2.0
	$B_{bot}$	2.5	2.9	2.3	2.0

**Πίνακας 78** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (εκτιμώμενες τιμές) μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

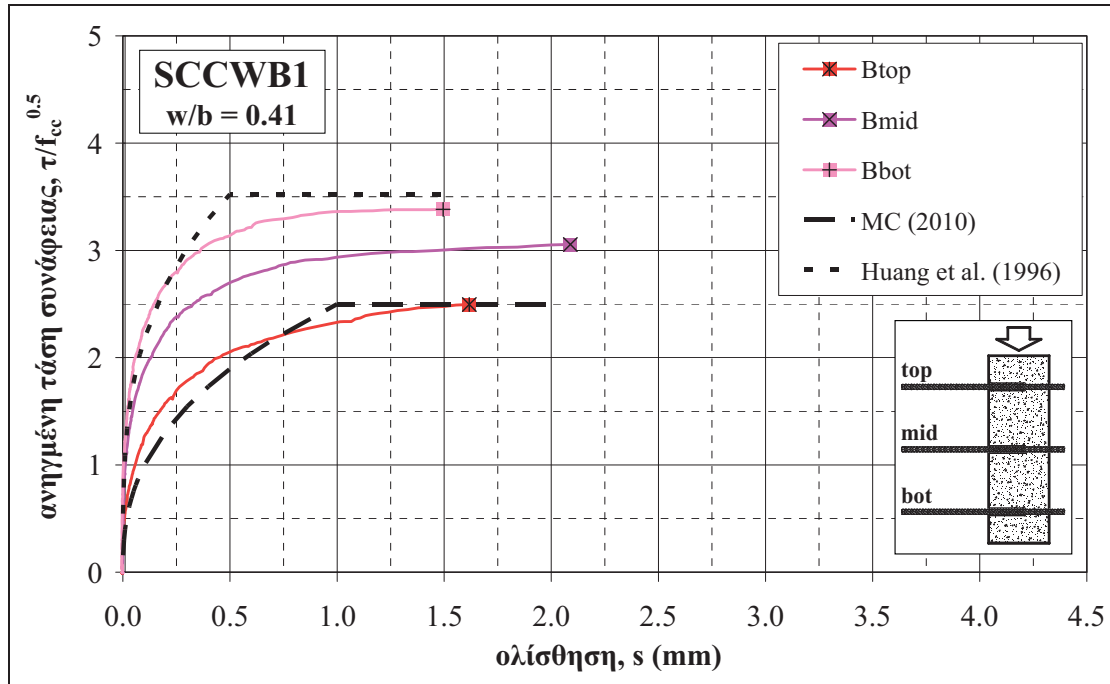
αντιπρ.τάση	ράβδος	NVC000	NVC013	NVC050	NVCSF
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	1.07	0.77	0.32	0.57
	$B_{mid}$	1.40	1.15	0.64	1.05
	$B_{bot}$	1.73	1.54	0.95	1.53
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	3.09	1.92	1.24	1.43
	$B_{mid}$	3.73	2.59	1.66	2.42
	$B_{bot}$	4.36	3.27	2.08	3.41

**3.3.2.3. Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )<sup>4</sup>****Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων**

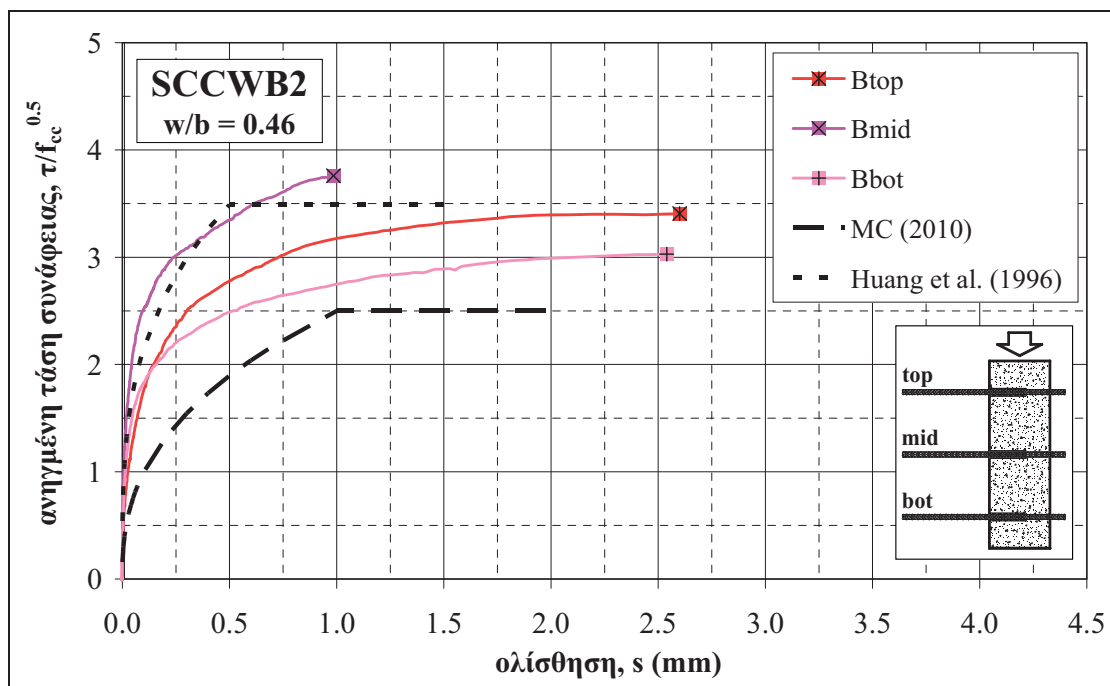
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 169 έως Σχήμα 173), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  (Πίν. 37, Κεφ. 2).

<sup>4</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στο επιστημονικό περιοδικό [Cement & Concrete Composites \[Trezos et al. \(2014\)\]](#)

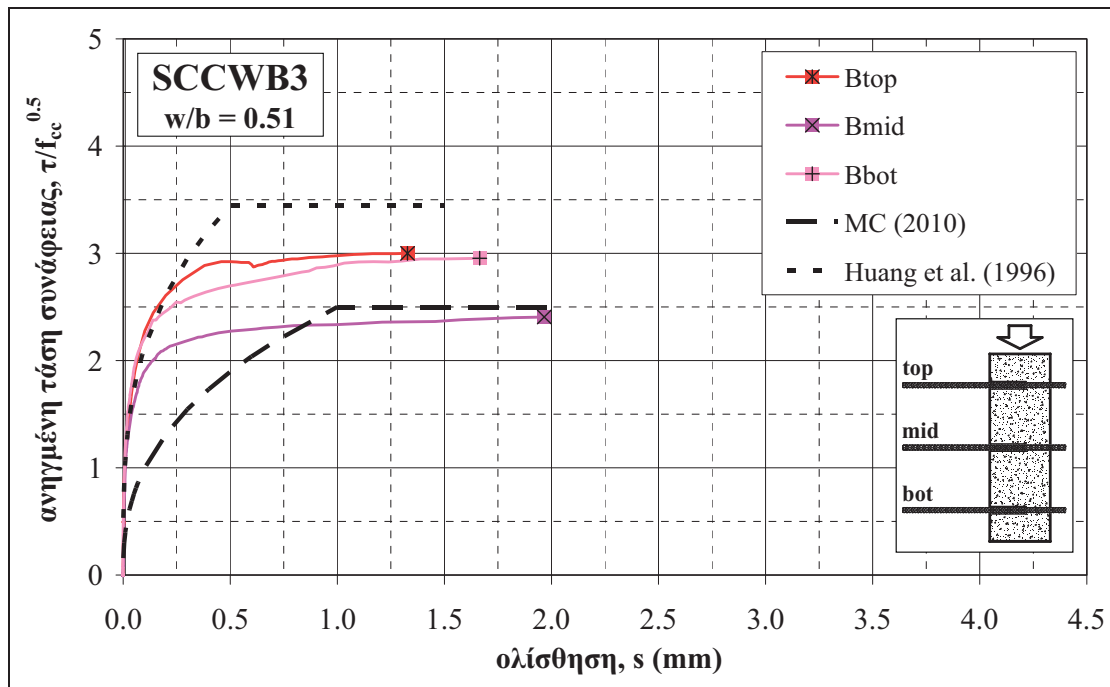




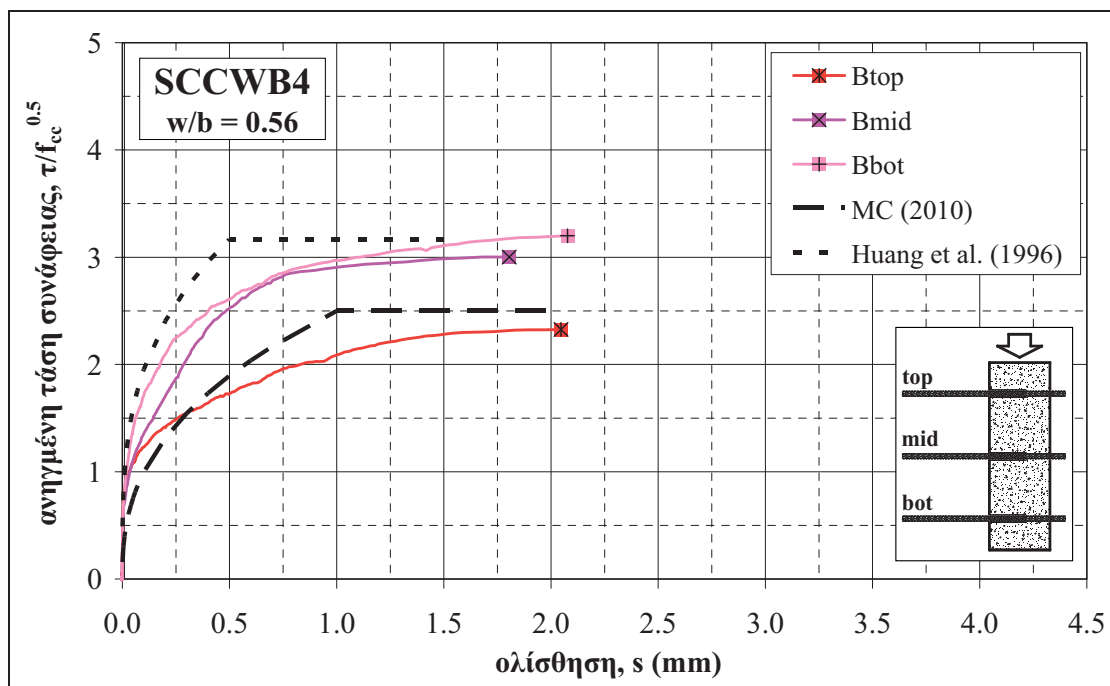
Σχήμα 169 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



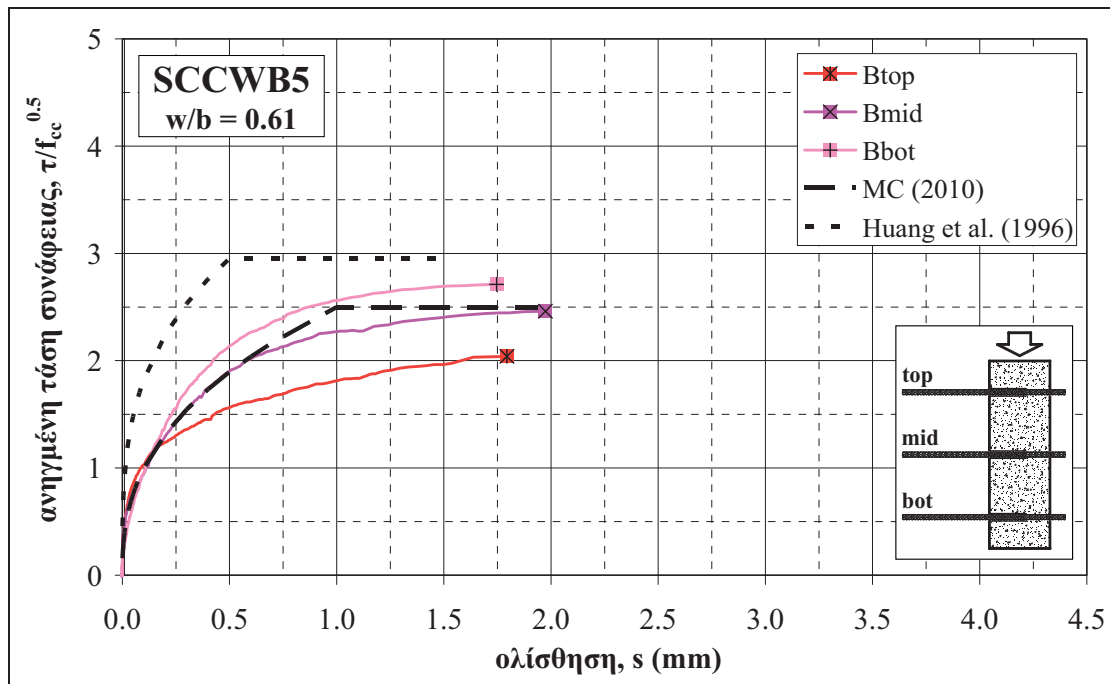
Σχήμα 170 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 171 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 172 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 173 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCWB5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 79 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις τρεις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους των μίγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Στον Πίνακα σημειώνονται οι ράβδοι, στις οποίες η τάση εξόλκευσης ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO), ενώ το όριο διαρροής του χάλυβα ξεπεράστηκε μόνο στη ράβδο  $B_{mid}$  της σύνθεσης SCCWB2.

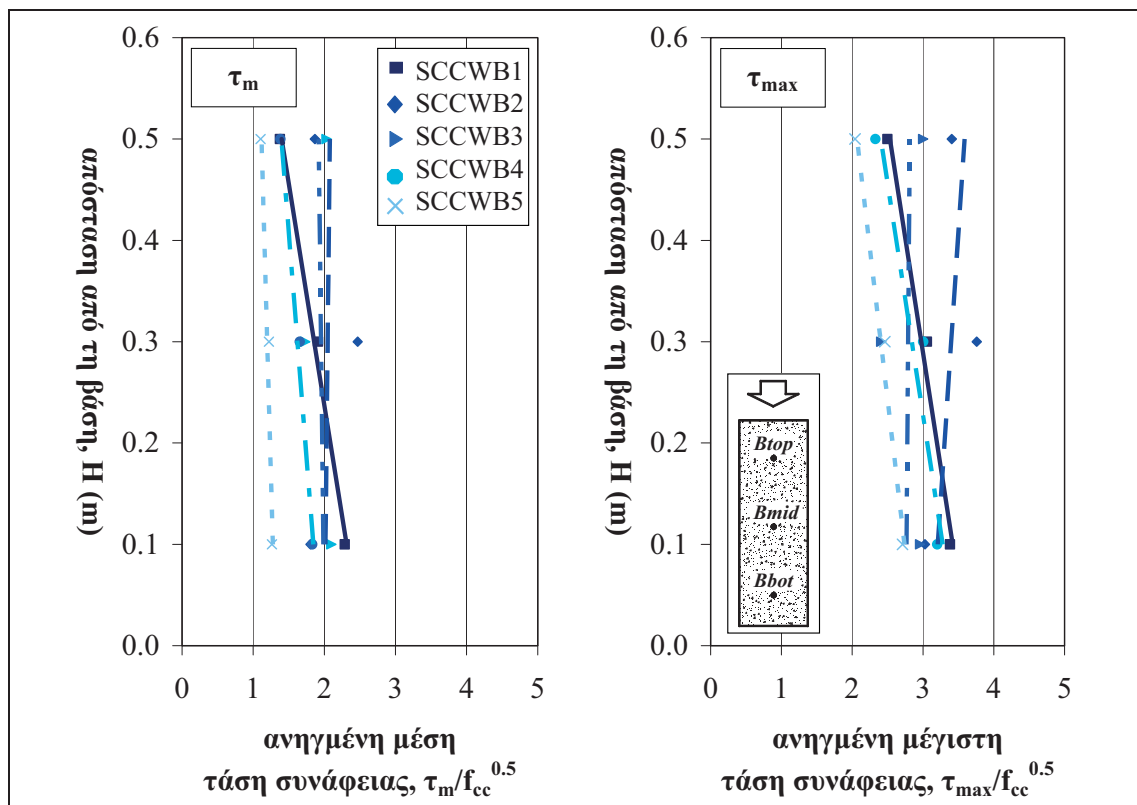
Πίνακας 79 Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κατακόρυφων δοκιμών, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

κωδικός σύνθεση	SCCWB1 SCC29	SCCWB2 SCC27	SCCWB3 SCC26	SCCWB4 SCC28	SCCWB5 SCC31
$B_{top}$	PO	PO	PO	PO	PO
$B_{mid}$	PO	PO*	PO	PO	PO
$B_{bot}$	PO	PO	PO	PO	PO

\*διαρροή χάλυβα

### Μεταβολή τάσεων καθ' ύψος

Στο Σχήμα 174 παρουσιάζονται οι γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ των ανηγμένων τιμών των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας (μέση τάση  $\tau_m$  και μέγιστη τάση  $\tau_{max}$ ) για όλα τα κατακόρυφα δοκίμια μικρού ύψους που παρασκευάστηκαν με μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Παρατηρείται ότι τόσο οι μέσες όσο και οι μέγιστες τάσεις παραμένουν πρακτικώς σταθερές καθ' ύψος για τις συνθέσεις SCCWB2 και SCCWB3. Οι ανάποδη κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης της σύνθεσης SCCWB2 μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και αποδίδεται στη διασπορά των μετρηθεισών τάσεων.



Σχήμα 174 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

Πίνακας 80 Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (πρωτογενείς τιμές) και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

μέγεθος	ράβδος	SCCWB1	SCCWB2	SCCWB3	SCCWB4	SCCWB5
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	1.37	1.87	2.03	1.38	1.10
	$B_{mid}$	1.91	2.47	1.73	1.65	1.22
	$B_{bot}$	2.29	1.81	2.10	1.83	1.26
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	2.50	3.41	3.00	2.33	2.04
	$B_{mid}$	3.05	3.76	2.41	3.00	2.46
	$B_{bot}$	3.38	3.03	2.96	3.20	2.71
$s_{\tau_{max}}$	$B_{top}$	1.6	2.6	1.3	2.0	1.8
	$B_{mid}$	2.1	1.0	2.0	1.8	2.0
	$B_{bot}$	1.5	2.5	1.7	2.1	1.7

Πίνακας 81 Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (εκτιμώμενες τιμές) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

μέγεθος	ράβδος	SCCWB1	SCCWB2	SCCWB3	SCCWB4	SCCWB5
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	1.40	2.08	1.92	1.40	1.12
	$B_{mid}$	1.86	2.05	1.95	1.62	1.20
	$B_{bot}$	2.31	2.02	1.99	1.85	1.28
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	2.53	3.59	2.81	2.41	2.07
	$B_{mid}$	2.98	3.40	2.79	2.84	2.40
	$B_{bot}$	3.42	3.21	2.77	3.28	2.74

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 80 και ο Πίνακας 81 περιλαμβάνουν τις ανηγμένες πρωτογενείς και εκτιμώμενες, αντίστοιχα, αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας (Σχήμα 143, Παρ. 3.3.2) για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο του κατακόρυφου δοκιμίου για τα

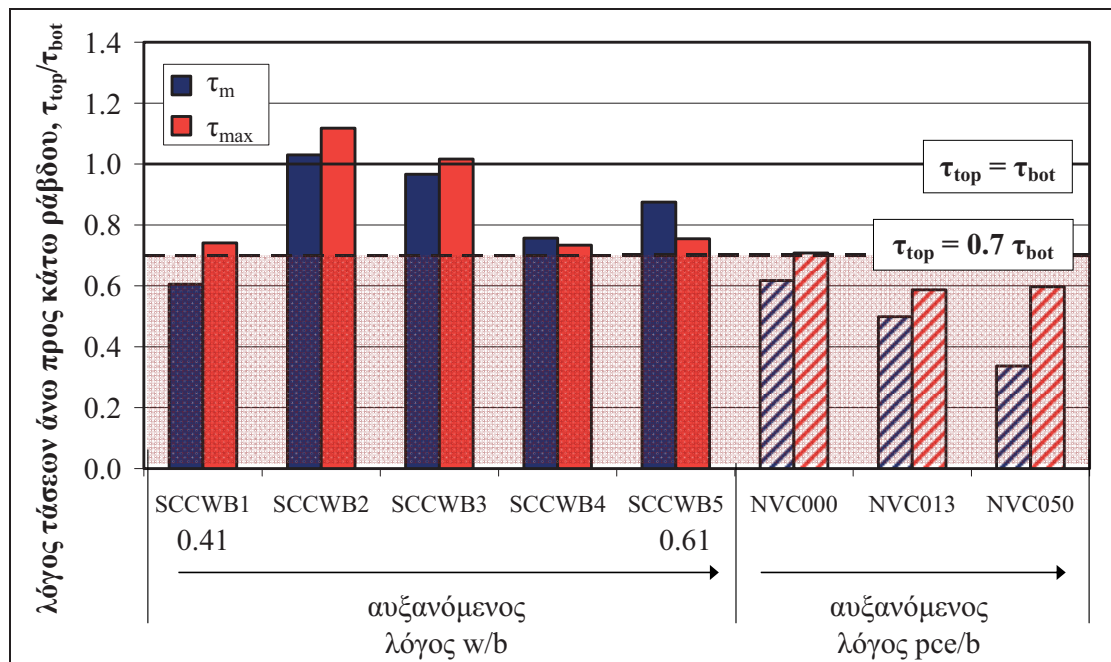
μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Ο Πίνακας 80 περιλαμβάνει επιπλέον τις ολισθήσεις των ράβδων που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας,

### Φαινόμενο άνω οπλισμών

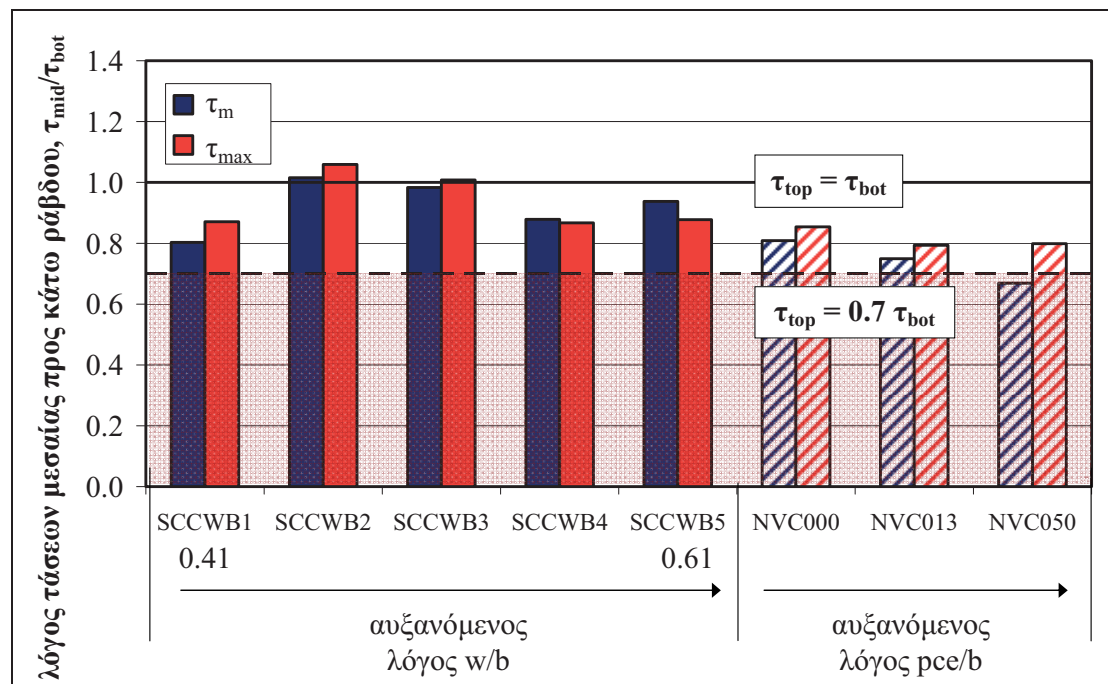
Στο **Σχήμα 175** αξιολογείται η ένταση του φαινομένου άνω ράβδων μέσω των λόγων τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$ , για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και τα ευρήματα συγκρίνονται με τους αντίστοιχους λόγους για μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , όπως προκύπτουν από τα μεγέθη που παρατίθενται στην Παρ. 3.3.2.2. Λόγοι κοντά στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται την ελαχιστοποίηση του φαινομένου άνω οπλισμών, ενώ λόγοι χαμηλότεροι από 0.7 συνεπάγονται εντονότερο φαινόμενο άνω οπλισμών από το προβλεπόμενο από τους κατασκευαστικούς κανονισμούς για περιοχές «κακής» συνάφειας. Μικρές διακυμάνσεις γύρω από τη μονάδα αποδίδονται σε εσωτερικές διακυμάνσεις των δοκιμών.

Παρατηρείται ότι, για οποιαδήποτε εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων και εξαιρουμένης της σύνθεσης SCCWB1 ( $w/b = 0.41$ ), η αύξηση του λόγου  $w/b$  οδηγεί σε μείωση του λόγου  $\tau_{top}/\tau_{bot}$ , που συνεπάγεται εντονότερο φαινόμενο άνω ράβδων. Για λόγους  $w/b$  μεταξύ 0.46 και 0.51, ο λόγος  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  μεγιστοποιείται, προσεγγίζοντας τη μονάδα (1.0), γεγονός που συνεπάγεται ασήμαντη απώλεια συνάφειας καθ' ύψος. Για τα μίγματα ΣΣ, η τάση της άνω ράβδου είναι εν γένει μικρότερη από 70 % της αντίστοιχης τάσης της κάτω ράβδου, με οριακή εξαίρεση του μίγματος NVC000. Η διαφορά από τα κανονιστικώς προβλεπόμενα μεγέθη διευρύνεται για μεγαλύτερους λόγους  $pce/b$  και αρκετά εντονότερα για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$ .

Αντίστοιχα ευρήματα προκύπτουν για τη μεσαία ράβδο, η ανηγμένη τάση της οποίας στην τάση της κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ , παρουσιάζεται στο **Σχήμα 176**. Σημειώνεται ότι η θέση της μεσαίας ράβδου καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου βρίσκεται ακριβώς στο όριο που θέτει ο κανονισμός μεταξύ των περιοχών με συνθήκες «καλής» και «κακής» συνάφειας, με αποτέλεσμα οι λόγοι  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  για το ΣΣ να είναι, σε αυτή την περίπτωση, οριακώς αποδεκτοί (οριακά ίσοι ή μεγαλύτεροι από 70 %).



**Σχήμα 175** Επιρροή λόγου  $w/b$  σε μίγματα ΑΣΣ και  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$



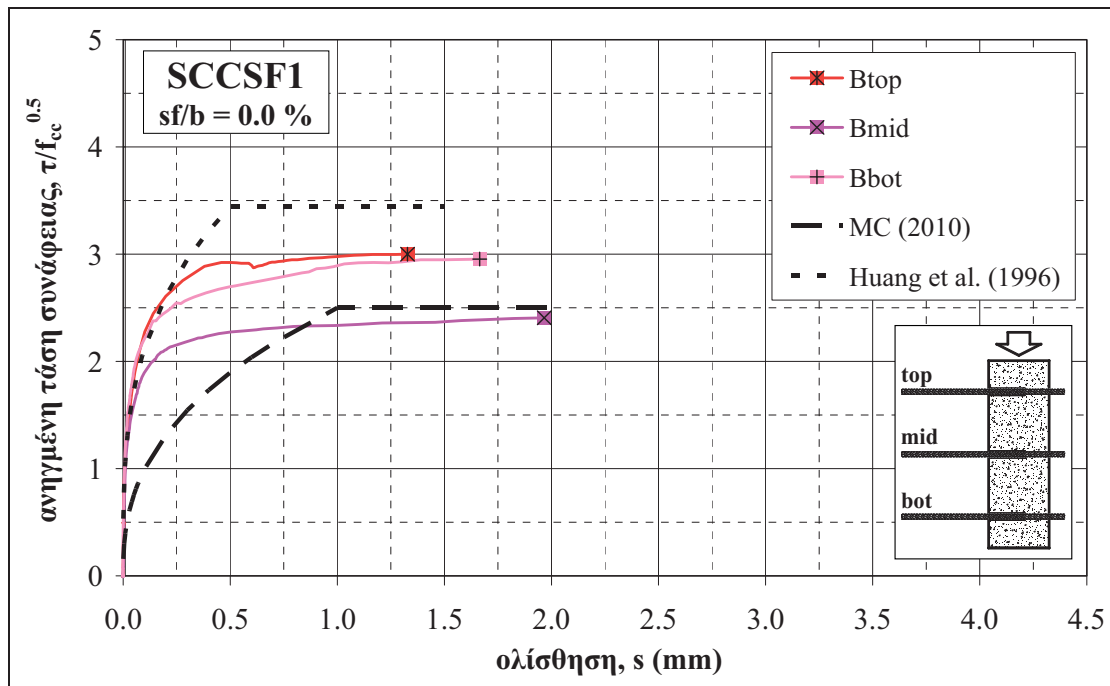
Σχήμα 176 Επιρροή λόγου  $w/b$  σε μίγματα ΑΣΣ και  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων μεσαίας προς κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$

Συνοψίζοντας τα παραπάνω ευρήματα, μπορεί να υποθεθεί ότι οι κανονιστικές προδιαγραφές είναι επαρκείς για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  που εξετάστηκαν (για τη δεδομένη σύνθεση αναφοράς), με ικανοποιητικό περιθώριο ασφαλείας, ειδικά για ράβδους κοντά στο όριο μεταξύ των περιοχών με συνθήκες «καλής» και «κακής» συνάφειας και για μίγματα με λόγους  $w/b$  μεταξύ 0.46 και 0.51. Από την άλλη πλευρά, ο κανονιστικός προβλεπόμενος μειωτικός συντελεστής για το συνυπολογισμό του φαινομένου άνω ράβδων φαίνεται να είναι οριακά επαρκής για τα μίγματα ΣΣ κοντά στο όριο μεταξύ των περιοχών με συνθήκες «καλής» και «κακής» συνάφειας, ενώ κρίνεται ανεπαρκής για υψηλότερες θέσεις καθ' ύψος των κατακόρυφων δοκιμίων και, ειδικότερα, για μίγματα ΣΣ υψηλότερων λόγων  $pce/b$ . Σημειώνεται, πάντως, ότι ο μειωτικός συντελεστής 0.7 εφαρμόζεται στις τάσεις σχεδιασμού και όχι στα πειραματικά αποτελέσματα, γεγονός που συνεπάγεται ότι, ενώ θα καταστεί επαρκής για το ΣΣ, θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο να είναι υπερτιμημένος για το ΑΣΣ και να είναι δυνατή η αύξησή του (π.χ. σε 0.8). Τέλος, συγκρίνοντας τα μίγματα ΣΣ με τα αντίστοιχα μίγματα ΑΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b$  (0.51, SCCWB3) ή ίδια μέση θλιπτική αντοχή ( $f_{cc} \sim 50 \text{ N/mm}^2$ , SCCWB4) παρατηρείται ότι, σε κάθε περίπτωση, η συμπεριφορά του ΑΣΣ είναι βελτιωμένη, έστω και οριακά, εν σχέσει προς το ΣΣ. Η βελτίωση είναι μεγαλύτερη για ίδιο λόγο  $w/b$ .

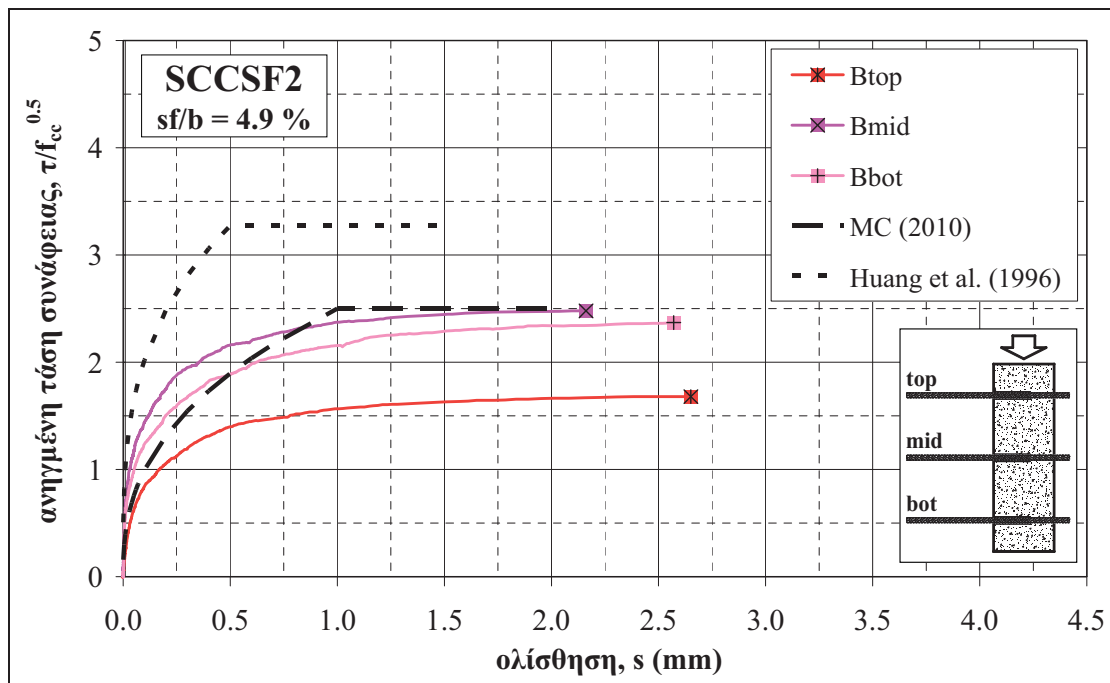
### 3.3.2.4. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

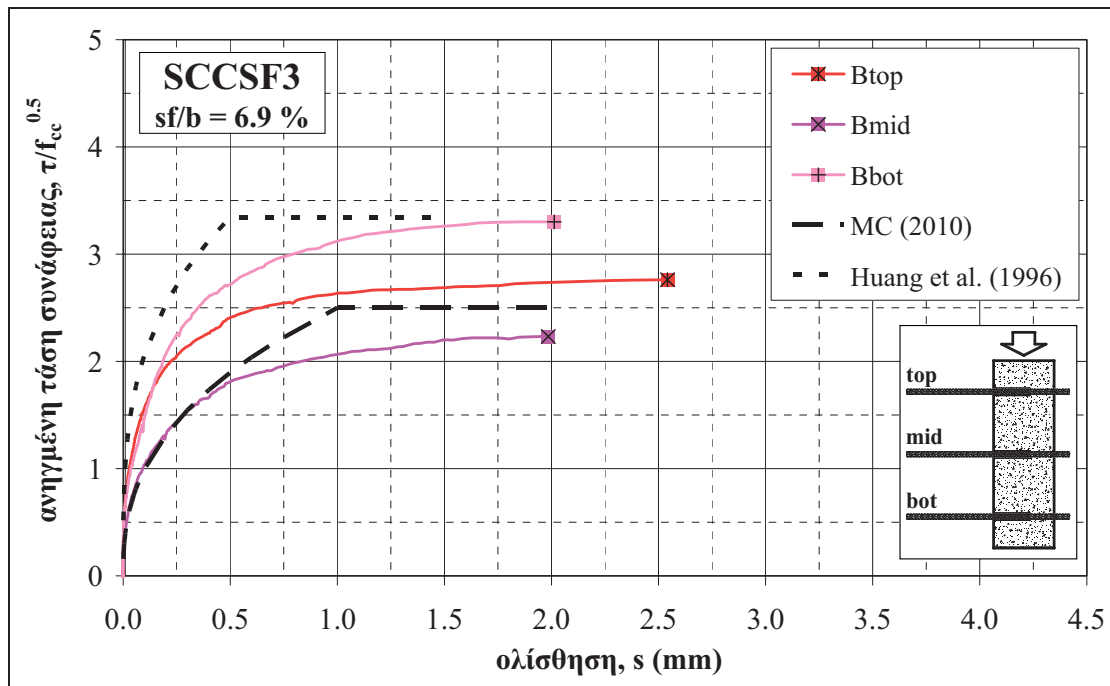
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 177 έως Σχήμα 187), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  (Πίν. 38 και 39, Κεφ. 2).



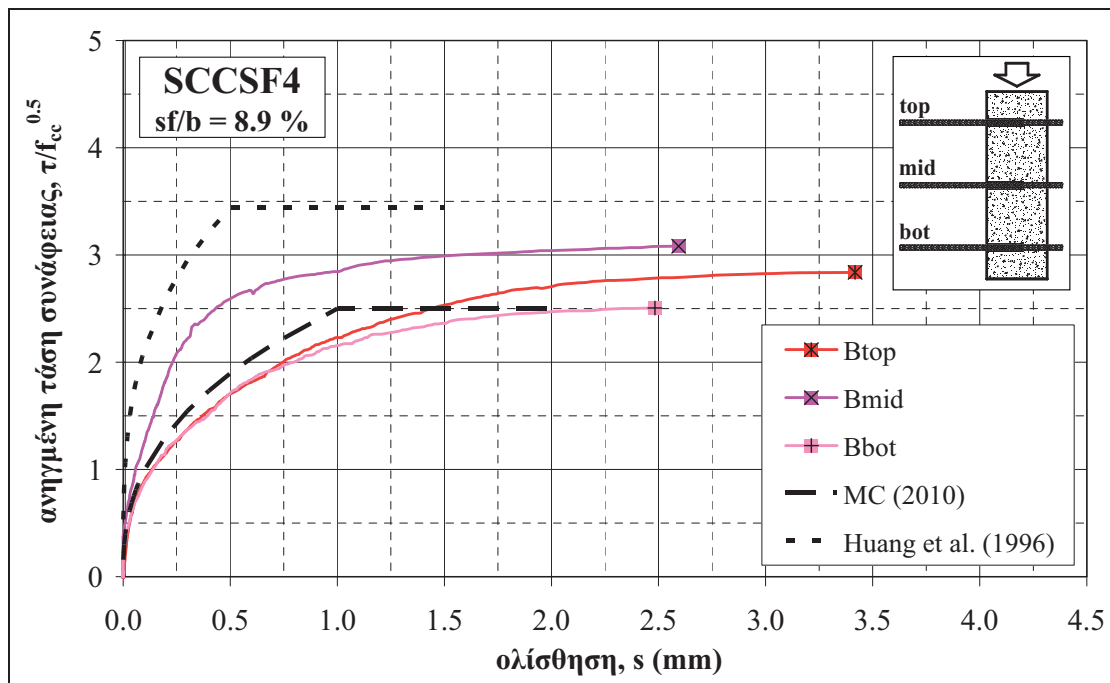
Σχήμα 177 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 178 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

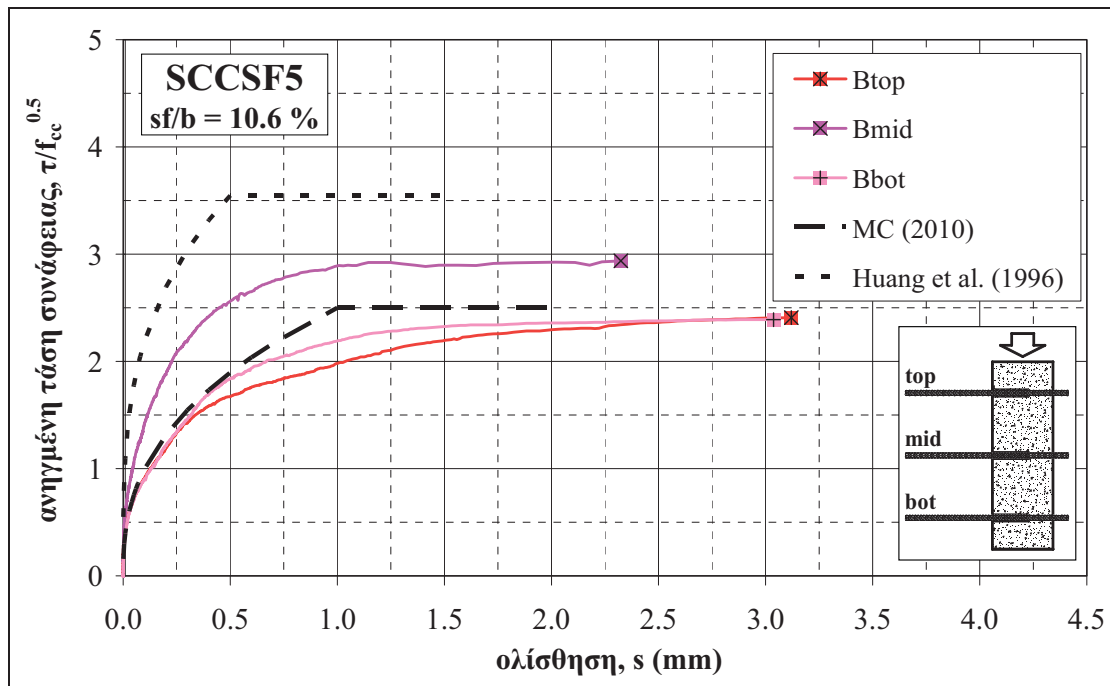


Σχήμα 179 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

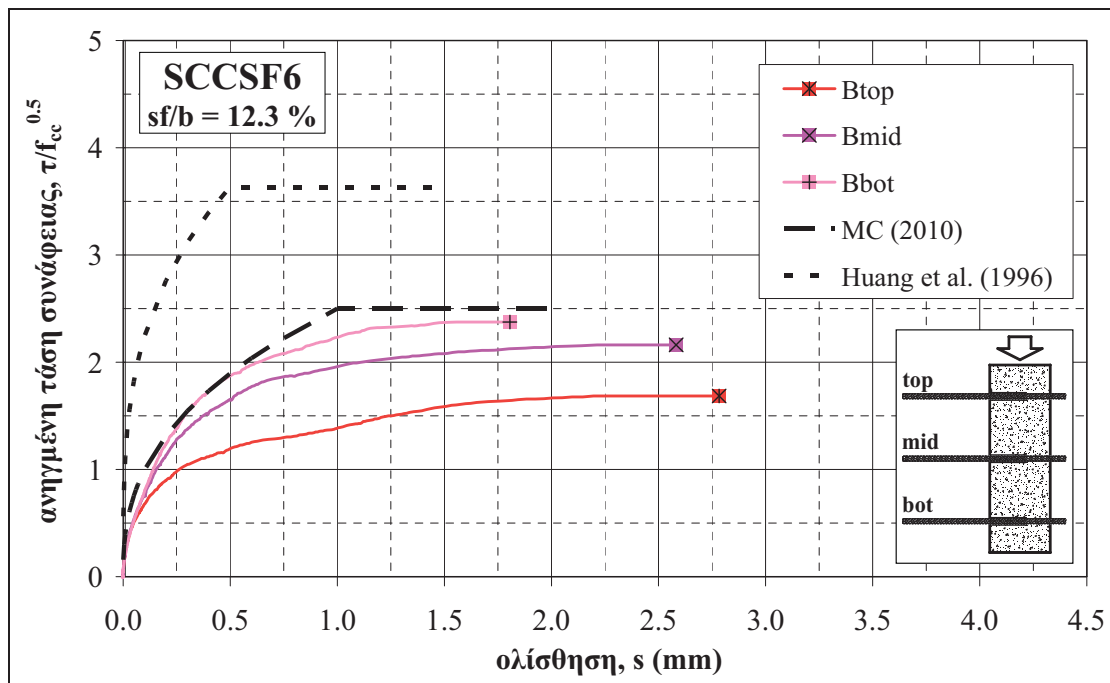


Σχήμα 180 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

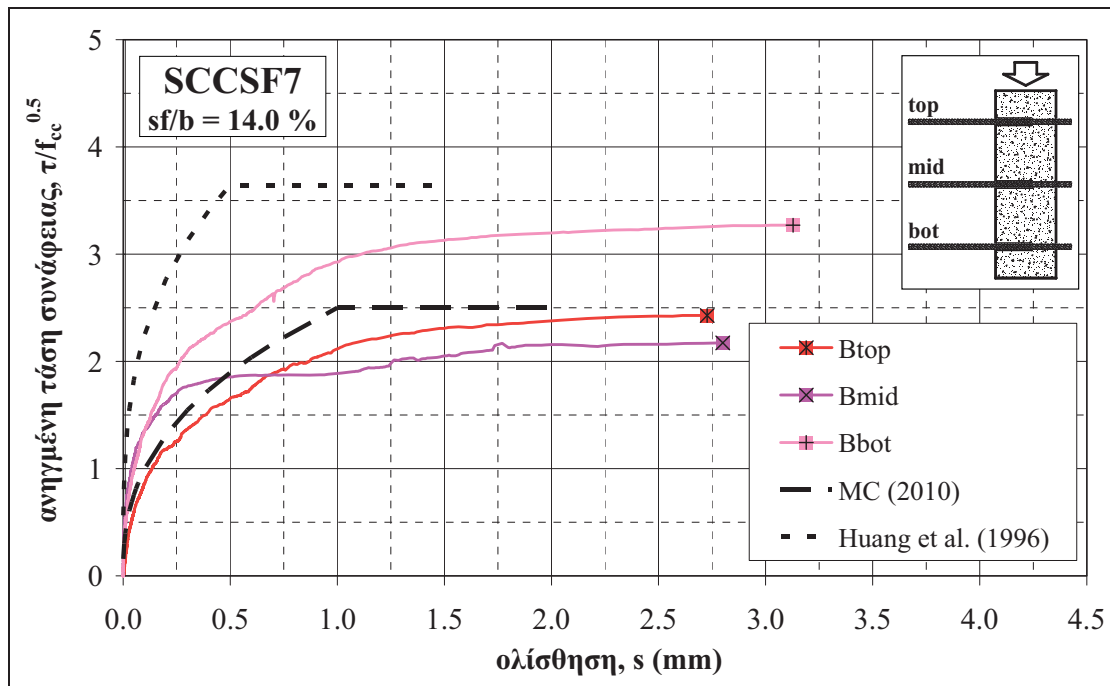




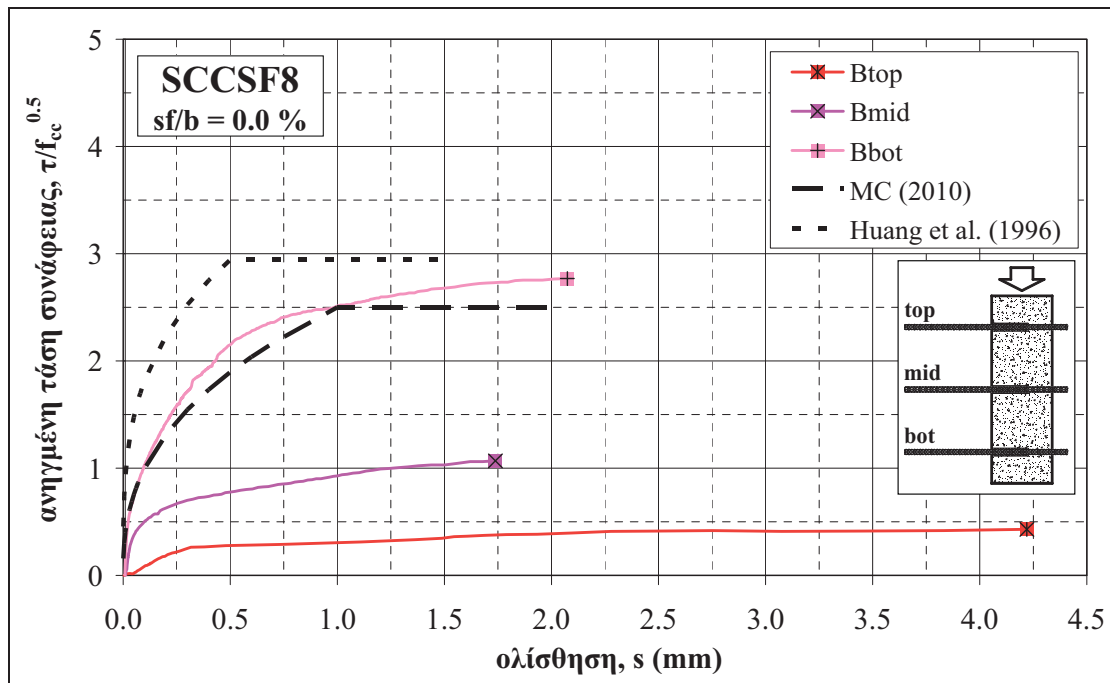
Σχήμα 181 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



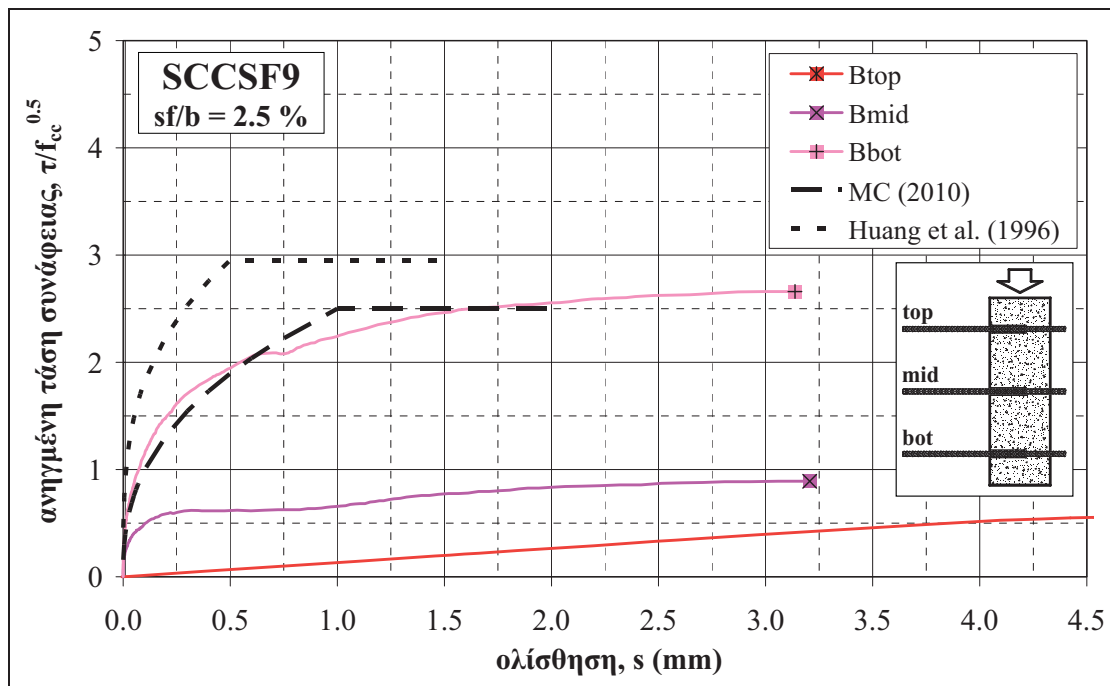
Σχήμα 182 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF6– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



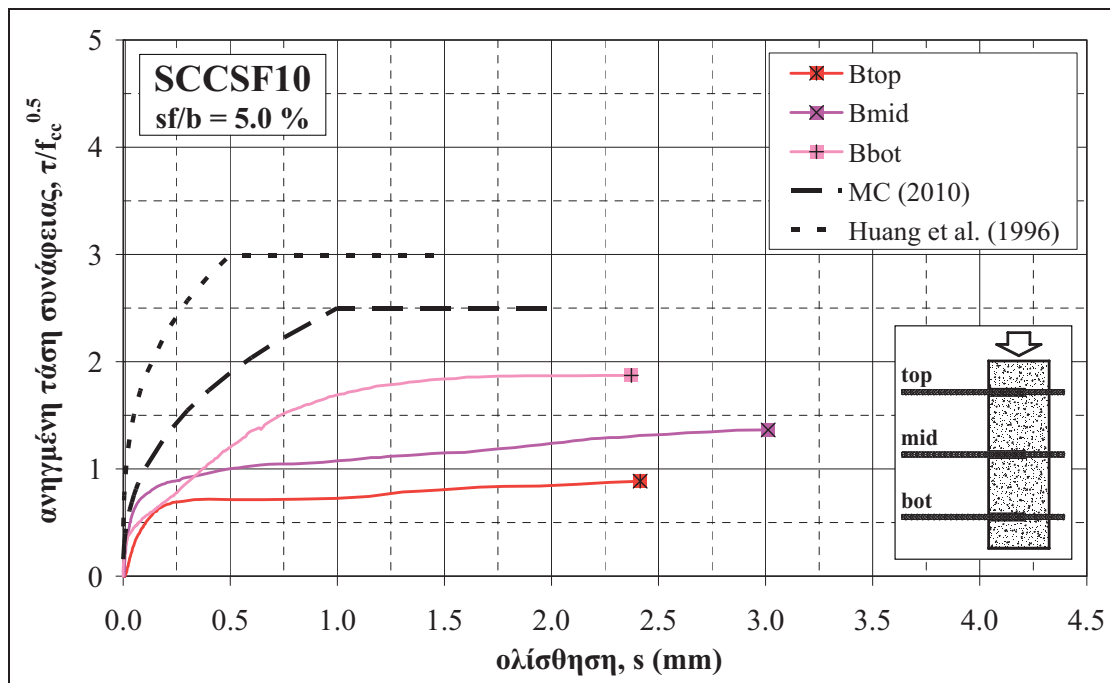
Σχήμα 183 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF7– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



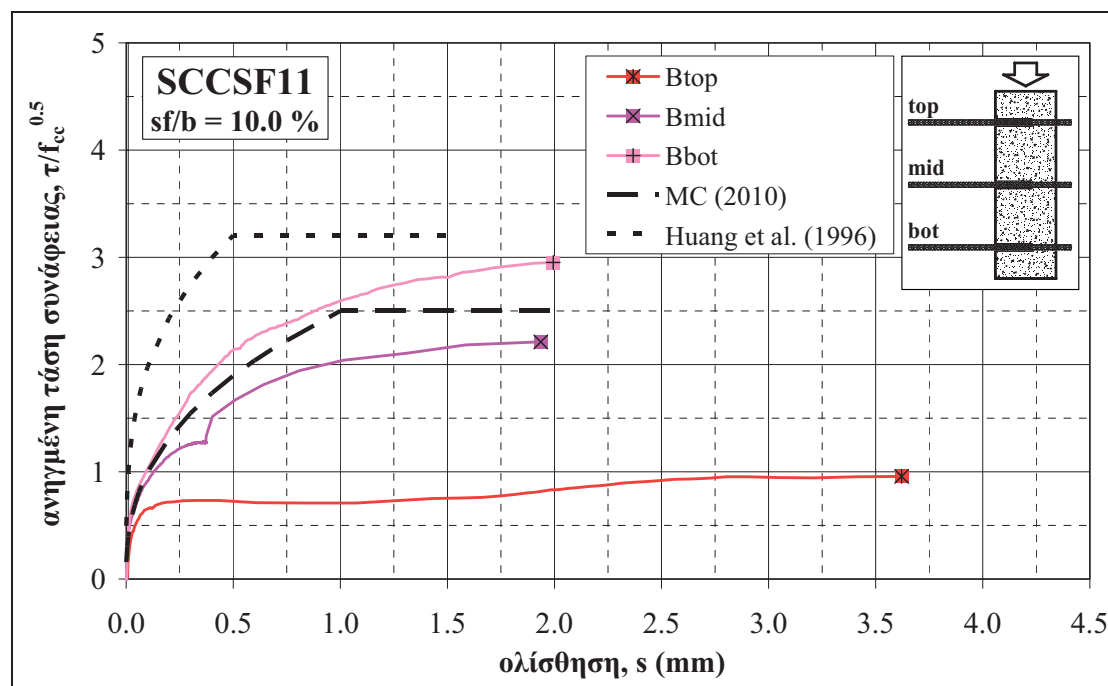
Σχήμα 184 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF8– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 185 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF9– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 186 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμών μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF10– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



**Σχήμα 187** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους της σύνθεσης SCCSF11 – Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 82 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις τρεις ράβδους των κατακόρυφων δοκιμίων μικρού ύψους των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO), ενώ σε καμία ράβδο δεν ξεπεράστηκε το όριο διαρροής του χάλυβα.

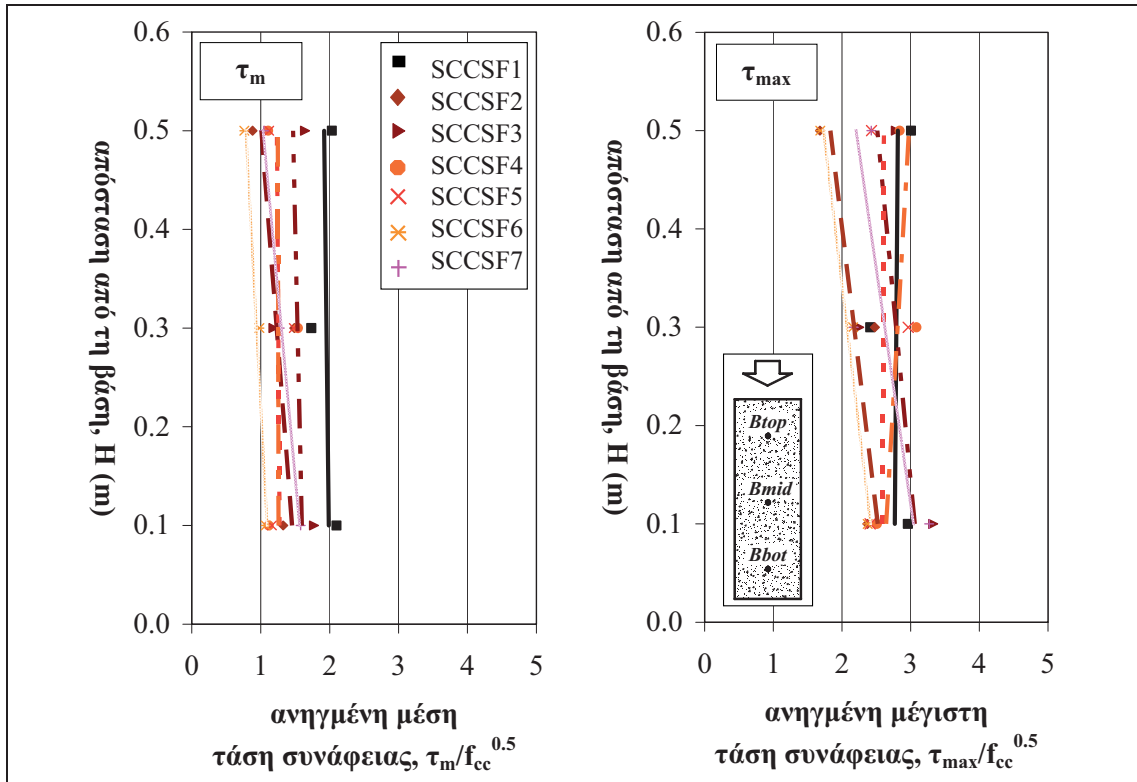
**Πίνακας 82** Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κατακόρυφων δοκιμίων, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$

κωδικός	SCC SF1	SCC SF2	SCC SF3	SCC SF4	SCC SF5	SCC SF6	SCC SF7	SCC SF8	SCC SF9	SCC SF10	SCC SF11
σύνθεση	SCC26	SCC34	SCC30	SCC35	SCC32	SCC33	SCC36	SCC16	SCC17	SCC18	SCC19
$B_{top}$	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
$B_{mid}$	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
$B_{bot}$	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO

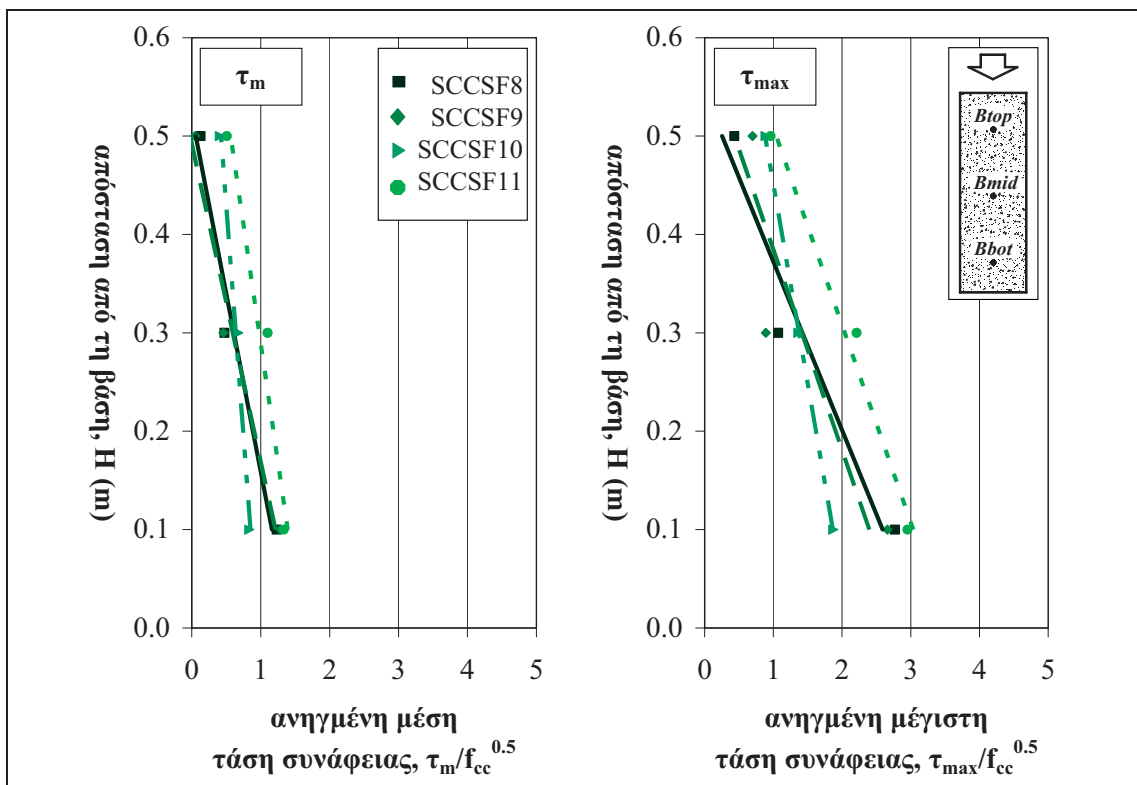
σημείωση: σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε διαρροή του χάλυβα

### Μεταβολή τάσεων καθ' ύψος

Στο Σχήμα 188 και στο Σχήμα 189 παρουσιάζονται οι γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ των ανηγμένων τιμών των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας (μέση τάση  $\tau_m$  και μέγιστη τάση  $\tau_{max}$ ) για όλα τα κατακόρυφα δοκίμια μικρού ύψους που παρασκευάστηκαν με μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , για τις υπο-ομάδες B1 (Πίν. 38, Κεφ. 2) και B2 (Πίν. 39, Κεφ. 2), αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για τα μίγματα της υπο-ομάδας B2 που έχουν μεγαλύτερο λόγο  $w/b = 0.62$  η μείωση των τάσεων καθ' ύψος είναι εντονότερη εν σχέσει προς τα μίγματα της υπο-ομάδας B1 που έχουν λόγο  $w/b = 0.51$ . Αυτό το εύρημα είναι σύμφωνο με τα αντίστοιχα ευρήματα για την υπο-ομάδα A (Πίν. 37, Κεφ. 2), όπου η μείωση καθ' ύψος ήταν πρακτικά αμελητέα για  $w/b = 0.51$  και περίπου 20 % για  $w/b = 0.61$  (όπως φαίνεται στο Σχήμα 175, αν και εδώ η μείωση είναι ακόμα μεγαλύτερη).



Σχήμα 188 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  (υποομάδα συνθέσεων B1)



Σχήμα 189 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ανηγμένων (α) μέσων και (β) μέγιστων τάσεων συνάφειας καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου μικρού ύψους για συνθέσεις ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  (υποομάδα συνθέσεων B2)

**Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)**

Ο Πίνακας 83 και ο Πίνακας 84 περιλαμβάνουν τις ανηγμένες πρωτογενείς και εκτιμώμενες, αντίστοιχα, αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας (Σχήμα 143, Παρ. 3.3.2) για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο του κατακόρυφου δοκιμίου για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  των υπο-ομάδων συνθέσεων B1 και B2 (Πίν. 38 και 39, Κεφ. 2, αντίστοιχα). Ο Πίνακας 83 περιλαμβάνει επιπλέον τις ολισθήσεις των ράβδων που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας,

**Πίνακας 83** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (πρωτογενείς τιμές) και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

αντιπρ. τάση	ράβδος	SCC SF1	SCC SF2	SCC SF3	SCC SF4	SCC SF5	SCC SF6	SCC SF7	SCC SF8	SCC SF9	SCC SF10	SCC SF11
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	2.03	0.88	1.64	1.11	1.12	0.76	1.04	0.13	0.05	0.41	0.51
	$B_{mid}$	1.73	1.49	1.18	1.54	1.48	0.98	1.28	0.47	0.46	0.67	1.10
	$B_{bot}$	2.10	1.33	1.77	1.12	1.16	1.07	1.58	1.23	1.28	0.83	1.33
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	3.00	1.68	2.78	2.84	2.43	1.68	2.43	0.43	0.70	0.89	0.96
	$B_{mid}$	2.41	2.48	2.25	3.08	2.96	2.16	2.17	1.07	0.89	1.36	2.21
	$B_{bot}$	2.96	2.37	3.33	2.51	2.41	2.37	3.27	2.77	2.66	1.87	2.95
$s_{tmax}$	$B_{top}$	1.3	2.7	2.5	3.4	3.1	2.8	2.7	4.2	7.0	2.4	3.6
	$B_{mid}$	2.0	2.2	2.0	2.6	2.3	2.6	2.8	1.7	3.2	3.0	1.9
	$B_{bot}$	1.7	2.6	2.0	2.5	3.0	1.8	3.1	2.1	3.1	2.4	2.0

**Πίνακας 84** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας (εκτιμώμενες τιμές) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

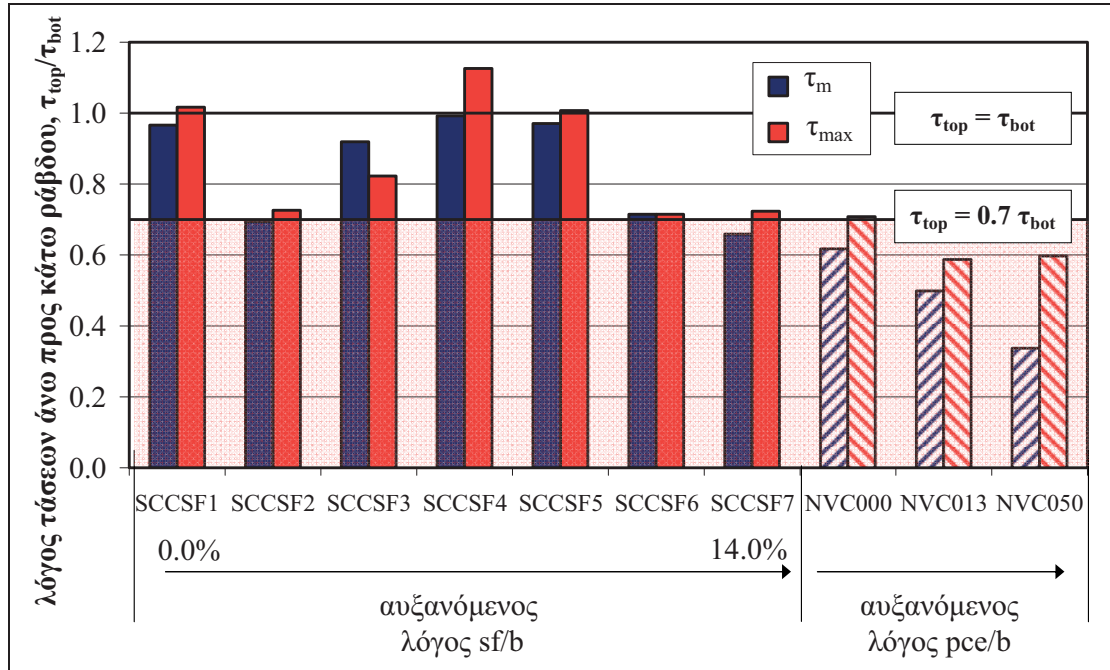
αντιπρ. τάση	ράβδος	SCC SF1	SCC SF2	SCC SF3	SCC SF4	SCC SF5	SCC SF6	SCC SF7	SCC SF8	SCC SF9	SCC SF10	SCC SF11
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	1.92	1.01	1.47	1.25	1.24	0.78	1.03	0.06	0.02	0.42	0.57
	$B_{mid}$	1.95	1.23	1.53	1.25	1.25	0.94	1.30	0.61	0.60	0.64	0.98
	$B_{bot}$	1.99	1.45	1.60	1.26	1.27	1.09	1.57	1.16	1.22	0.85	1.39
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	$B_{top}$	2.81	1.83	2.52	2.98	2.61	1.73	2.20	0.25	0.43	0.88	1.04
	$B_{mid}$	2.79	2.18	2.79	2.81	2.60	2.07	2.62	1.42	1.42	1.37	2.04
	$B_{bot}$	2.77	2.52	3.06	2.64	2.59	2.42	3.04	2.59	2.40	1.87	3.04

**Φαινόμενο άνω οπλισμών (υπο-ομάδα συνθ. B1)**

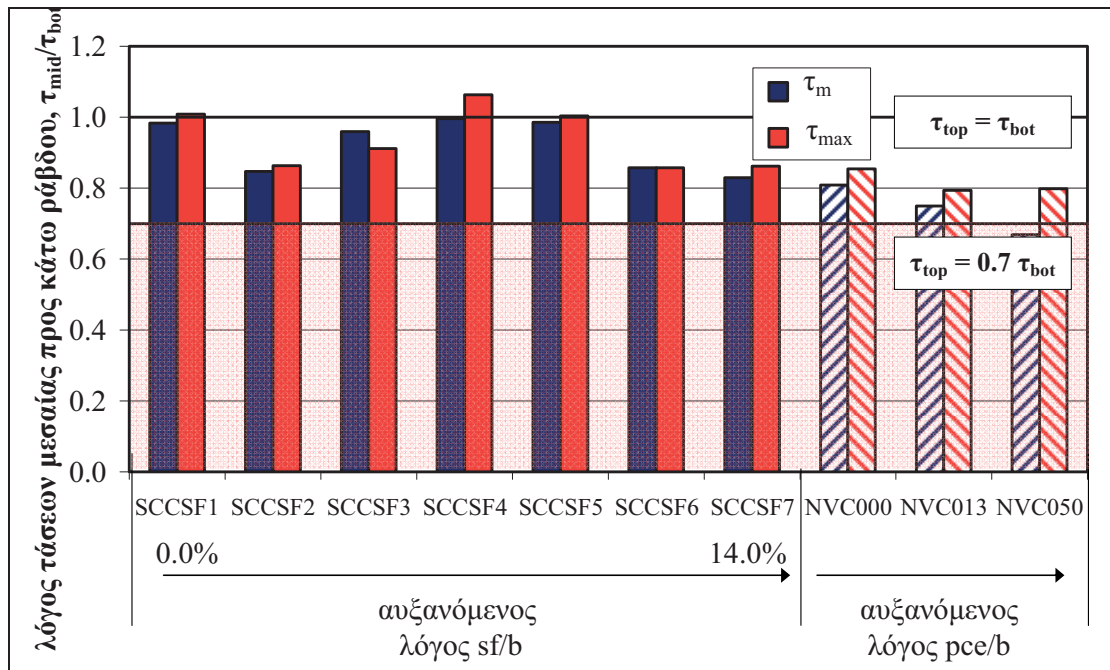
Στο Σχήμα 190 αξιολογείται η ένταση του φαινομένου άνω ράβδων μέσω των λόγων τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$ , για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , της υπο-ομάδας συνθέσεων B1, και τα ευρήματα συγκρίνονται με τους αντίστοιχους λόγους για μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , όπως προκύπτουν από τα μεγέθη που παρατίθενται στην Παρ. 3.3.2.2. Λόγοι κοντά στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται την ελαχιστοποίηση του φαινομένου άνω οπλισμών, ενώ λόγοι χαμηλότεροι από 0.7 συνεπάγονται εντονότερο φαινόμενο άνω οπλισμών από το προβλεπόμενο από τους κατασκευαστικούς κανονισμούς για περιοχές «κακής» συνάφειας. Μικρές διακυμάνσεις γύρω από τη μονάδα αποδίδονται σε εσωτερικές διακυμάνσεις των δοκιμών.

Παρατηρείται ότι το μίγμα αναφοράς SCCSF1 ( $sf/b = 0.0$  %) παρουσιάζει μία πρακτικώς μηδενική απώλεια συνάφειας καθ' ύψος. Στη συνέχεια, μία σημαντική πτώση του λόγου  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  παρατηρείται για τα χαμηλότερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη (4.9 και 6.9 % για τα μίγματα SCCSF2 και SCCSF3, αντίστοιχα). Ο λόγος  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  μεγιστοποιείται και προσεγγίζει ξανά τη μονάδα (1.0) για ποσοστά μεταξύ 8.9 και 10.6 % (SCCSF4 και SCCSF5, αντίστοιχα), τα οποία φαίνεται να ορίζουν και ένα βέλτιστο εύρος αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη για τη ελαχιστοποίηση της απώλειας συνάφειας καθ' ύψος. Για ακόμη

υψηλότερα ποσοστά  $sf/b$  (έως 14.0 %) ο λόγος  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  μειώνεται ξανά, παραμένοντας, πάντως, μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο λόγο οποιουδήποτε μίγματος ΣΣ. Η επιλογή της αντιπροσωπευτικής τάσης,  $\tau_m$  ή  $\tau_{max}$ , δε φαίνεται να επηρεάζει τα ευρήματα. Για τα μίγματα ΑΣΣ, οι υπολογισθέντες λόγοι  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  είναι πάντοτε σύμφωνοι με τις κανονιστικές προδιαγραφές (τουλάχιστον ίσοι με 70 %). Αντίθετα, παρατηρείται ότι σε όλα τα μίγματα ΣΣ η τάση της άνω ράβδου είναι μικρότερη από 70 % της αντίστοιχης τάσης της κάτω ράβδου. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η διαφορά διευρύνεται περαιτέρω για μεγαλύτερους λόγους  $pce/b$  και εντονότερα για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$ .



Σχήμα 190 Επιρροή λόγου  $sf/b$  σε μίγματα ΑΣΣ και  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$



Σχήμα 191 Επιρροή λόγου  $sf/b$  σε μίγματα ΑΣΣ και  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων μεσαίας προς κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$

Αντίστοιχα ευρήματα προκύπτουν για τη μεσαία ράβδο, η ανηγμένη τάση της οποίας στην τάση της κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ , παρουσιάζεται στο **Σχήμα 191**. Σημειώνεται ότι η θέση της μεσαίας ράβδου καθ' ύψος του κατακόρυφου δοκιμίου βρίσκεται ακριβώς στο όριο που θέτει ο κανονισμός μεταξύ των περιοχών με συνθήκες «καλής» και «κακής» συνάφειας, με αποτέλεσμα οι λόγοι  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  για το ΣΣ να είναι οριακώς αποδεκτοί (οριακά ίσοι ή μεγαλύτεροι από 70 %). Η διαφορά με την περίπτωση της άνω ράβδου είναι ότι, ενώ για το μίγμα αναφοράς και το εύρος ποσοστών αντικατάστασης μεταξύ 8.9 και 10.6 % οι λόγοι  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  είναι παρεμφερείς με τους αντίστοιχους λόγους  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  και πρακτικώς ίσοι με τη μονάδα, τα ακραία ποσοστά αντικατάστασης (μεταξύ 4.9 και 8.6 % και άνω του 10.6 %) οδηγούν σε υψηλότερους λόγους  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  (περί του 0.85 εν σχέσει προς το 0.70 των λόγων  $\tau_{top}/\tau_{bot}$ , για τα αντίστοιχα ποσοστά), αυξάνοντας έτσι το περιθώριο ασφαλείας από το όριο του κανονισμού μεταξύ των περιοχών «καλής» και «κακής» συνάφειας. Όσο αφορά στα μίγματα ΣΣ, οι κανονιστικές τιμές φαίνεται να επαρκούν οριακά, με τις τιμές του λόγου  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  να μειώνονται για μεγαλύτερα ποσοστά  $pce/b$  και εντονότερα για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$ .

Συνοψίζοντας τα παραπάνω ευρήματα, μπορεί να υποτεθεί ότι οι κανονιστικές προδιαγραφές για το ΣΣ είναι επαρκείς και για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  που εξετάστηκαν (για τη δεδομένη σύνθεση αναφοράς της υπο-ομάδας B1), με ικανοποιητικό περιθώριο ασφαλείας, ειδικά για ράβδους κοντά στο όριο μεταξύ των περιοχών με συνθήκες «καλής» και «κακής» συνάφειας και για μίγματα με λόγους  $sf/b$  μεταξύ 8.9 και 10.6 %. Από την άλλη πλευρά ο προβλεπόμενος μειωτικός συντελεστής για το υπολογισμό του φαινομένου άνω ράβδων φαίνεται να είναι οριακά επαρκής για τα μίγματα ΣΣ κοντά στο όριο μεταξύ των περιοχών με συνθήκες «καλής» και «κακής» συνάφειας, ενώ είναι ανεπαρκής για υψηλότερες θέσεις καθ' ύψος των κατακόρυφων δοκιμίων και, ειδικότερα, για μίγματα ΣΣ υψηλότερων λόγων  $pce/b$ .

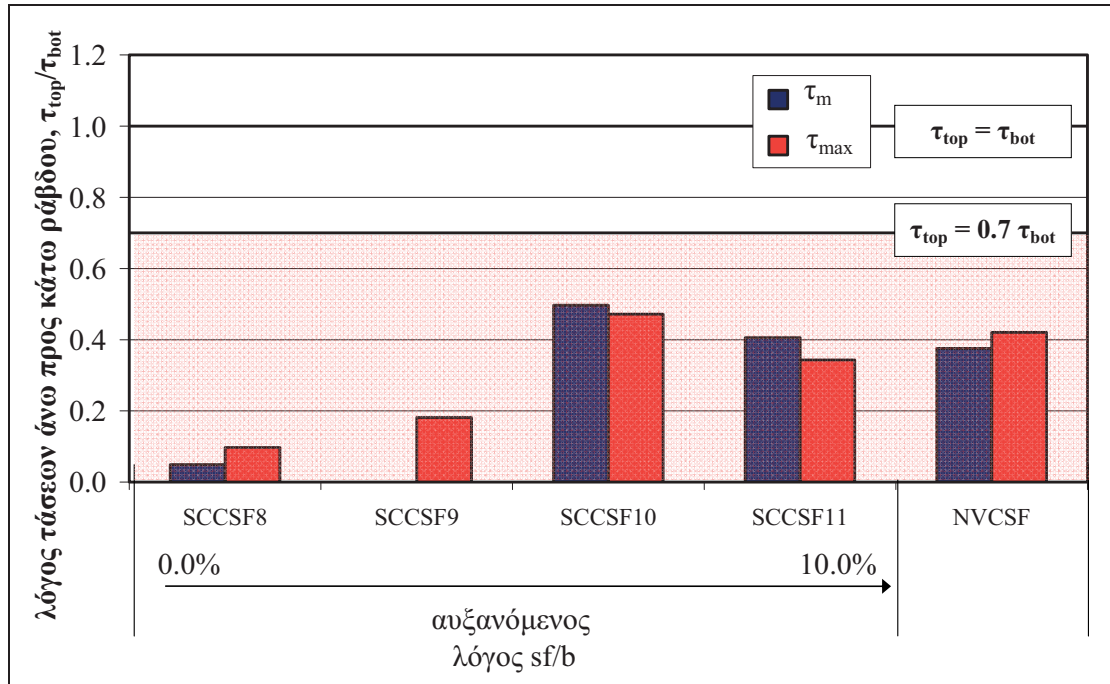
### **Φαινόμενο άνω οπλισμών (υπο-ομάδα συνθ. B2)**

Στο **Σχήμα 192** αξιολογείται η ένταση του φαινομένου άνω ράβδων μέσω των λόγων τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$ , για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , της υπο-ομάδας συνθέσεων B2, και τα ευρήματα συγκρίνονται με τους αντίστοιχους λόγους για μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , όπως προκύπτουν από τα μεγέθη που παρατίθενται στην Παρ. 3.3.2.2. Λόγοι κοντά στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται την ελαχιστοποίηση του φαινομένου άνω οπλισμών, ενώ λόγοι χαμηλότεροι από 0.7 συνεπάγονται εντονότερο φαινόμενο άνω οπλισμών από το προβλεπόμενο από τους κατασκευαστικούς κανονισμούς για περιοχές «κακής» συνάφειας. Μικρές διακυμάνσεις γύρω από τη μονάδα αποδίδονται σε εσωτερικές διακυμάνσεις των δοκιμών.

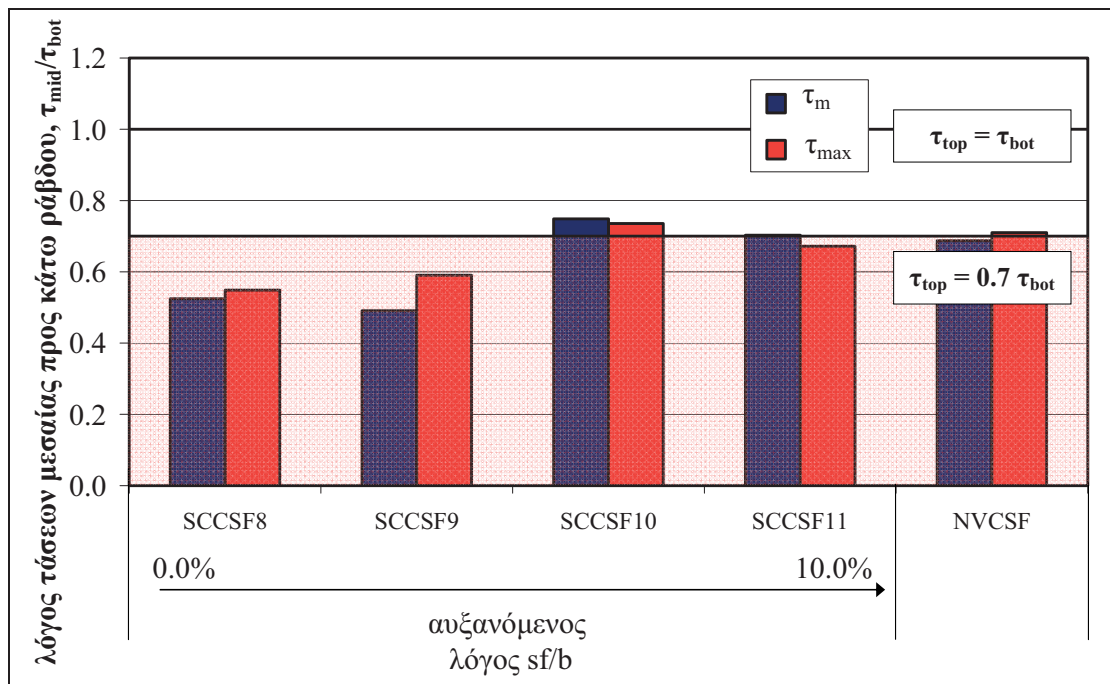
Παρατηρείται ότι για πολύ χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης (0.0 και 2.5 % για τα μίγματα SCCSF8 και SCCSF9, αντίστοιχα) ο λόγος  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  είναι πρακτικώς μηδενικός, γεγονός που αποδίδεται στις εξαιρετικά χαμηλές τάσεις που αναπτύχθηκαν στην άνω ράβδο. Για μεγαλύτερους λόγους  $sf/b$ , ο λόγος  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  αυξάνεται σημαντικά, παραμένει, πάντως, πολύ χαμηλότερος του κανονιστικώς προβλεπόμενου λόγου 0.7. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατ' αντιστοιχία με τα ευρήματα που αφορούν στην υπο-ομάδα συνθέσεων B1, για τα ποσοστά 7.5 έως 10.% ο λόγος  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  φαίνεται να βελτιστοποιείται (αν και μικρότερος του



προβλεπόμενου) και να υπερέχει, έστω και ελαφρώς, του αντίστοιχου λόγου του μίγματος αναφοράς NVCSF.



**Σχήμα 192** Επιρροή λόγου  $sf/b$  σε μίγματα ΑΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{top}/\tau_{bot}$  – Σύγκριση με μίγμα αναφοράς ΣΣ



**Σχήμα 193** Επιρροή λόγου  $sf/b$  σε μίγματα ΑΣΣ στο φαινόμενο άνω ράβδων μέσω του λόγου τάσεων άνω προς κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  – Σύγκριση με μίγμα αναφοράς ΣΣ

Εμφανώς βελτιωμένοι λόγοι τάσεων προκύπτουν για την περίπτωση της μεσαίας ράβδου, η ανηγμένη τάση της οποίας στην τάση της κάτω ράβδου,  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ , παρουσιάζεται στο **Σχήμα 193**. Αν και οι λόγοι  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$  παραμένουν χαμηλότεροι από την κανονιστικώς προβλεπόμενη τιμή 0.7, τα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου

από πυριτική παιπάλη μεταξύ 7.5 και 10.0 % οδηγούν σε αποδεκτές, έστω και οριακά, τιμές του λόγου  $\tau_{mid}/\tau_{bot}$ . Οι τιμές αυτές είναι πρακτικώς ίδιες με τον αντίστοιχο λόγο για το μίγμα αναφοράς NVCSF.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω ευρήματα της υπο-ομάδας συνθέσεων B2 και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα για την υπο-ομάδα συνθέσεων B1, μπορεί να υποθεθεί ότι οι κανονιστικές προδιαγραφές δεν είναι πάντοτε επαρκείς για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση του ΣΣ. Σημειώνεται, πάντως, ότι ο μειωτικός συντελεστής 0.7 εφαρμόζεται στις τάσεις σχεδιασμού και όχι στα πειραματικά αποτελέσματα, γεγονός που συνεπάγεται ότι, ενώ θα καταστεί επαρκής για το ΣΣ, θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο να είναι υπερτιμημένος για το ΑΣΣ και να είναι δυνατή η αύξησή του (π.χ. σε 0.8). Συνολικά, η κεντρική σύνθεση φαίνεται να αποτελεί ουσιώδους σημασίας παράμετρο για την επάρκεια του κανονιστικώς προβλεπόμενου συντελεστή μείωσης της συνάφειας καθ' ύψος. Όπως αποδείχθηκε και πειραματικά, λόγοι  $sf/b$  μεταξύ 7.5 και 10.6 % φαίνεται να οδηγούν σε σημαντικό περιορισμό του φαινομένου άνω οπλισμών εν σχέσει προς ΣΣ παρεμφερούς κοκκομετρίας, ίδιου λόγου  $w/b$  και παρόμοιας μέσης θλιπτικής αντοχής, ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου  $w/b$  και της ενσωμάτωσης ή μη ασβεστολιθικού φίλερ (που αποτελούν διαφορές μεταξύ των υπο-ομάδων συνθέσεων B1 και B2).

### 3.3.3. Επιρροή θέσης ράβδου κατά μήκος (απόσταση από σημείο έγχυσης)

Για τη διερεύνηση της μεταβολής της τάσης συνάφειας κατά μήκος οριζόντιου δοκιμίου με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της σύνθεσης ΑΣΣ, καθώς και για τη σύγκριση με τυπικές συνθέσεις ΣΣ, εξετάστηκαν συγκριτικά οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{max}$  και  $\tau_m$ , όπως αυτές προέκυψαν για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι άλλες δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις,  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_{m,int}$ , δεν εξετάστηκαν περαιτέρω.

Για κάθε οριζόντιο δοκίμιο και για κάθε μία εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων, πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των τάσεων συνάφειας των ράβδων B1 έως B9 (εξαρτημένη μεταβλητή), και της απόστασής τους από το σημείο έγχυσης (ανεξάρτητη μεταβλητή), στο άκρο του δοκιμίου. Η πιθανή κλίση της ευθείας παλινδρόμησης αναμένεται να αναδείξει την τάση μεταβολής της τάσης συνάφειας κατά μήκος του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι η ευθεία παλινδρόμησης για τα δοκίμια ΣΣ αναμένεται να είναι ιδανικώς παράλληλη με τον άξονα του μήκους, καθώς το σκυρόδεμα διαστρώθηκε με περισσότερα σημεία έγχυσης, κατανεμημένα κατά μήκος του δοκιμίου, και η μηχανική συμπίκνωση εφαρμόστηκε με ιδιαίτερη προσοχή. Παρ' όλα αυτά, ορισμένες διακυμάνσεις είναι προφανώς αναμενόμενες, λόγω των εσωτερικών διακυμάνσεων τόσο του υλικού, όσο και της ίδιας της δοκιμής εξόλκευσης. Με βάση τις πειραματικές τιμές των τάσεων συνάφειας για καθεμία εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων, οι συνθέσεις συγκρίνονται, κατά περίπτωση, βάσει: (α) της κλίσης των γραμμικών καμπυλών παλινδρόμησης και (β) των μέσων όρων των ανηγμένων τάσεων συνάφειας των  $N$  ράβδων που ελέγχθηκαν σε κάθε οριζόντιο δοκίμιο,  $\tau_{avg}/f_{cc}^{0.5}$ , που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την **Εξίσωση (3.9)**, και των αντίστοιχων συντελεστών διακύμανσης (τυπική απόκλιση προς μέση τιμή),  $cov$ , και (γ) της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ . Επιπλέον, (δ) οι μέσοι όροι  $\tau_{avg}$  που αφορούν στα

οριζόντια δοκίμια συγκρίθηκαν με την μέση τάση συνάφειας,  $\tau_{cub}$ , των τριών πρότυπων κυβικών δοκιμίων, όπως αυτή υπολογίστηκε στο πλαίσιο που περιγράφεται στην Παρ. 3.3.1. Η πιθανή πλήρης ταύτιση των ανηγμένων τιμών συνεπάγεται την αμελητέα απώλεια συνάφειας κατά μήκος του οριζόντιου δοκιμίου (των δεδομένων διαστάσεων διατομής και μήκους).

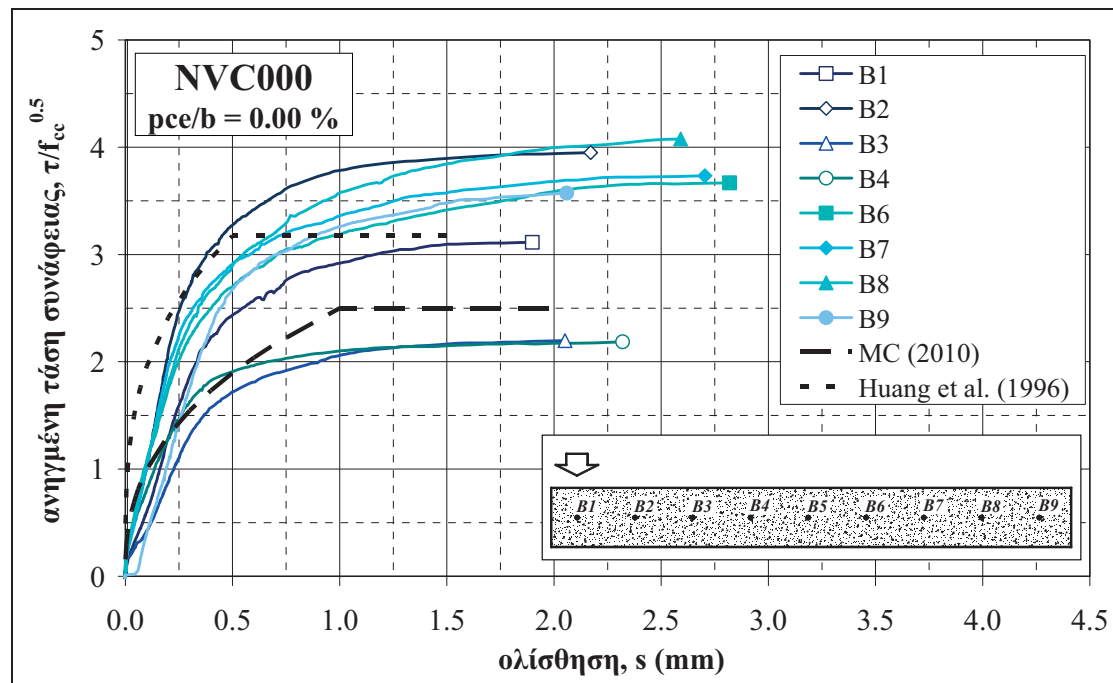
$$\tau_{avg}/f_{cc}^{0.5} = avg\{(\tau/f_{cc}^{0.5})_N\} \quad (3.9)$$

Σε μέρος των συνθέσεων και στις ράβδους ζυγής αρίθμησης, ήτοι στις B2, B4, B6 και B8, επιβλήθηκαν μετακινήσεις κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, ώστε να μελετηθεί η επιρροή αθέλητων μετακινήσεων στη συνάφεια. Στην περίπτωση αυτή η γραμμική παλινδρόμηση των αμετακίνητων ράβδων, όπως αυτή αναφέρθηκε παραπάνω, πραγματοποιήθηκε για τις ράβδους μονής αρίθμησης, ήτοι τις B1, B3, B5, B7 and B9 (εξαρτημένη μεταβλητή) και όχι για το σύνολο των ράβδων. Η μεθοδολογία εφαρμογής των μετακινήσεων και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων περιγράφεται στην Παράγραφο 3.3.5.

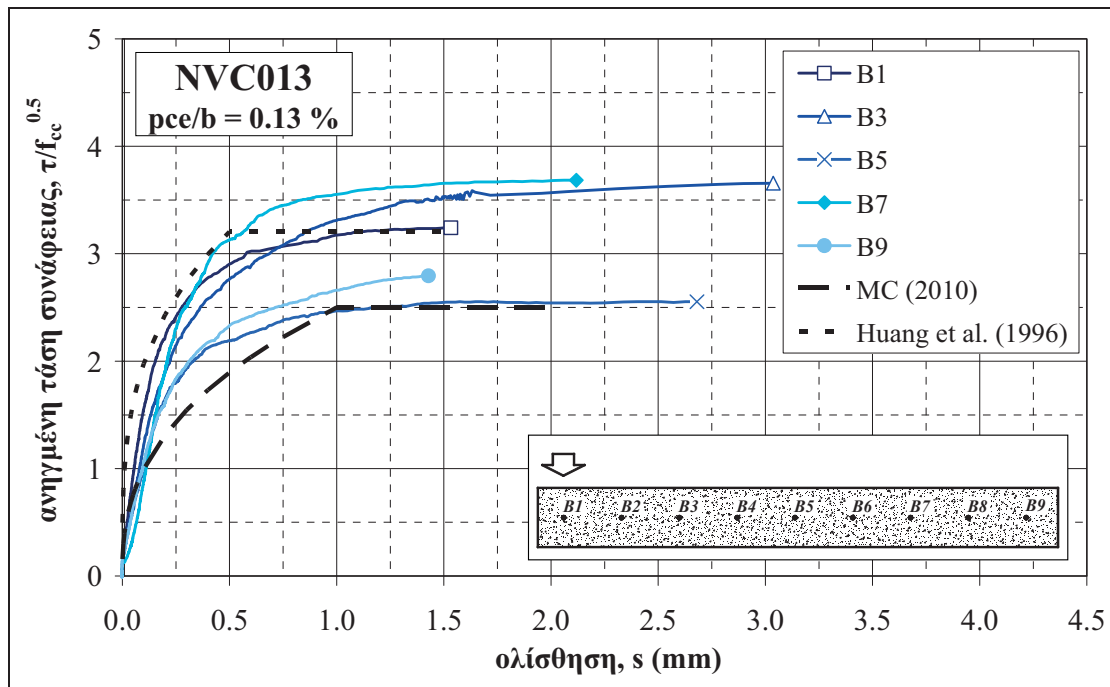
### 3.3.3.1. Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

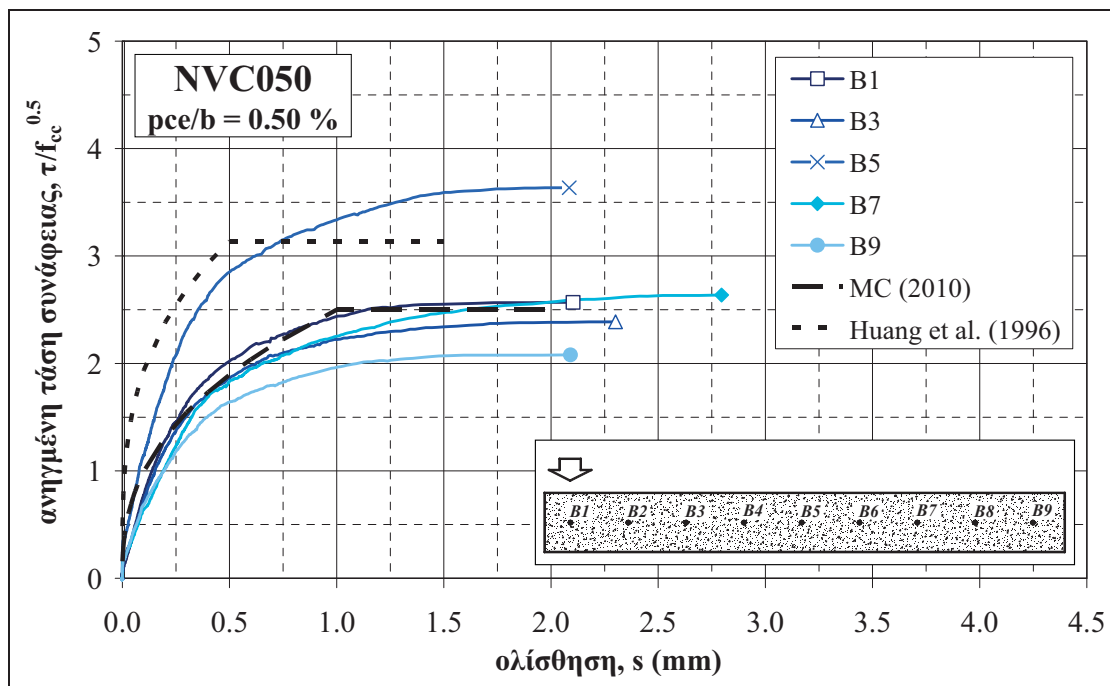
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 194 έως Σχήμα 196), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  (μη μετακινηθείσες ράβδοι).



Σχήμα 194 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC000– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 195 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης NVC013– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 196 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης NVC050– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 85 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις τρεις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών των μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Στον Πίνακα σημειώνονται οι ράβδοι, στις οποίες η τάση εξόλκευσης ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα. Υπενθυμίζεται ότι για τα μίγματα NVC025 και NVCSF δεν παρασκευάστηκαν οριζόντια δοκίμια.

Επίσης, σημειώνεται ότι η ράβδος B5 του μίγματος NVC000 αγνοήθηκε, καθώς το περιβάλλον σε αυτήν σκυρόδεμα αστόχησε κατά τη φάση της απομάκρυνσης του ξυλότυπου. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO), ενώ υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα παρατηρήθηκε σε δύο ράβδους του μίγματος NVC000 (B2 και B8) και σε μία ράβδο του μίγματος NVC013 (B2).

**Πίνακας 85** Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμίων, ανά σύνθεση ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
NVC000	NVC11	PO	PO	PO	PO	***	PO	PO	PO**	PO
NVC013	NVC13	PO	*	PO	*	PO	*	PO	*	PO
NVC050	NVC14	PO	*	PO	*	PO	*	PO	*	PO

\*η ράβδος ελέγχθηκε στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη σκυροδέματος

\*\*διαρροή χάλυβα \*\*\*δεν πραγματοποιήθηκε

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 86 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{tmax}$ , για όλες τις ράβδους που ελέγχθηκαν στα οριζόντια δοκίμια των μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Σημειώνεται ότι μέρος των ράβδων, οι οποίες μετακινήθηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος (όπως θα περιγραφεί στην Παρ. 3.3.5), αγνοήθηκαν, ως εκ τούτου το πλήθος  $N$  των ράβδων που χρησιμοποιούνται για την παρούσα ανάλυση είναι μεταβλητό, ανάλογα με το εξεταζόμενο κάθε φορά μίγμα. Επιπροσθέτως, υπενθυμίζεται ότι η ράβδος B5 του μίγματος NVC000 αγνοήθηκε, καθώς το περιβάλλον σε αυτήν σκυρόδεμα αστόχησε κατά τη φάση της απομάκρυνσης του ξυλότυπου.

Στον Πίνακα έχουν, επιπλέον, υπολογιστεί οι μέσες τιμές,  $m$  ή  $\tau_{Bm}$ , και οι συντελεστές διακύμανσης (μέση τιμή προς την τυπική απόκλιση),  $con$  (%), των  $N$  ράβδων που ελέγχθηκαν. Οι εν λόγω τιμές έχουν νόημα να υπολογιστούν στο ΣΣ, μιας και οι μεταβολές κατά μήκος των δοκιμίων αναμένεται να είναι ιδανικώς ασήμαντες. Στην πραγματικότητα, οι μεταβολές είναι υπαρκτές και οφείλονται σε ενδογενείς διασπορές του υλικού και των δοκιμών. Όπως θα αναφερθεί παρακάτω (Παρ. 3.3.3.2 και 3.3.3.3), ακόμη και στην περίπτωση του ΑΣΣ, κατά την οποία το δοκίμιο διαστρώθηκε με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο, οι μεταβολές των τάσεων κατά μήκος δεν επηρεάζονταν από την απόσταση.

**Πίνακας 86** Χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

μέγεθος	κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$\tau_{Bm}$	$con$
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	NVC000	NVC11	1.21	1.69	0.88	1.05	**	1.50	1.53	1.63	1.23	1.34	22%
	NVC013	NVC13	1.66	*	1.61	*	1.24	*	1.52	*	1.32	1.47	12%
	NVC050	NVC14	1.11	*	1.06	*	1.61	*	1.03	*	0.94	1.15	23%
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	NVC000	NVC11	3.11	3.95	2.20	2.19	**	3.67	3.73	4.08	3.57	3.31	23%
	NVC013	NVC13	3.24	*	3.66	*	2.55	*	3.68	*	2.79	3.19	16%
	NVC050	NVC14	2.57	*	2.39	*	3.64	*	2.64	*	2.08	2.66	22%
$s_{tmax}$	NVC000	NVC11	1.9	2.2	2.1	2.3	**	2.8	2.7	2.6	2.1	2.3	15%
	NVC013	NVC13	1.5	*	3.0	*	2.7	*	2.1	*	1.4	2.1	35%
	NVC050	NVC14	2.1	*	2.3	*	2.1	*	2.8	*	2.1	2.3	13%

\*η ράβδος ελέγχθηκε στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη σκυροδέματος

\*\*δεν πραγματοποιήθηκε

### 3.3.3.2. Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )<sup>5</sup>

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 197 έως Σχήμα 201), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν βάσει των συνθέσεων της υπο-ομάδας Α, μεταβλητού λόγου  $w/b$  (μη μετακινηθείσες ράβδοι, Πίν. 37, Κεφ. 2).

Από τις καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων, παρατηρείται ότι για τις ράβδους του οριζόντιου δοκιμίου, το μίγμα SCCWB1 ανέπτυξε σημαντικά πιο ψαθυρή συμπεριφορά εν σχέσει προς οποιοδήποτε άλλο μίγμα και αστόχησε σε διάρρηξη (αστοχία ‘SP’). Η εν λόγω αστοχία θα μπορούσε να αποδοθεί στην μειωμένη ομοιογένεια του σκυροδέματος λόγω του χαμηλού λόγου  $w/b$ , γεγονός που μπορεί να περιορίσει σημαντικά την ικανότητα των τάσεων να αναδιανέμονται ελεύθερα στην μεταβατική ζώνη μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, κατά την εκτέλεση της δοκιμής εξόλκευσης και να οδηγήσει σε αστοχία σε διάρρηξη του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι το ως άνω εύρημα δεν παρατηρήθηκε στην περίπτωση του κατακόρυφου δοκιμίου (Παρ. 3.3.2.3), γεγονός που αποδίδεται στη χαμηλότερη αναμενόμενη απόμιξη λόγω της μεθόδου διάστρωσης και της γεωμετρίας του δοκιμίου, συγκριτικά με το οριζόντιο δοκίμιο. Για τα μίγματα SCCWB2 έως SCCWB5 η δυσκαμψία της καμπύλης φαίνεται να μειώνεται σταδιακά, ενώ η ολίσθηση  $\sigma_{\text{tmax}}$  φαίνεται να αυξάνεται για υψηλότερους λόγους  $w/b$ .

#### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

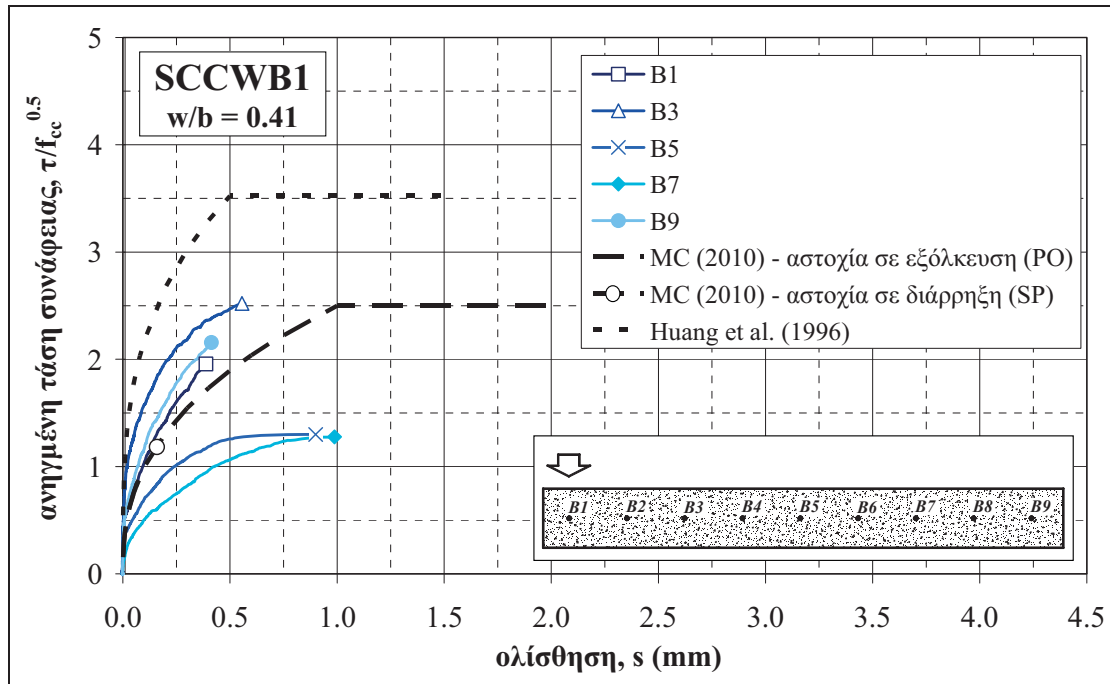
Ο Πίνακας 87 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις εννέα ράβδους των οριζόντιων δοκιμών των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Σημειώνεται ότι στις ράβδους ζυγής αρίθμησης (B2, B4, B6 και B8) των δοκιμών των SCCWB1 και SCCWB5 πραγματοποιήθηκαν μετακινήσεις ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος, όπως θα περιγραφεί στην Παρ. 3.3.5. Οι ράβδοι αυτές δεν δοκιμάστηκαν σε εξόλκευση, καθώς είχαν χαρακτήρα εξοικείωσης (διαφορετικοί τρόποι επιβολής μετακινήσεων, διαφορετικά εύρη μετακινήσεων, κ.λπ.) και δεν θα ήταν συγκρίσιμες μεταξύ τους και, συνεπώς, αξιολογήσιμες. Με εξαίρεση τις ράβδους της SCCWB1, οι οποίες στο σύνολό τους αστόχησαν σε διάρρηξη, σε όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις παρατηρήθηκε αστοχία λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO). Δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα σε οποιαδήποτε ράβδο.

Πίνακας 87 Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης οριζόντιων δοκιμών, ανα σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

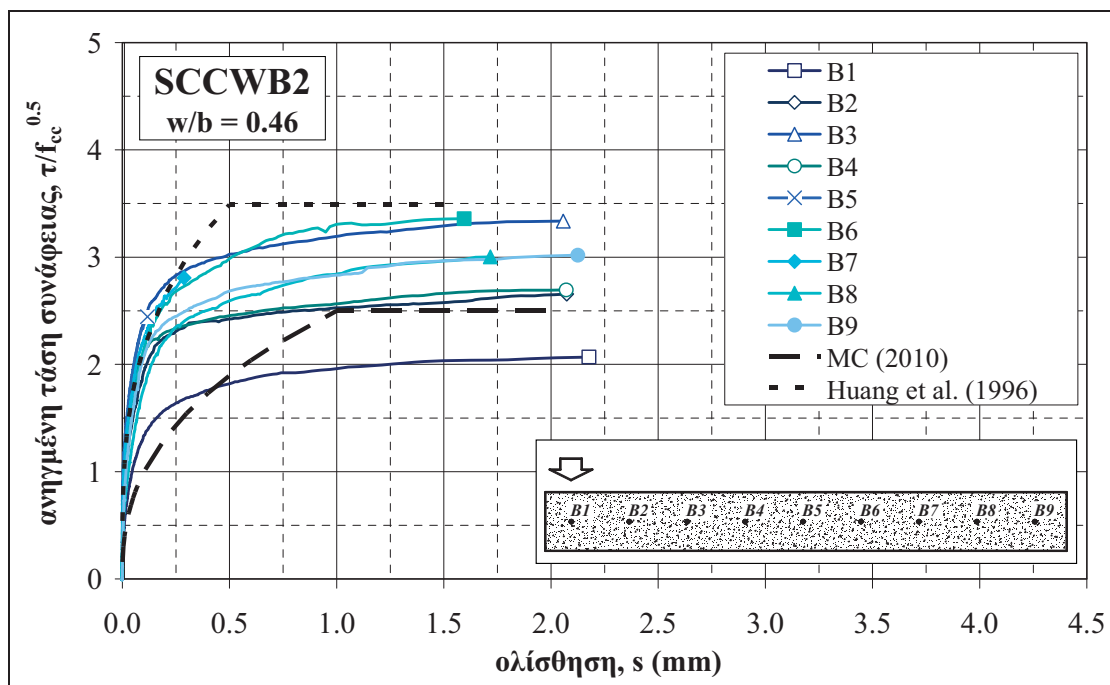
κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
SCCWB1	SCC29	SP	*	SP	*	SP	*	SP	*	SP
SCCWB2	SCC27	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
SCCWB3	SCC26	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
SCCWB4	SCC28	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
SCCWB5	SCC31	PO	*	PO	*	PO	*	PO	*	PO

\*δεν πραγματοποιήθηκε, σημείωση: σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε διαρροή του χάλυβα

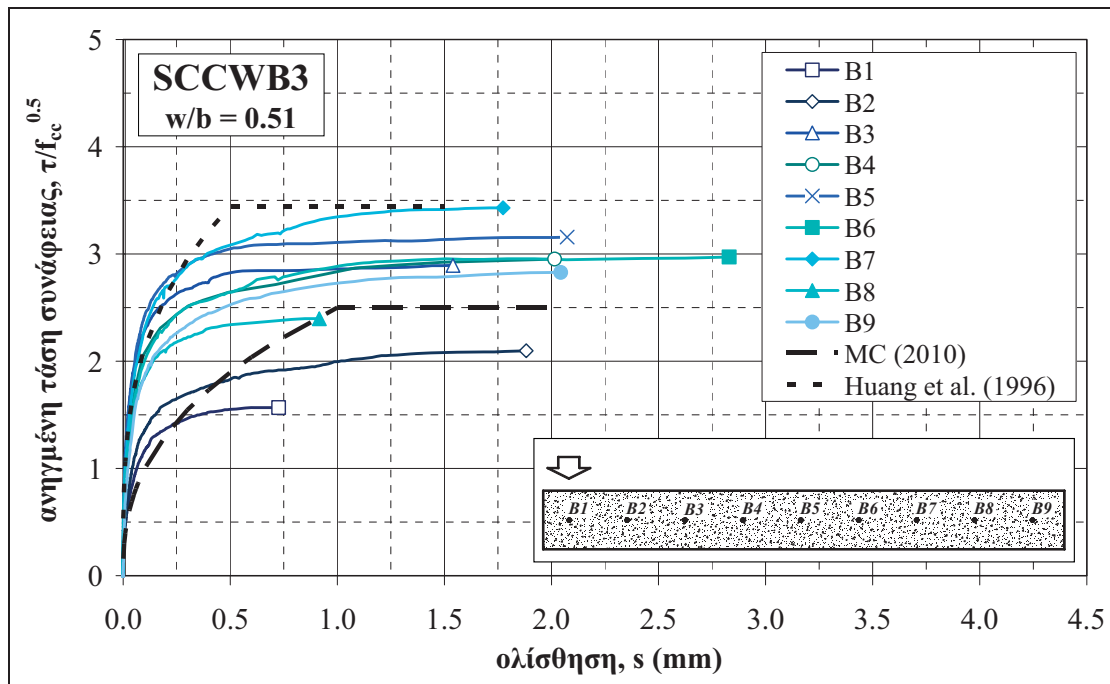
<sup>5</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στο επιστημονικό περιοδικό [Cement & Concrete Composites \[Trezos et al. \(2014\)\]](#)



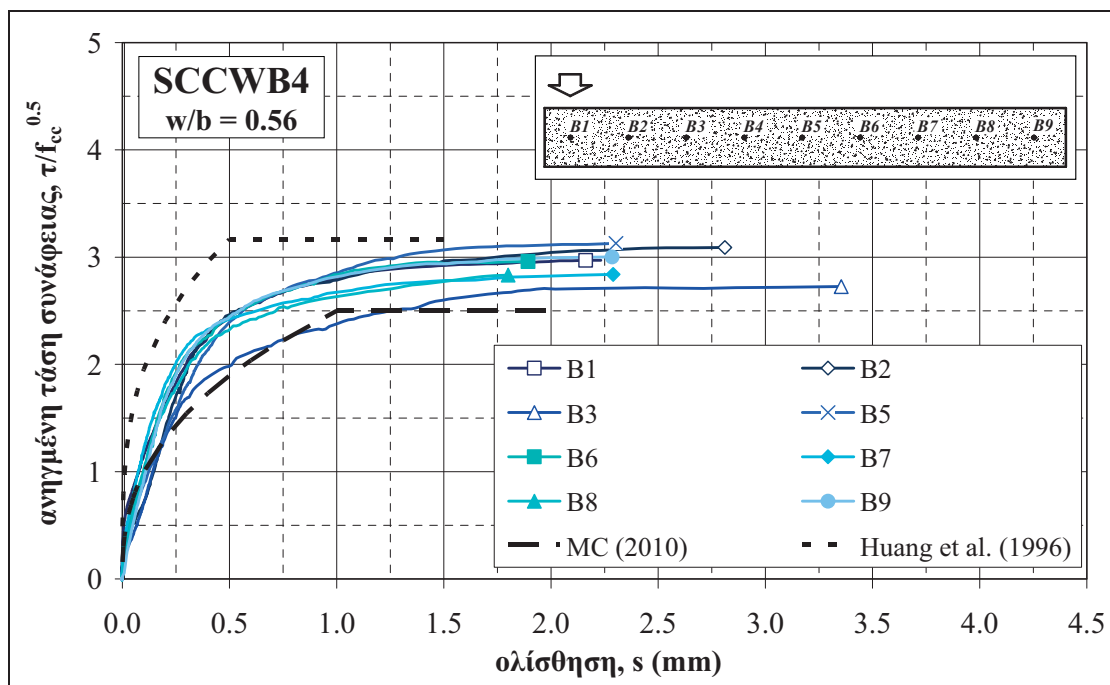
Σχήμα 197 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 198 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

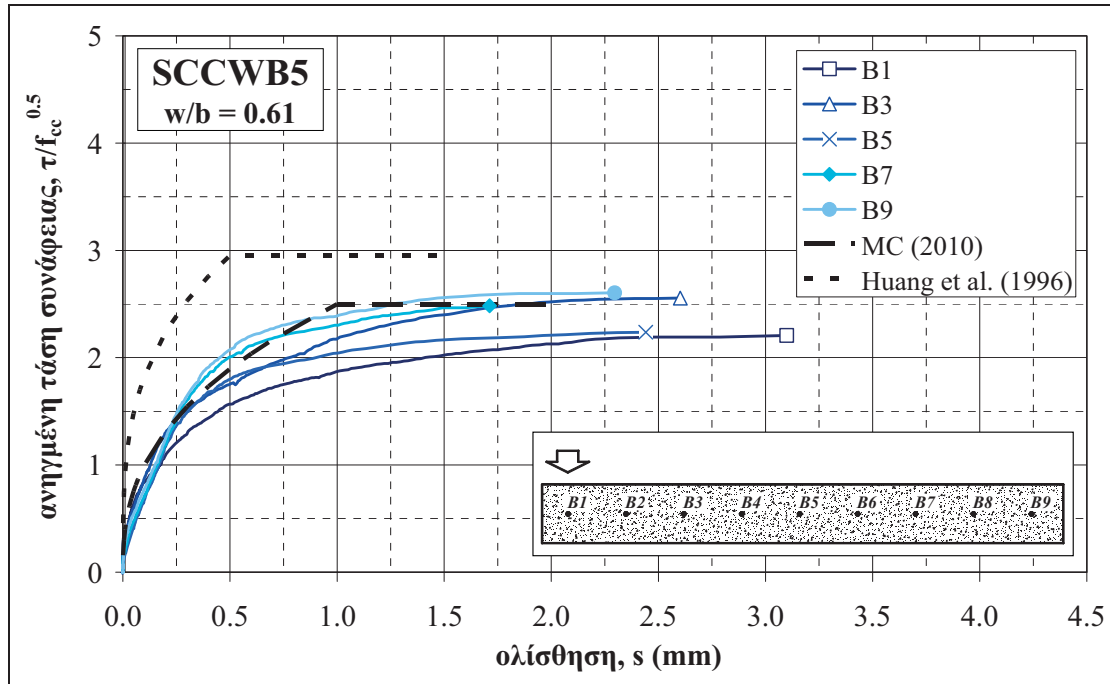


Σχήμα 199 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB3– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 200 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB4– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας





Σχήμα 201 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσεως της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCWB5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 88 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για όλες τις ράβδους που ελέγχθηκαν στα οριζόντια δοκίμια των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ .

Πίνακας 88 Χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

μέγεθος	κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$\tau_{Bm}$	cov
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	SCCWB1	SCC29	1.17	*	1.63	*	0.79	*	0.65	*	1.28	1.11	36%
	SCCWB2	SCC27	1.27	1.79	2.24	1.91	2.01	2.12	2.04	1.76	1.90	1.89	15%
	SCCWB3	SCC26	1.07	1.27	2.09	1.95	2.19	1.94	2.21	1.72	1.75	1.80	22%
	SCCWB4	SCC28	1.50	1.28	1.11	*	1.36	1.40	1.41	1.27	1.27	1.33	9%
	SCCWB5	SCC31	1.01	*	1.12	*	0.95	*	1.07	*	1.14	1.06	7%
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	SCCWB1	SCC29	1.96	*	2.52	*	1.30	*	1.28	*	2.16	1.84	30%
	SCCWB2	SCC27	2.07	2.66	3.34	2.69	2.44	3.36	2.81	3.00	3.02	2.82	15%
	SCCWB3	SCC26	1.56	2.09	2.89	2.95	3.15	2.97	3.43	2.39	2.82	2.70	21%
	SCCWB4	SCC28	2.97	3.09	2.73	**	3.13	2.96	2.84	2.83	3.00	2.94	5%
	SCCWB5	SCC31	2.21	*	2.56	*	2.24	*	2.48	*	2.60	2.42	8%
$s_{\tau_{max}}$	SCCWB1	SCC29	0.4	*	0.6	*	0.9	*	1.0	*	0.4	0.7	43%
	SCCWB2	SCC27	2.2	2.1	2.1	2.1	0.1	1.6	0.3	1.7	2.1	1.6	51%
	SCCWB3	SCC26	0.7	1.9	1.5	2.0	2.1	2.8	1.8	0.9	2.0	1.8	36%
	SCCWB4	SCC28	2.2	2.8	3.4	**	2.3	1.9	2.3	1.8	2.3	2.4	21%
	SCCWB5	SCC31	3.1	*	2.6	*	2.4	*	1.7	*	2.3	2.4	21%

\*δεν πραγματοποιήθηκε

Από τους υπολογισθέντες συντελεστές διακύμανσης, cov (%), των  $N$  ράβδων που ελέγχθηκαν, που υπολογίζονται ως το πηλίκο της μέσης τιμής προς την τυπική απόκλιση, προκύπτει ότι η διακύμανση των τιμών των τάσεων συνάφειας είναι, κατά κανόνα, ίση ή χαμηλότερη στην περίπτωση του ΑΣΣ (Πίνακας 88) εν σχέσει προς το προσεκτικά διαστρωμένο ΣΣ (Πίνακας 86). Συνεπώς, η διακύμανση αυτή αποδίδεται αποκλειστικά στην εσωτερική ανομοιογένεια του υλικού ή την εσωτερική διασπορά

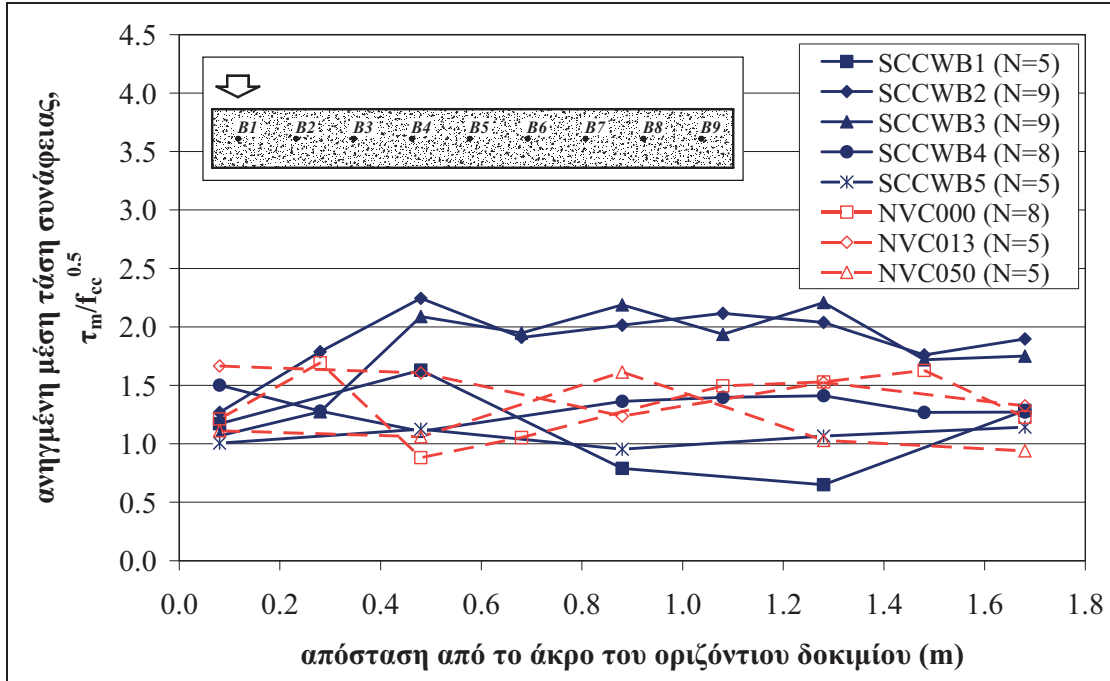
των δοκιμών (λόγω μηχανικού εξοπλισμού) και όχι στις μεταβολές της σύνθεσης και, εν προκειμένω, του λόγου  $w/b$ . Ως εκ τούτου, εφόσον οι μεταβολές των τάσεων κατά μήκος δεν συναρτώνται από την απόσταση από το σημείο έγχυσης για το δεδομένο μήκος δοκιμίου, στον Πίνακα έχουν, επιπλέον, υπολογιστεί οι μέσες τιμές,  $m$  ή  $\tau_{Bm}$ , των  $N$  ράβδων που ελέγχθηκαν, ώστε να αξιολογηθούν συγκριτικά βάσει της σύνθεσης ΑΣΣ.

### Διακύμανση ανηγμένων τάσεων κατά μήκος του οριζόντιου δοκιμίου

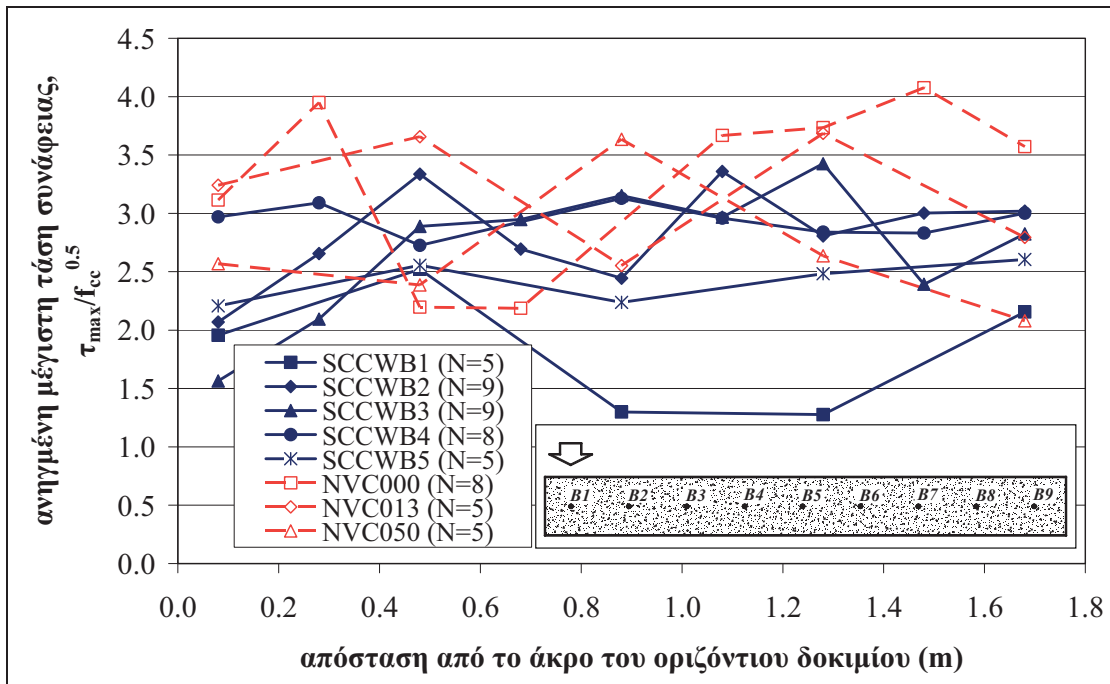
Στο **Σχήμα 202** και στο **Σχήμα 203** παρουσιάζονται οι ανηγμένες τάσεις συνάφειας των  $N$  διαδοχικών ράβδων κάθε μίγματος, για την περίπτωση των αντιπροσωπευτικών τάσεων  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ , αντίστοιχα. Από τα Σχήματα δεν παρατηρείται απώλεια της τάσης συνάφειας κατά μήκος του δοκιμίου συναρτήσει της απόστασης της ράβδου από το σημείο έγχυσης για καμία εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων. Η μεταβλητότητα των τιμών των ανηγμένων τάσεων συνάφειας φαίνεται να είναι συγκρίσιμη μεταξύ των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ και, μάλιστα, ελαφρώς μικρότερη στο ΑΣΣ για την περίπτωση της  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και αποδίδονται στην εσωτερική μεταβλητότητα τόσο του υλικού όσο και των διαδικασιών ελέγχου. Σημειώνεται ότι η μεταβλητότητα λόγω των διαδικασιών ελέγχου αναμένεται να είναι κοινή, ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, μπορεί να αναφερθεί ότι η απουσία μηχανικής δόνησης και η ελεύθερη ροή του ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  δε φαίνεται να επηρεάζουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις συνάφειας για τη μετρηθείσα απόσταση από το σημείο έγχυσης (έως 1.60 m μεταξύ των ράβδων B1 και B9).

### Σύγκριση ανηγμένων τάσεων οριζόντιων και κυβικών δοκιμίων

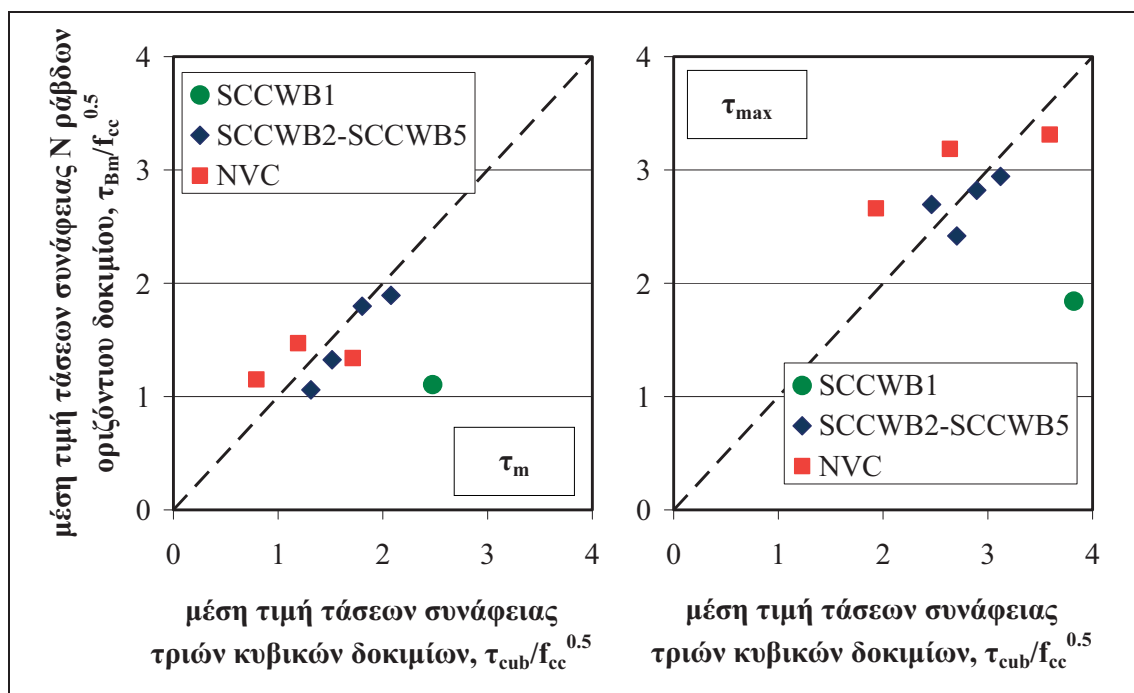
Στο **Σχήμα 204**, οι μέσες ανηγμένες τιμές των τάσεων συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων κάθε οριζόντιου δοκιμίου,  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$ , συγκρίνονται με τις μέσες τιμές των τάσεων συνάφειας των κυβικών δοκιμίων,  $\tau_{cub}/f_{cc}^{0.5}$  ( $= m$ ), όπως είχαν υπολογιστεί στην Παρ. 3.3.1 (Πίνακας 70), για καθεμία εκ των αντιπροσωπευτικών τάσεων  $\tau_m$  (Σχήμα 204α) ή  $\tau_{max}$  (Σχήμα 204β). Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των τιμών ορίζεται από τη διαγώνιο. Αξίζει να αναφερθεί ότι για το μίγμα SCCWB1 οι μέση τιμή των τάσεων συνάφειας των κύβων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με την αντίστοιχη μέση τιμή των  $N$  ελεγμένων ράβδων του οριζόντιου δοκιμίου, καθώς οι τύποι αστοχίας ήταν διαφορετικοί. Συγκεκριμένα, όλες οι ράβδοι των κύβων αστόχησαν σε εξόλκευση, ενώ οι ράβδοι του οριζόντιου δοκιμίου σε διάρρηξη, γεγονός που ερμηνεύει τη μικρότερη τιμή στην περίπτωση του οριζόντιου δοκιμίου. Για τα υπόλοιπα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρατηρείται ικανοποιητική σύμπτωση των τιμών, η οποία είναι ελαφρώς μικρότερη για την περίπτωση των ΣΣ. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι για γραμμικά ή επιφανειακά στοιχεία με συνολικό μήκος έως 3.20 m (με μοναδικό σημείο έγχυσης στο κέντρο γραμμικού στοιχείου:  $2 \times 1.60$  m, όπου 1.60 m η μετρηθείσα απόσταση από το σημείο έγχυσης έως την πλέον απομακρυσμένη ράβδο) ή συνολική επιφάνεια περίπου  $10 \text{ m}^2$  (με μοναδικό σημείο έγχυσης κεντρικά σε επιφανειακό στοιχείο διαστάσεων:  $3.20 \times 3.20$  m) μπορούν να σκυροδετηθούν με μοναδικό σημείο έγχυσης χωρίς να κινδυνεύουν με απώλεια συνάφειας των πιο απομακρυσμένων ράβδων. Πάντως, τονίζεται ότι υψηλά ποσοστά όπλισης ή περίπλοκη γεωμετρία θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την ικανότητα αυτή.



Σχήμα 202 Ανηγμένη μέση τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης στο άκρο του οριζώντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$



Σχήμα 203 Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης στο άκρο του οριζώντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$



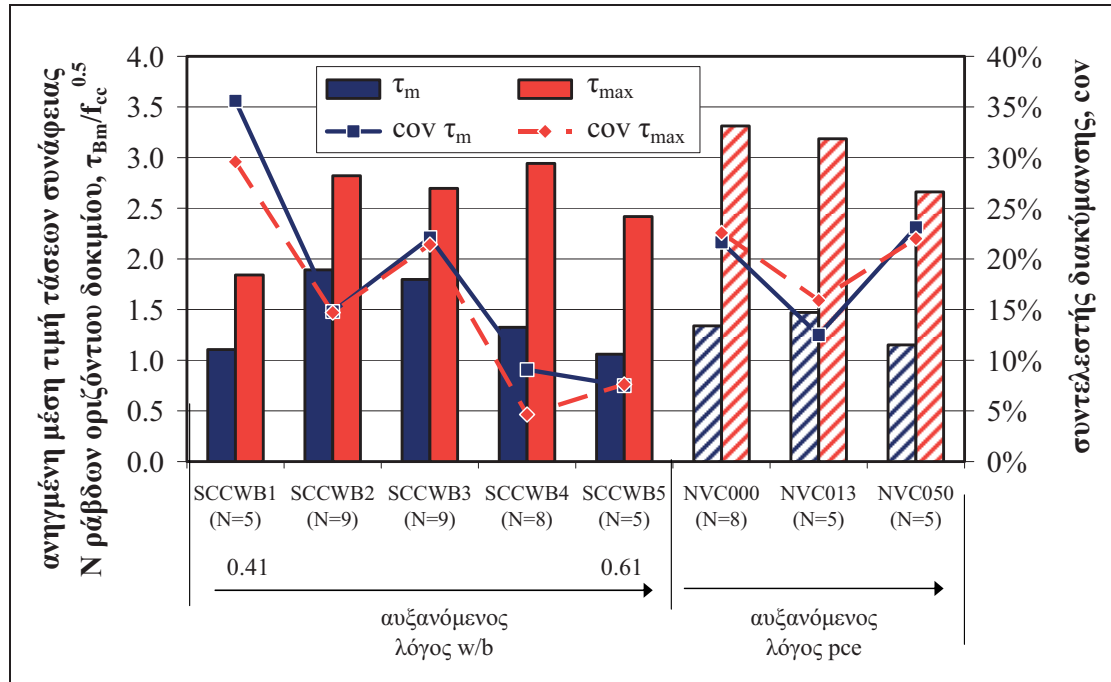
**Σχήμα 204** Συγκριτική αξιολόγηση μέσω τιμών ανηγμένων τάσεων συνάφειας  $N$  ράβδων οριζόντιου δοκιμίου και μέσω τιμών ανηγμένων τάσεων συνάφειας τριών κυβικών δοκιμίων για μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , για την περίπτωση (α) της μέσης τάσης συνάφειας και (β) της μέγιστης τάσης συνάφειας

### Μέσες τιμές ανηγμένων τάσεων οριζόντιων δοκιμίων

Στο **Σχήμα 205**, οι ανηγμένες τιμές  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$  παρουσιάζονται συγκριτικά για τις δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις,  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ . Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές διακύμανσης (τυπική απόκλιση προς μέση τιμή  $N$  ελεγμένων ράβδων),  $con$  (%). Με εξαίρεση το μίγμα SCCWB1, στο οποίο λόγω του τρόπου αστοχίας (αστοχία σε διάρρηξη σκυροδέματος) η ανηγμένη τιμή είναι σημαντικά μειωμένη, φαίνεται ότι η αύξηση του λόγου  $w/b$  οδηγεί σε μία σαφή μείωση των ανηγμένων μέσων τιμών  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$  για την περίπτωση της αντιπροσωπευτικής τάσης  $\tau_m$ , σε αντίθεση με τη μέγιστη τάση  $\tau_{max}$ , για την οποία τα αποτελέσματα δεν είναι σαφή. Η διακύμανση των τιμών είναι παρεμφερής για τις δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις και φαίνεται να μειώνεται για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ . Αξίζει να αναφερθεί η πολύ υψηλή τιμή της διακύμανσης για το μίγμα SCCWB1 (Πίνακας 88,  $con = 36$  και  $30$  % για την  $\tau_m$  και την  $\tau_{max}$ , αντίστοιχα), η οποία είναι αναμενόμενη λόγω του τρόπου αστοχίας (αστοχία σε διάρρηξη σκυροδέματος) όλων των ράβδων του εν λόγω δοκιμίου, που οδηγεί σε πιο ψαθυρή συμπεριφορά και, επομένως, πολύ μεγαλύτερη μεταβλητότητα.

Για την περίπτωση των ΣΣ και για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$ , η ανηγμένη τάση  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$  δε φαίνεται να συσχετίζεται με την μεταβολή της εργασιμότητας, ενώ, αντίθετα, η αύξηση του λόγου  $pce/b$  οδηγεί σε μικρή, αν και σαφή, μείωση της τάσης για την περίπτωση της αντιπροσωπευτικής τάσης  $\tau_{max}$ . Οι υπολογισθέντες συντελεστές διακύμανσης κυμαίνονται μεταξύ  $12$  και  $23$  %. Είναι φανερό ότι για την περίπτωση ίδιου λόγου  $w/b$  ( $0.51$ , SCCWB3) τα μίγματα ΣΣ αναπτύσσουν χαμηλότερη μέση ανηγμένη τιμή για την  $\tau_m$  από το μίγμα ΑΣΣ και υψηλότερη μέση ανηγμένη τιμή για την  $\tau_{max}$ , με παρεμφερείς, πάντως, συντελεστές διακύμανσης. Για την περίπτωση ίδιας μέσης θλιπτικής αντοχής ( $\sim 50$  N/mm<sup>2</sup>, SCCWB4), το ΑΣΣ

αναπτύσσει παρεμφερείς τάσεις με το ΣΣ, ανεξαρτήτως της αντιπροσωπευτικής τάσης που εξετάζεται, αλλά με σημαντικά μειωμένο συντελεστή διακύμανσης.



Σχήμα 205 Επιρροή λόγου w/b σε μίγματα ΑΣΣ και pcc/b σε μίγματα ΣΣ στη μέση ανηγμένη τιμή τάσεων συνάφειας N ράβδων του οριζόντιου δοκιμίου,  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$

### 3.3.3.3. Επιρροή πυριτικής παιτάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου (sf/b)

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 206 έως Σχήμα 209), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου sf/b (υπο-ομάδα συνθέσεων B1, μη μετακινηθείσες ράβδοι, Πίν. 38, Κεφ. 2).

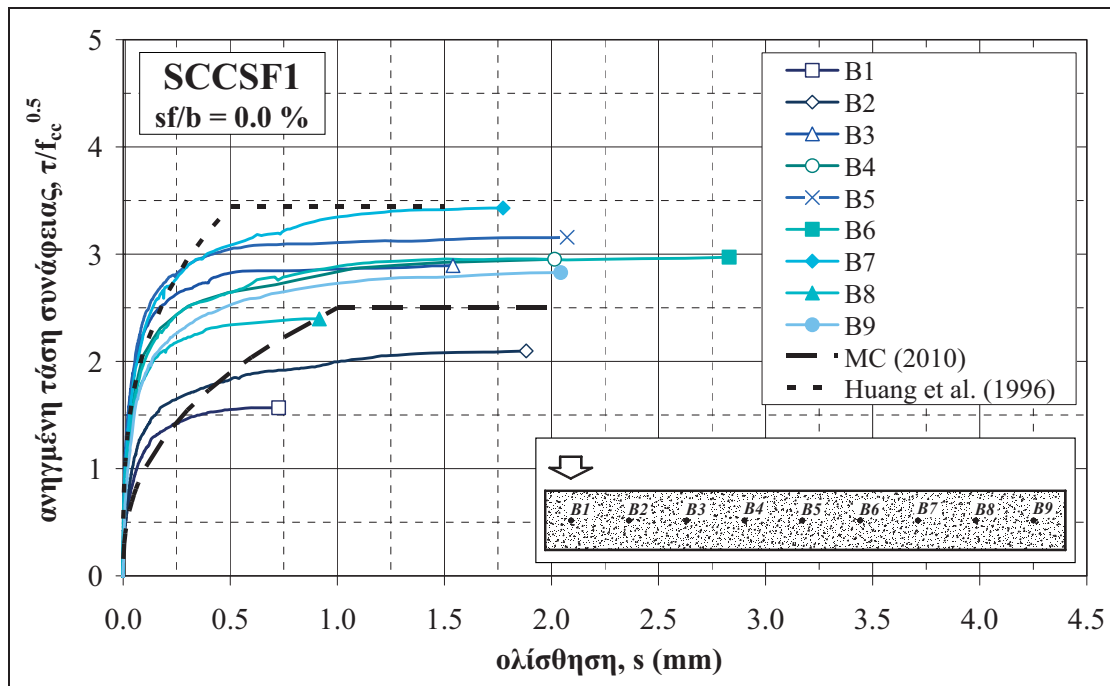
#### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 89 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις τρεις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων μικρού ύψους των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου sf/b. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO), ενώ σε καμία ράβδο δεν ξεπεράστηκε το όριο διαρροής του χάλυβα.

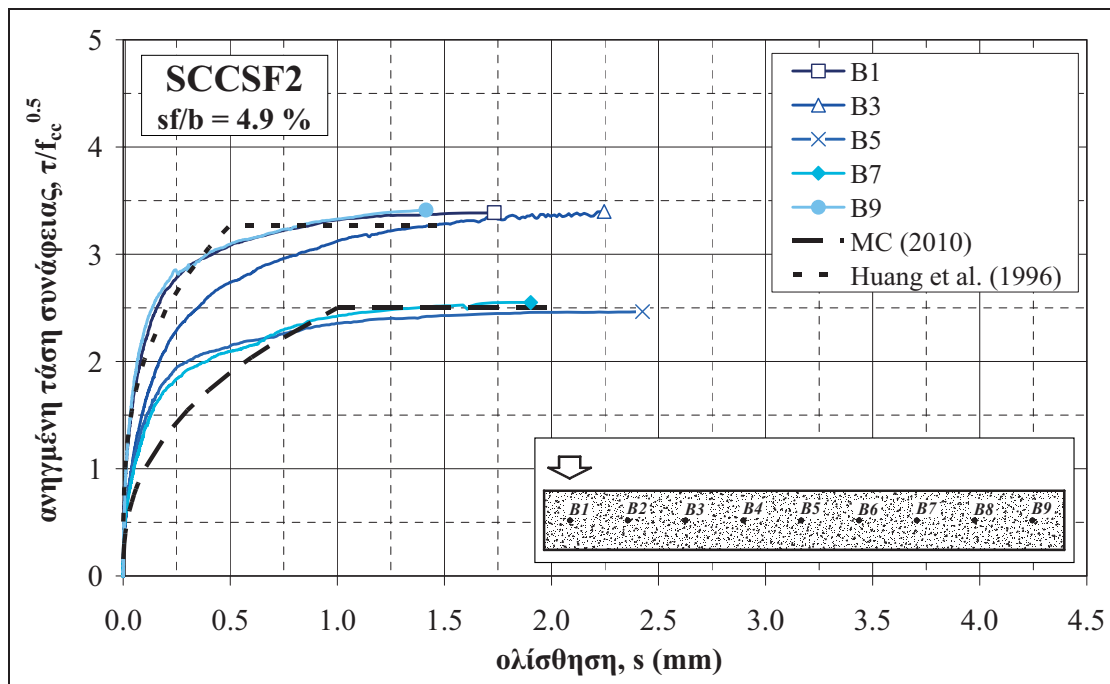
Πίνακας 89 Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου sf/b, για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
SCCSF1	SCC26	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
SCCSF2	SCC34	PO	*	PO	*	PO	*	PO	*	PO
SCCSF5	SCC32	PO	*	PO	*	PO	*	PO	*	PO
SCCSF7	SCC36	PO	*	PO	*	PO	*	PO	*	PO

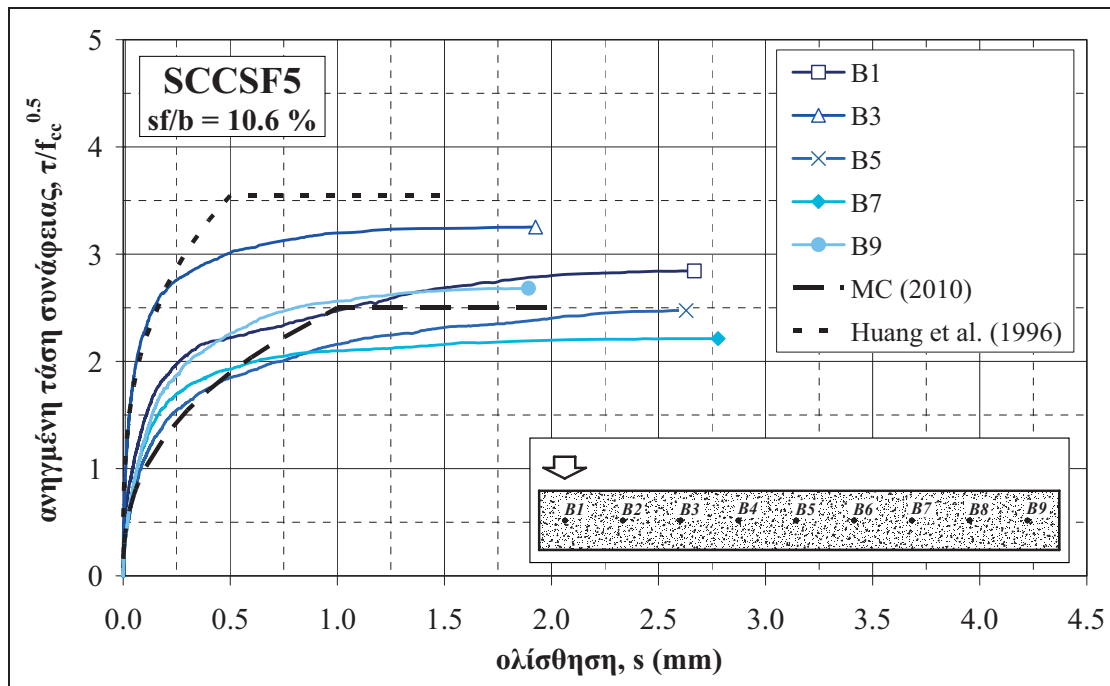
\*πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο επιβολής μετακινήσεων κατά την πήξη (Παρ. 3.3.5.2), σημείωση: σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε διαρροή του χάλυβα



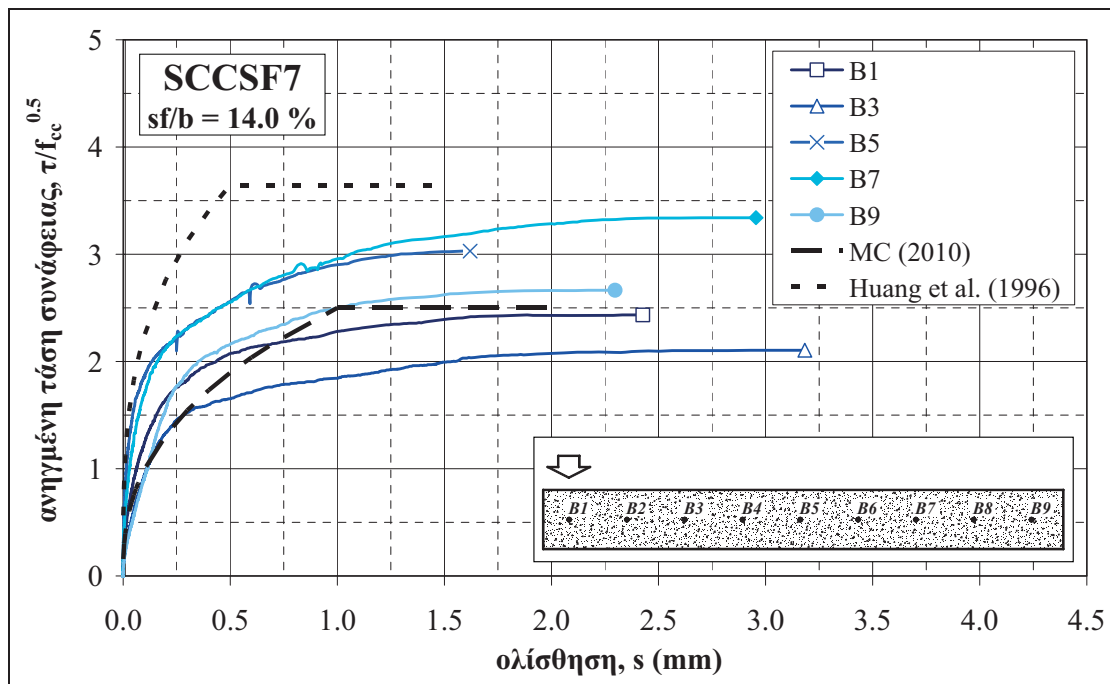
Σχήμα 206 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCSF1– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 207 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCSF2– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 208 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCSF5– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 209 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCSF7– Σύγκριση με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

**Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)**

Ο Πίνακας 90 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για όλες τις ράβδους που ελέγχθηκαν στα οριζόντια δοκίμια μέρους των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Σημειώνεται ότι οι ράβδοι ζυγής αρίθμησης (B2, B4, B6 και B8) των μιγμάτων SCCSF2, SCCSF5 και SCCSF7, οι οποίες μετακινήθηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος (όπως θα περιγραφεί στην Παρ. 3.3.5) αγνοήθηκαν, ως εκ τούτου το πλήθος  $N$  το ράβδων που χρησιμοποιούνται για την παρούσα ανάλυση είναι μεταβλητό, ανάλογα με το εξεταζόμενο κάθε φορά μίγμα. Στον Πίνακα έχουν, επιπλέον, υπολογιστεί οι μέσες τιμές,  $m$  ή  $\tau_{Bm}$ , και οι συντελεστές διακύμανσης (μέση τιμή προς τυπική απόκλιση),  $con$  (%), των  $N$  ράβδων που ελέγχθηκαν, ώστε να αξιολογηθούν συγκριτικά βάσει της σύνθεσης ΑΣΣ.

**Πίνακας 90** Χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμών μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$

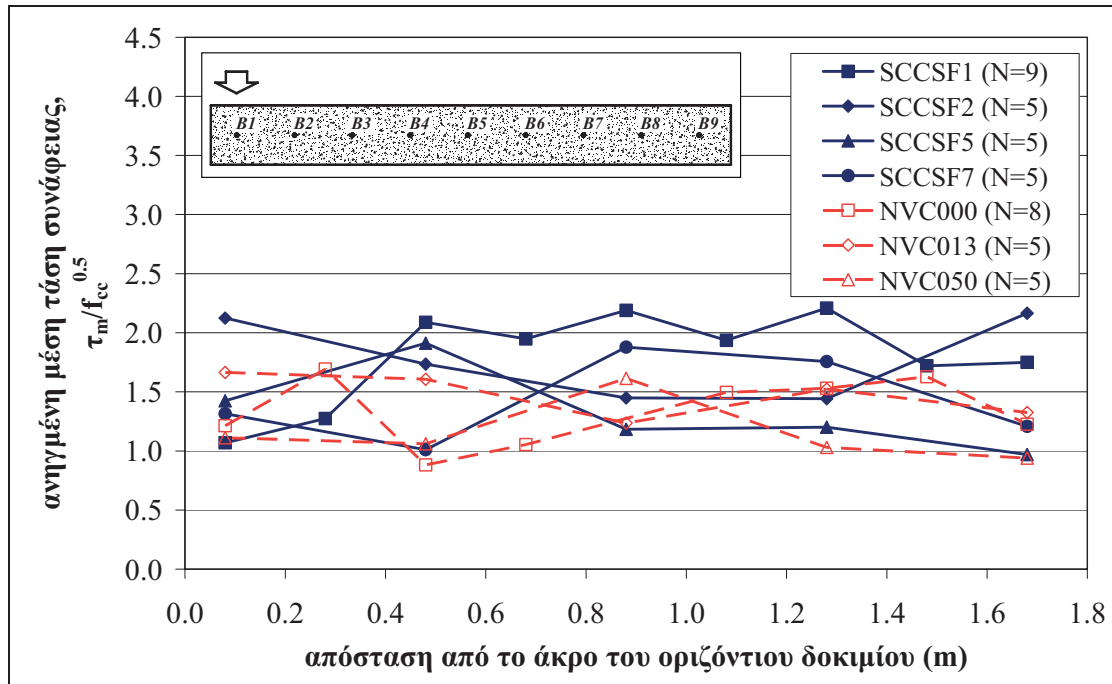
μέγεθος	κωδικός	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$\tau_{Bm}$	$con$
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	SCCSF1	1.07	1.27	2.09	1.95	2.19	1.94	2.21	1.72	1.75	1.80	22%
	SCCSF2	2.12	*	1.73	*	1.45	*	1.44	*	2.17	1.78	20%
	SCCSF5	1.42	*	1.91	*	1.18	*	1.20	*	0.97	1.34	27%
	SCCSF7	1.32	*	1.01	*	1.88	*	1.76	*	1.21	1.43	26%
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	SCCSF1	1.56	2.09	2.89	2.95	3.15	2.97	3.43	2.39	2.82	2.70	21%
	SCCSF2	3.39	*	3.40	*	2.46	*	2.55	*	3.41	3.04	16%
	SCCSF5	2.82	*	3.22	*	2.45	*	2.19	*	2.66	2.67	15%
	SCCSF7	2.43	*	2.10	*	3.03	*	3.34	*	2.66	2.71	18%
$s_{\tau_{max}}$	SCCSF1	0.7	1.9	1.5	2.0	2.1	2.8	1.8	0.9	2.0	1.8	36%
	SCCSF2	1.7	*	2.2	*	2.4	*	1.9	*	1.4	1.9	21%
	SCCSF5	2.7	*	1.9	*	2.6	*	2.8	*	1.9	2.4	18%
	SCCSF7	2.4	*	3.2	*	1.6	*	3.0	*	2.3	2.5	24%

\*η ράβδος ελέγχθηκε στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη σκυροδέματος

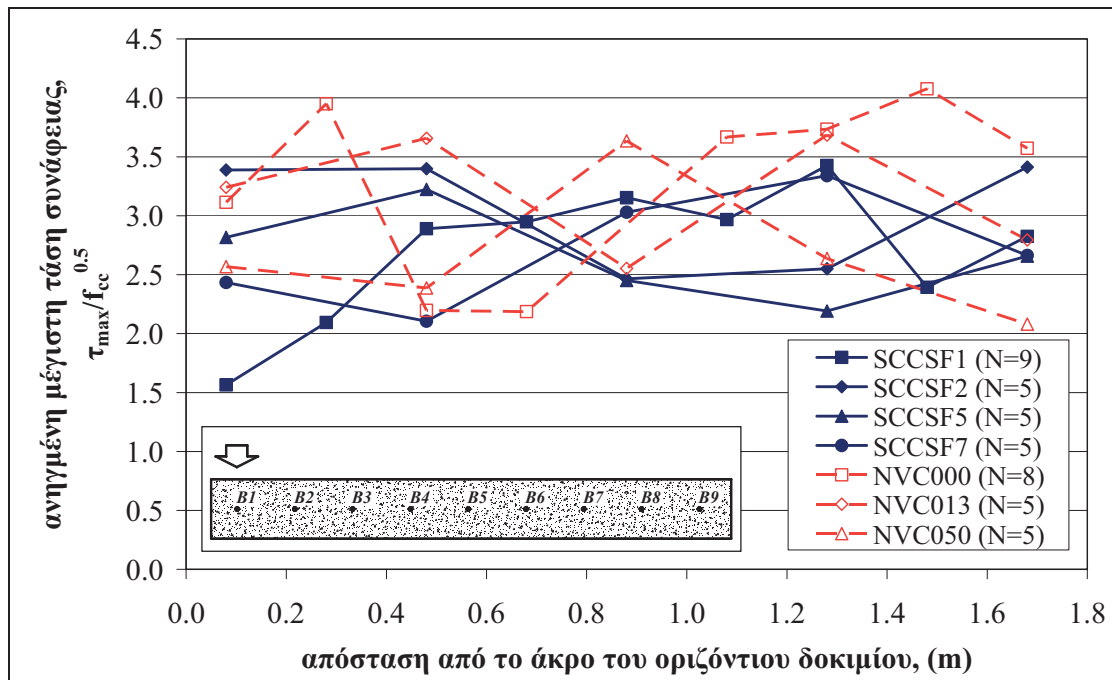
**Διακύμανση ανηγμένων τάσεων κατά μήκος του οριζόντιου δοκιμίου**

Στο Σχήμα 210 και στο Σχήμα 211 παρουσιάζονται οι ανηγμένες τάσεις συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων κάθε μίγματος, για την περίπτωση των αντιπροσωπευτικών τάσεων  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ , αντίστοιχα. Από τα Σχήματα δεν παρατηρείται απώλεια της τάσης συνάφειας κατά μήκος του δοκιμίου για καμία εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων. Η μεταβλητότητα των τιμών των ανηγμένων τάσεων συνάφειας φαίνεται να είναι συγκρίσιμη μεταξύ των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ και, μάλιστα, ελαφρώς μικρότερη στο ΑΣΣ για την περίπτωση της ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας, και αποδίδονται στην εσωτερική μεταβλητότητα τόσο του υλικού όσο και των διαδικασιών ελέγχου. Ως εκ τούτου, μπορεί να αναφερθεί ότι η απουσία μηχανικής δόνησης και η ελεύθερη ροή κατά μήκους του οριζόντιου δοκιμίου ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  δε φαίνεται να επηρεάζουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις συνάφειας (έως 1.60 m μεταξύ των ράβδων B1 και B9).





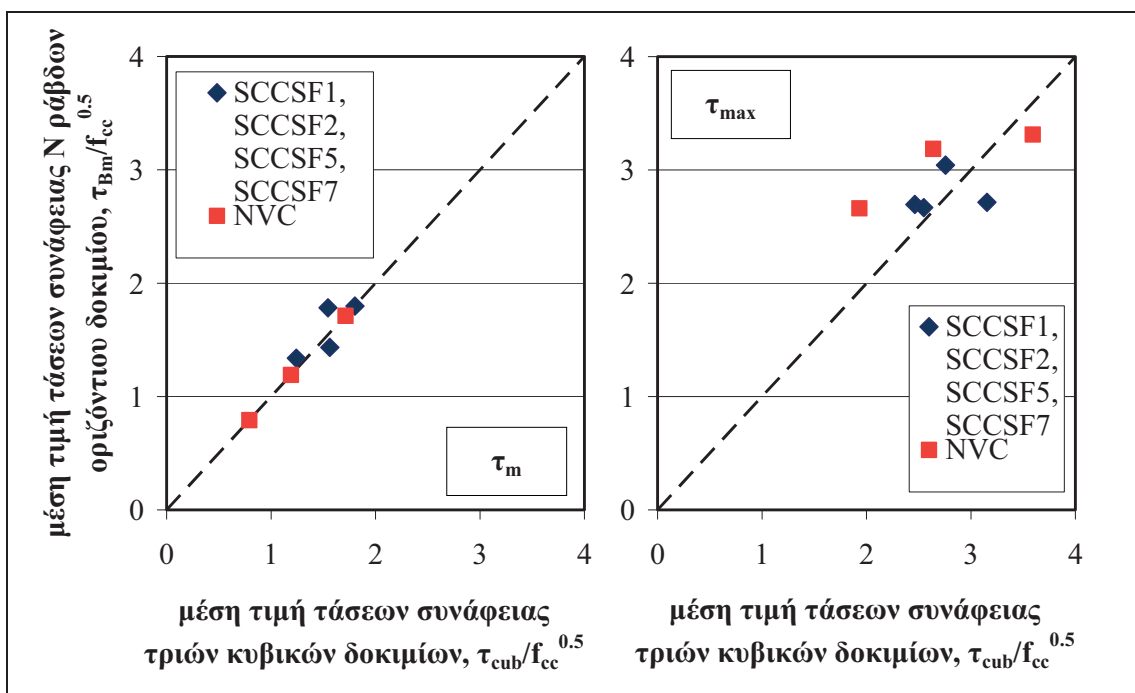
Σχήμα 210 Ανηγμένη μέση τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το άκρο του οριζόντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$



Σχήμα 211 Ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας σε συνάρτηση με την απόσταση από το άκρο του οριζόντιου δοκιμίου για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

### Σύγκριση ανηγμένων τάσεων οριζόντιων και κυβικών δοκιμίων

Στο Σχήμα 212, οι μέσες ανηγμένες τιμές των τάσεων συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων κάθε οριζόντιου δοκιμίου,  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$ , συγκρίνονται με τις μέσες τιμές των τάσεων συνάφειας των κυβικών δοκιμίων,  $\tau_{cub}/f_{cc}^{0.5}$  ( $= m$ ), όπως είχαν υπολογιστεί στην Παρ. 3.3.1.2 (Πίνακας 72). Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των τιμών ορίζεται από τη διαγώνιο. Για όλα μίγματα, παρατηρείται ικανοποιητική σύμπτωση των τιμών, η οποία είναι ελαφρώς μικρότερη για την περίπτωση των ΣΣ και την  $\tau_{max}$ . Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι για γραμμικά ή επιφανειακά στοιχεία με συνολικό μήκος έως 3.20 m (με μοναδικό σημείο έγχυσης στο κέντρο γραμμικού στοιχείου:  $2 \times 1.60$  m, όπου 1.60 m η απόσταση από το σημείο έγχυσης έως την πλέον απομακρυσμένη ράβδο) ή συνολική επιφάνεια περίπου  $10 \text{ m}^2$  (με μοναδικό σημείο έγχυσης κεντρικά σε επιφανειακό στοιχείο διαστάσεων:  $3.20 \times 3.20$  m) μπορούν να σκυροδετηθούν με μοναδικό σημείο έγχυσης, χωρίς να κινδυνεύουν με απώλεια συνάφειας των πιο απομακρυσμένων ράβδων. Πάντως, τονίζεται ότι υψηλά ποσοστά όπλισης ή περίπλοκη γεωμετρία θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την ικανότητα αυτή.

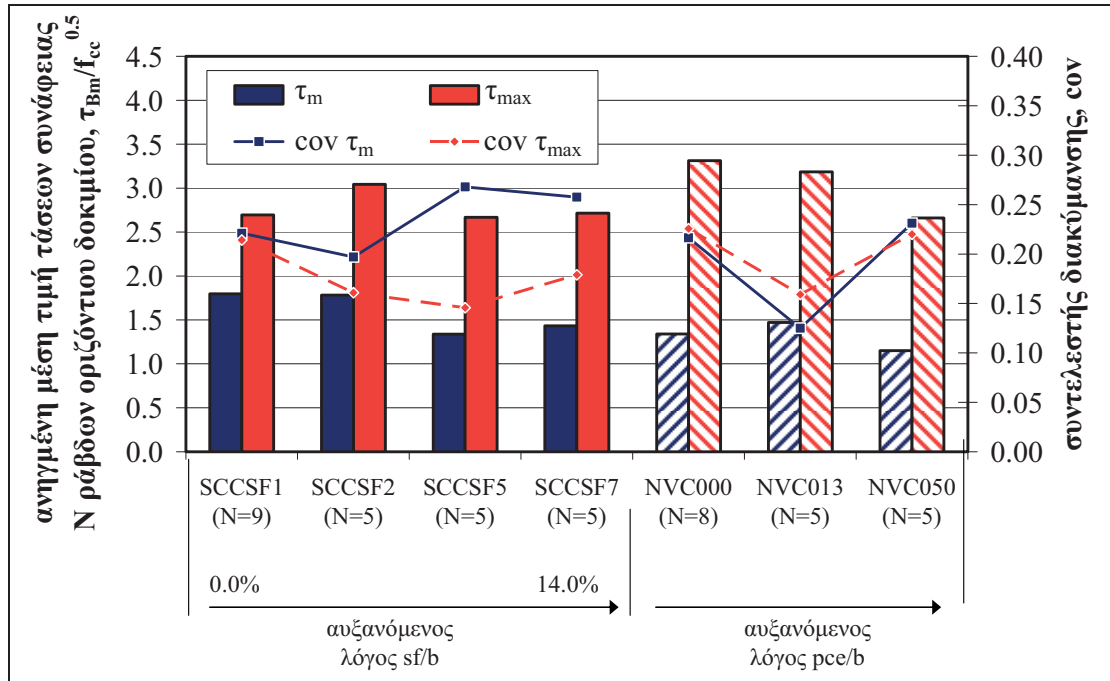


Σχήμα 212 Συγκριτική αξιολόγηση μέσων τιμών τάσεων συνάφειας  $N$  ράβδων οριζόντιου δοκιμίου και μέσων τιμών τάσεων συνάφειας τριών κυβικών δοκιμίων για μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

### Μέσες τιμές ανηγμένων τάσεων οριζόντιων δοκιμίων

Στο Σχήμα 213, οι ανηγμένες τιμές  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$  παρουσιάζονται συγκριτικά για τις δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις,  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ . Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχοι συντελεστές διακύμανσης (τυπική απόκλιση προς μέση τιμή),  $con$  (%), των  $N$  ελεγμένων ράβδων. Παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου  $sf/b$  οδηγεί σε μία ήπια μείωση των ανηγμένων μέσων τιμών  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$  για την περίπτωση της  $\tau_m$ , σε αντίθεση με την  $\tau_{max}$ , η οποία παραμένει πρακτικώς σταθερή. Όσο αφορά στη διακύμανση των τάσεων συνάφειας, παρατηρείται μια μικρή αύξηση για την περίπτωση της  $\tau_m$  και μια μικρή μείωση για την περίπτωση της  $\tau_{max}$ . Για το ΣΣ και για

την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$ , η ανηγμένη τάση δε φαίνεται να συσχετίζεται με την μεταβολή της εργασιμότητας, ενώ, αντίθετα, η αύξηση του λόγου  $pce/b$  οδηγεί σε μείωση της τάσης για την περίπτωση της αντιπροσωπευτικής τάσης  $\tau_{max}$ . Οι υπολογισθέντες συντελεστές διακύμανσης κυμαίνονται μεταξύ 15 και 27 % για το ΑΣΣ, έναντι 18 έως 36 % για το ΣΣ.. Παρατηρείται ότι για οποιοδήποτε ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, αλλά και για το μίγμα αναφοράς SCCSF1, η ανηγμένη μέση τάση συνάφειας είναι υψηλότερη εν σχέσει προς την αντίστοιχη τάση οποιουδήποτε μίγματος ΣΣ. Αντίθετα είναι τα αποτελέσματα για τη μέγιστη τάση συνάφειας, η οποία είναι, κατά κανόνα, μεγαλύτερη στο ΣΣ.



Σχήμα 213 Επιρροή λόγου  $sf/b$  σε μίγματα ΑΣΣ και  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ στη μέση ανηγμένη τιμή τάσεων συνάφειας  $N$  ράβδων του οριζόντιου δοκιμίου,  $\tau_{Bm}/f_{cc}^{0.5}$

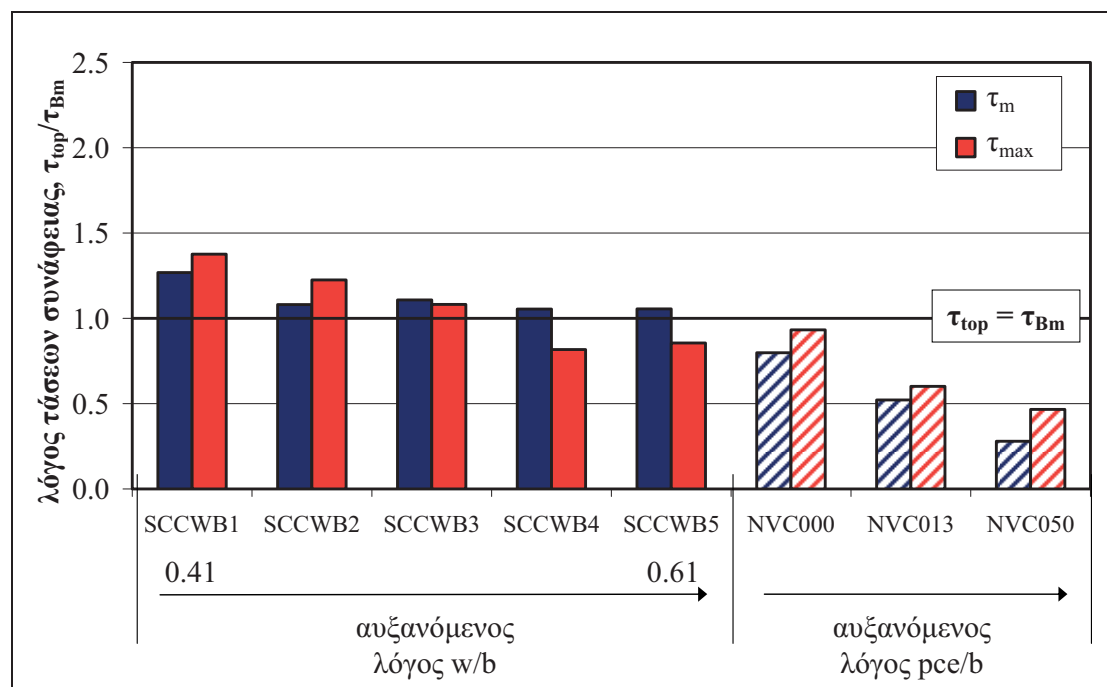
### 3.3.4. Επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος

Από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των δοκιμών εξόλκευσης που αφορούν στα κατακόρυφα και τα οριζόντια δοκίμια είναι δυνατό να εκτιμηθεί η επιρροή του υποκείμενου και του υπερκείμενου πάχους στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια. Οι ράβδοι του οριζόντιου δοκιμίου και οι άνω ράβδοι του κατακόρυφου δοκιμίου έχουν το ίδιο υπερκείμενο πάχος στρώματος σκυροδέματος (100 mm), αλλά διαφορετικό υποκείμενο πάχος στρώματος σκυροδέματος (100 και 500 mm, αντιστοίχως). Από την άλλη πλευρά, οι ράβδοι του οριζόντιου δοκιμίου και οι κάτω ράβδοι του κατακόρυφου δοκιμίου έχουν το ίδιο υποκείμενο πάχος στρώματος σκυροδέματος (100 mm), αλλά διαφορετικό υπερκείμενο πάχος στρώματος σκυροδέματος (100 και 500 mm, αντιστοίχως). Ως εκ τούτου, οι λόγοι  $\tau_{top}/\tau_{avg}$  and  $\tau_{bot}/\tau_{avg}$  αξιολογούνται για καθμία εκ των αντιπροσωπευτικών τάσεων  $\tau_{max}$  και  $\tau_m$ , ώστε να διερευνηθεί η επιρροή του υποκείμενου και υπερκείμενου πάχους στρώματος σκυροδέματος. Λόγοι μικρότεροι ή μεγαλύτεροι της μονάδας (1.0) υποδηλώνουν, αντίστοιχα, αρνητική ή θετική επιρροή του υπό διερεύνηση στρώματος σκυροδέματος (υπερκείμενου ή υποκείμενου) στην τάση συνάφειας.

### 3.3.4.1. Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )<sup>6</sup>

#### Επιρροή υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος

Στο Σχήμα 214 παρουσιάζονται οι λόγοι της τάσης συνάφειας της άνω ράβδου,  $\tau_{top}$ , του κατακόρυφου δοκιμίου προς την μέση τιμή της τάσης συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων,  $\tau_{Bm}$ , του οριζόντιου δοκιμίου, για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Υπενθυμίζεται ότι λόγοι πλησιέστεροι στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται απουσία επιρροής του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια.



Σχήμα 214 Επιρροή υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm), σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων άνω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή  $N$  ράβδων οριζόντιου δοκιμίου

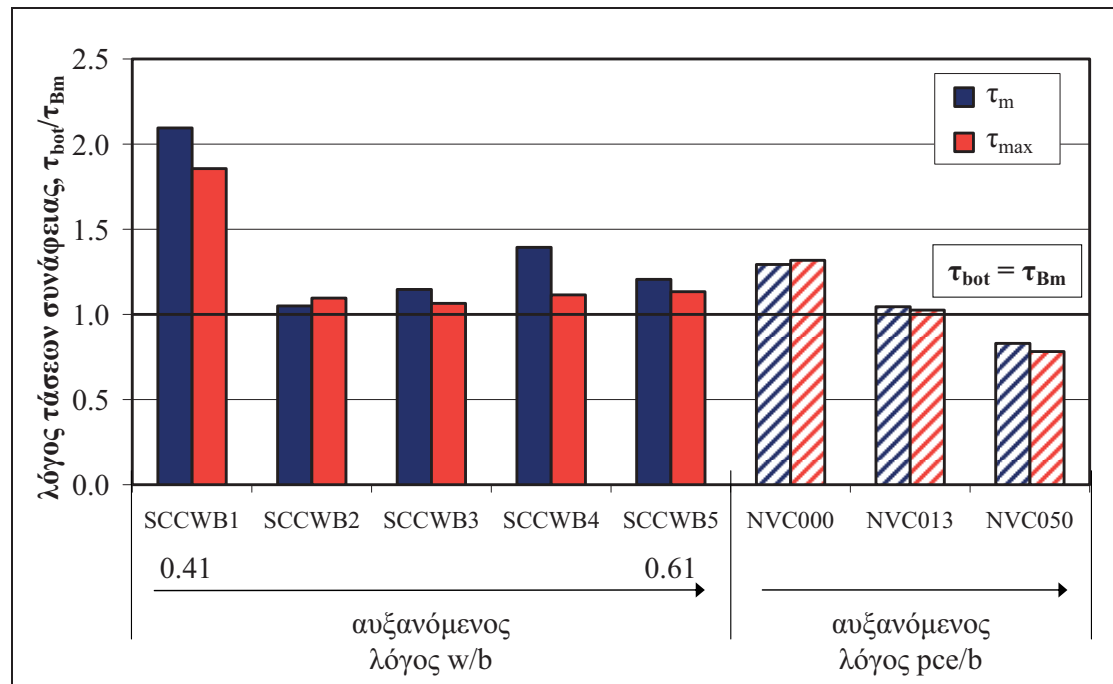
Παρατηρείται ότι για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$  οι λόγοι κυμαίνονται, κατά κανόνα, περί τη μονάδα (1.0), γεγονός που συνεπάγεται ελαφρά επιρροή του υποκείμενου στρώματος, ενώ δε φαίνεται να επηρεάζονται από τη μεταβολή του λόγου  $w/b$ . Εξάιρεση στην παραπάνω παρατήρηση αποτελεί το μίγμα SCCWB1, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο αστοχίας των ράβδων. Όπως και στην περίπτωση των κύβων, όλες οι ράβδοι του κατακόρυφου δοκιμίου αστόχησαν σε εξόλκευση, ενώ οι ράβδοι του οριζόντιου δοκιμίου σε διάρρηξη. Αντίθετα, για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_{max}$ , η αύξηση του λόγου  $w/b$  από 0.41 σε 0.61 οδηγεί σε μία σαφή μείωση του λόγου  $\tau_{top}/\tau_{Bm}$  από 1.4 σε περίπου 0.8. Το γεγονός αυτό αποδίδεται σε μια πιθανή στατική απόμιξη λόγω βαρύτητας (μεταφορά κόκκων αδρανών σε υποκείμενα στρώματα σκυροδέματος), η οποία είναι εντονότερη για μίγματα με υψηλότερους λόγους  $w/b$ . Ομοίως, ανεξάρτητα από την αντιπροσωπευτική τάση, το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται για τα μίγματα ΣΣ με αυξανόμενο λόγο  $pce/b$ . Συγκεκριμένα, η απώλεια φτάνει σε πολύ υψηλά ποσοστά, έως και 65 % για το μέγιστο ποσοστό  $pce/b$  (0.50) και για την μέση τάση συνάφειας.

<sup>6</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στο επιστημονικό περιοδικό [Cement & Concrete Composites \[Trezos et al. \(2014\)\]](#)

Τέλος, συγκρίνοντας τα μίγματα ΣΣ με τα αντίστοιχα μίγματα ΑΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b$  (0.51, SCCWB3) ή ίδια μέση θλιπτική αντοχή ( $f_{cc} \sim 50 \text{ N/mm}^2$ , SCCWB4) παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση η επιρροή του υποκείμενου στρώματος είναι ίση ή μικρότερη στο ΑΣΣ.

### Επιρροή υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος

Στο **Σχήμα 215** παρουσιάζονται οι λόγοι της τάσης συνάφειας της κάτω ράβδου,  $\tau_{bot}$ , του κατακόρυφου δοκιμίου προς την μέση τιμή της τάσης συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων,  $\tau_{Bm}$ , του οριζόντιου δοκιμίου για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Υπενθυμίζεται ότι λόγοι πλησιέστεροι στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται απουσία επιρροής του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια.



**Σχήμα 215** Επιρροή υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm) σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων κάτω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή  $N$  ράβδων οριζόντιου δοκιμίου

Παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως της αντιπροσωπευτικής τάσης, οι λόγοι κυμαίνονται, κατά κανόνα, περί τη μονάδα (1.0), γεγονός που συνεπάγεται ελαφρά επιρροή του υπερκείμενου στρώματος, ενώ δε φαίνεται να επηρεάζονται από τη μεταβολή του λόγου  $w/b$ . Εξάιρεση στην παραπάνω παρατήρηση αποτελεί το μίγμα SCCWB1, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο αστοχίας των ράβδων. Όπως και στην περίπτωση των κύβων, όλες οι ράβδοι του κατακόρυφου δοκιμίου αστόχησαν σε εξόλκευση, ενώ οι ράβδοι του οριζόντιου δοκιμίου σε διάρρηξη, επομένως τα μεγέθη δεν είναι συγκρίσιμα. Όσο αφορά στο ΣΣ, η βελτιωμένη εργασιμότητα, όπως αυτή επιτυγχάνεται μέσω της ενσωμάτωσης μεγαλύτερων ποσοστών υπερρυστοποιητή, οδηγεί σε σαφή μείωση του λόγου  $\tau_{bot}/\tau_{Bm}$ , η οποία είναι παρεμφερής μεταξύ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων που εξετάζονται.

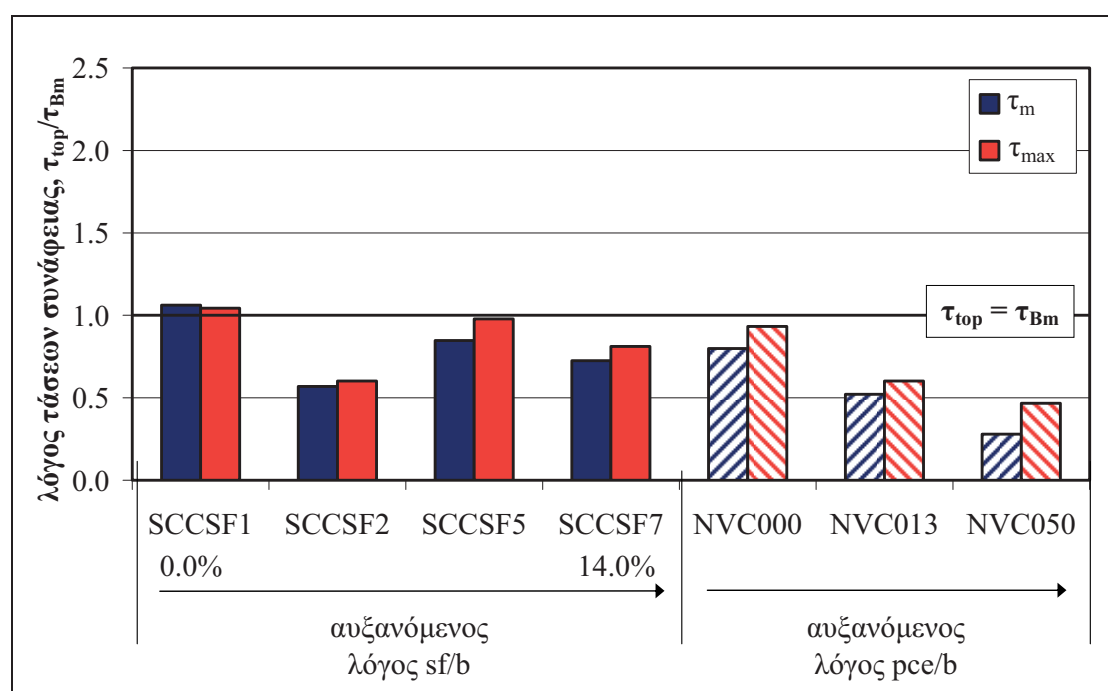
Τέλος, συγκρίνοντας τα μίγματα ΣΣ με τα αντίστοιχα μίγματα ΑΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b$  (0.51, SCCWB3) ή ίδια μέση θλιπτική αντοχή ( $f_{cc} \sim 50 \text{ N/mm}^2$ , SCCWB4)

παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση η επιρροή του υπερκείμενου στρώματος είναι περίπου ίση ή μικρότερη στο ΑΣΣ.

### 3.3.4.2. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

#### Επιρροή υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος

Στο **Σχήμα 216** παρουσιάζονται οι λόγοι της τάσης συνάφειας της άνω ράβδου,  $\tau_{top}$ , του κατακόρυφου δοκιμίου προς την μέση τιμή της τάσης συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων,  $\tau_{Bm}$ , του οριζόντιου δοκιμίου, για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  (Πίν. 38, Κεφ. 2). Υπενθυμίζεται ότι λόγοι πλησιέστεροι στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται απουσία επιρροής του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια.

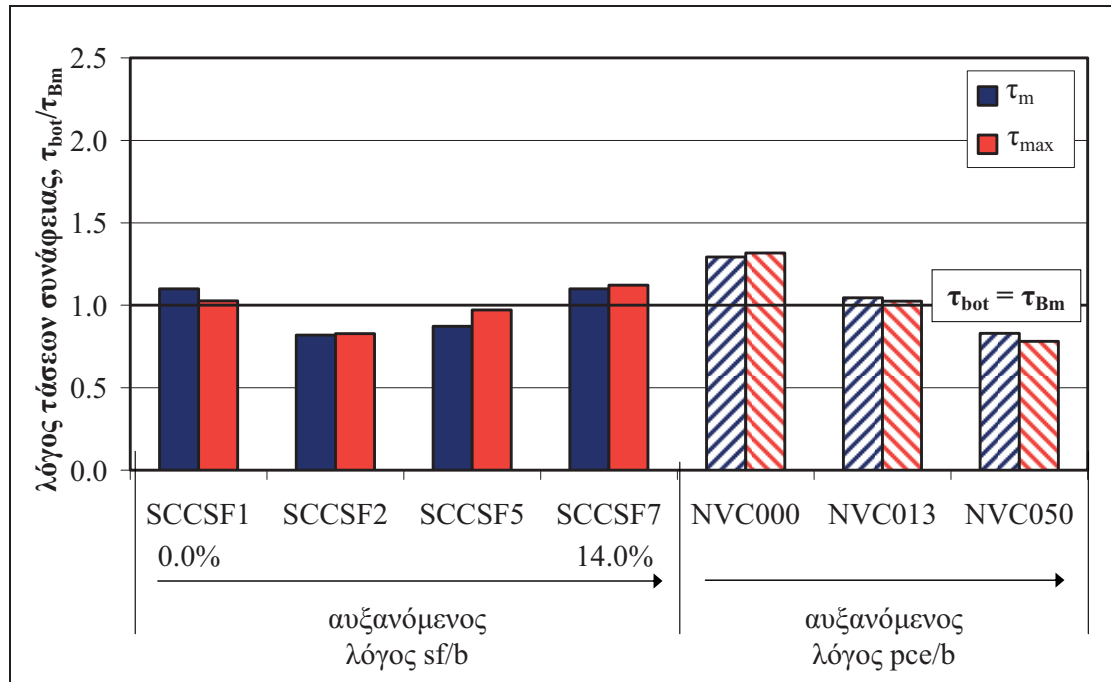


**Σχήμα 216** Επιρροή υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm) σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων άνω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή  $N$  ράβδων οριζόντιου δοκιμίου

Παρατηρείται ότι, για οποιαδήποτε εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων, το μίγμα αναφοράς (SCCSF1) δεν επηρεάζεται ως προς την αναπτυσσόμενη τάση συνάφειας από την ύπαρξη του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος. Η αντικατάσταση τσιμέντου από μικρή ποσότητα πυριτικής παιπάλης (SCCSF2) φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική απώλεια συνάφειας, περί του 40 %, σε ράβδους με μεγάλο υποκείμενο στρώμα σκυροδέματος, ενώ το φαινόμενο αυτό, αν και πιο περιορισμένο (απώλεια περί του 20 με 30 %), παρατηρείται και για πολύ υψηλά ποσοστά αντικατάστασης (SCCSF7). Αντίθετα, για ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη περί του 10 % (SCCSF5) η απώλεια είναι χαμηλή (έως 10 %). Για τα μίγματα ΣΣ, η απώλεια συνάφειας λόγω του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος είναι σημαντική και αυξάνεται με την αύξηση του λόγου  $pce/b$ , ομοίως για οποιαδήποτε εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων. Η απώλεια αυτή φτάνει σε πολύ υψηλά ποσοστά, έως και 65 % για το μέγιστο ποσοστό  $pce/b = 0.50$  και για την μέση τάση συνάφειας.

### Επιρροή υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος

Στο Σχήμα 217 παρουσιάζονται οι λόγοι της τάσης συνάφειας της κάτω ράβδου,  $\tau_{bot}$ , του κατακόρυφου δοκιμίου προς την μέση τιμή της τάσης συνάφειας των  $N$  ελεγμένων ράβδων,  $\tau_{Bm}$ , του οριζόντιου δοκιμίου, για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Υπενθυμίζεται ότι λόγοι πλησιέστεροι στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται απουσία επιρροής του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια.



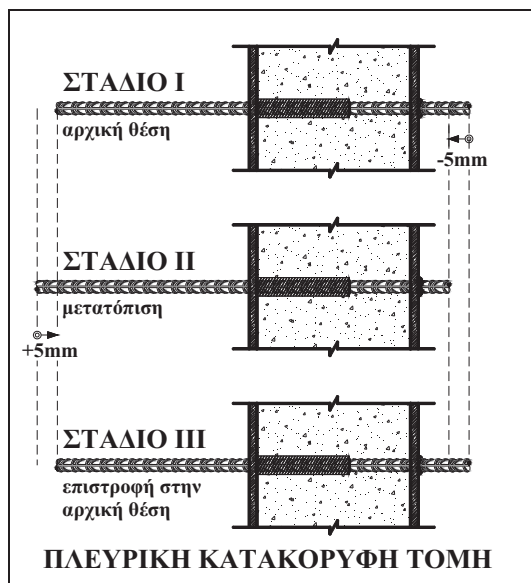
Σχήμα 217 Επιρροή υπερκείμενου στρώματος (πάχους 500 mm έναντι 100 mm) σκυροδέματος σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , μέσω της αξιολόγησης του λόγου τάσεων κάτω ράβδου κατακόρυφου δοκιμίου προς μέση τιμή  $N$  ράβδων οριζόντιου δοκιμίου

Όπως και στην περίπτωση του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος, έτσι και στην περίπτωση του υπερκείμενου στρώματος, το μίγμα αναφοράς (SCCSF1) δε φαίνεται να επηρεάζεται από το υπερκείμενο στρώμα σκυροδέματος για οποιαδήποτε εκ των δύο αντιπροσωπευτικών τάσεων. Η απώλεια συνάφειας είναι και πάλι σημαντική για χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη (SCCSF2), αλλά στη συνέχεια μειώνεται για υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου, έως και την εξάλειψή της για ποσοστά κοντά στο 14.0 %. Όσο αφορά στο ΣΣ, η θετική επιρροή του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος είναι προφανής απουσία υπερρευστοποιητή, ενώ η επιρροή αυτή περιορίζεται για υψηλότερα ποσοστά  $pce/b$ .

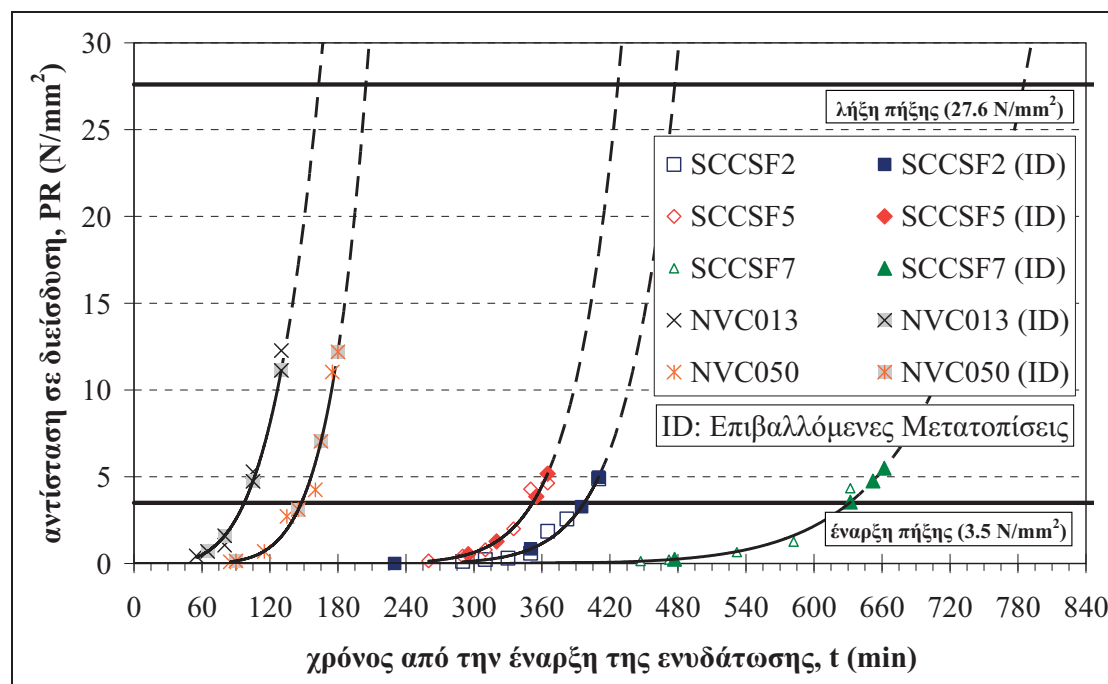
#### 3.3.5. Επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος

Μία επιπλέον παράμετρος, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα και εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, σχετίζεται με τις πιθανές σχετικές μετακινήσεις μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού. Κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, μία πιθανή τοπική διαφορική καθίζηση των ικριωμάτων των τύπων ή μία οριζόντια μετακίνηση των τύπων, λόγω ενός σεισμικού γεγονότος ή ενός τυχαίου κρουστικού φορτίου, μπορεί να οδηγήσουν σε μια σχετική μετατόπιση μεταξύ των εγκιβωτισμένων ράβδων

οπλισμού και του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Οι σχετικές μετατοπίσεις ράβδων – σκυροδέματος αναμένεται να επηρεάσουν τη συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών.



Σχήμα 218 Γραφική απεικόνιση επιβολής σχετικής μετατόπισης ράβδου - σκυροδέματος



Σχήμα 219 Χρονικές στιγμές επιβολής μετακινήσεων στις ράβδους ζυγής αρίθμησης των οριζόντιων δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  κατά την πήξη του σκυροδέματος

Για τη διερεύνηση της ανωτέρου παραμέτρου, σε μέρος των συνθέσεων και στις ράβδους ζυγής αρίθμησης του οριζόντιου δοκιμίου, ήτοι στις B2, B4, B6 και B8, επιβλήθηκαν μετακινήσεις κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, ώστε να μελετηθεί η επιρροή αθέλητων μετακινήσεων στη συνάφεια για δεδομένο βαθμό πήξης του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η σχετική μετατόπιση μεταξύ σκυροδέματος και ράβδου οπλισμού, η οποία προσομοιώνει την επιρροή μιας πιθανής μετατόπισης



των τύπων, επετεύχθη μέσω της επιβολής μίας μετατόπισης διπλής κατεύθυνσης  $\pm 5$  mm (**Σχήμα 218**) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά την πήξη του σκυροδέματος για κάθε μία εκ των ως άνω περιγραφόμενων ράβδων. Ειδικότερα, στις δύο πρώτες ράβδους (*B2* και *B4*) επιβλήθηκαν μετακινήσεις πριν την έναρξη της πήξης (ο ορισμός έναρξης και λήξης πήξης δόθηκε στην Παρ. 2.3.1.4 του Κεφαλαίου 2), ενώ οι επόμενες δύο ράβδοι (*B6* και *B8*) μετακινήθηκαν σε χρονικές στιγμές μεταξύ της έναρξης και της λήξης της πήξης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 219**.

Ο **Πίνακας 91** περιλαμβάνει, για κάθε ράβδο κάθε σύνθεσης, τη χρονική στιγμή επιβολής της μετακίνησης  $\pm 1.0$  mm και την αντίστοιχη εκτιμώμενη πίεση διείδυσης. Υπενθυμίζεται ότι η πίεση διείδυσης κατά τη στιγμή επιβολής της μετακίνησης προκύπτει από την πολυωνυμική καμπύλη δευτέρου βαθμού, όπως εκτιμήθηκε στην Παρ. 2.3.1.3 του Κεφαλαίου 2.

**Πίνακας 91** Τύπος αστοχίας και διαρροή χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμίων, ανά σύνθεση ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$

κωδικός	ράβδος σύνθεση	<i>B2</i>		<i>B4</i>		<i>B6</i>		<i>B8</i>	
		<i>t</i> (min)	<i>PR</i> (N/mm <sup>2</sup> )	<i>t</i> (min)	<i>PR</i> (N/mm <sup>2</sup> )	<i>t</i> (min)	<i>PR</i> (N/mm <sup>2</sup> )	<i>t</i> (min)	<i>PR</i> (N/mm <sup>2</sup> )
SCCSF2	SCC34	203	0.01	350	0.84	395	3.28	410	4.98
SCCSF5	SCC35	295	0.54	320	1.28	355	3.85	365	5.18
SCCSF7	SCC36	477	0.25	632	3.54	652	4.75	662	5.49
NVC013	NVC13	65	0.70	80	1.60	105	4.74	130	11.13
NVC050	NVC14	90	0.15	145	3.11	165	7.04	180	12.20

Οι τιμές των τάσεων συνάφειας των ράβδων ζυγής αρίθμησης, όπως αυτές προέκυψαν από τις δοκιμές εξόλκευσης στην προδιαγραφόμενη ηλικία (28 ημέρες), συγκρίθηκαν με τις τιμές των τάσεων συνάφειας των υπόλοιπων ράβδων (μονής αρίθμησης), ήτοι των *B1*, *B3*, *B5*, *B7* and *B9*, ώστε να εκτιμηθεί η επιρροή των μετακινήσεων των ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος στη συνάφεια.

### 3.3.5.1. Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (**Σχήμα 220** και **Σχήμα 221**), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους ζυγής αρίθμησης (*B2*, *B4*, *B6* και *B8*) των οριζόντιων δοκιμίων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , οι οποίες υποβλήθηκαν σε μετακίνηση σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την πήξη του σκυροδέματος. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες των μη μετακινήσιμων ράβδων, μονής αρίθμησης (*B1*, *B3*, *B5*, *B7* και *B9*).

#### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο **Πίνακας 92** περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις μετακινήσιμες ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων (*B2*, *B4*, *B6* και *B8*) των μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Στον Πίνακα σημειώνονται οι ράβδοι, στις οποίες η τάση εξόλκευσης ξεπέρασε το όριο διαρροής του χάλυβα. Για λόγους σύγκρισης, στον Πίνακα περιλαμβάνονται και οι τύποι αστοχίας των υπόλοιπων ράβδων. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO) και μόνο στη ράβδο *B2* του μίγματος NVC013 ξεπεράστηκε το όριο διαρροής του χάλυβα.

**Πίνακας 92** Τύπος αστοχίας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης κυβικών δοκιμίων, ανα σύνθεση ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
NVC013	NVC13	PO	<b>PO*</b>	PO	<b>PO</b>	PO	<b>PO</b>	PO	<b>PO</b>	PO
NVC050	NVC14	PO	<b>PO</b>	PO	<b>PO</b>	PO	<b>PO</b>	PO	<b>PO</b>	PO

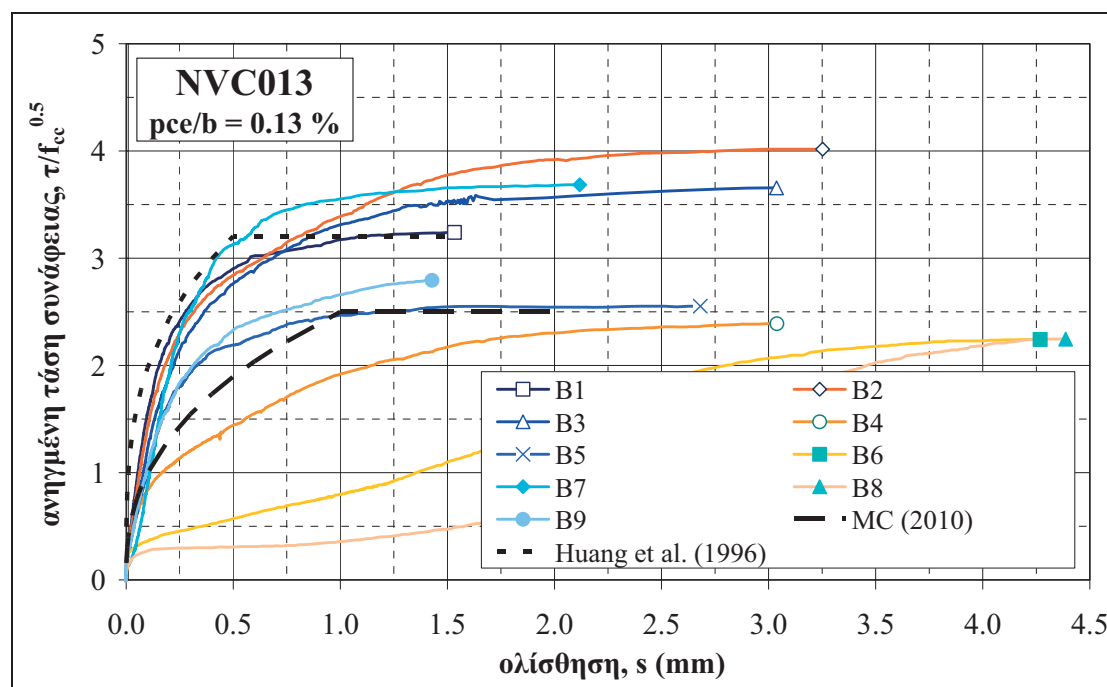
\*διαρροή γάλυβα

**Πίνακας 93** Τιμές πίεσης διείσδυσης και χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

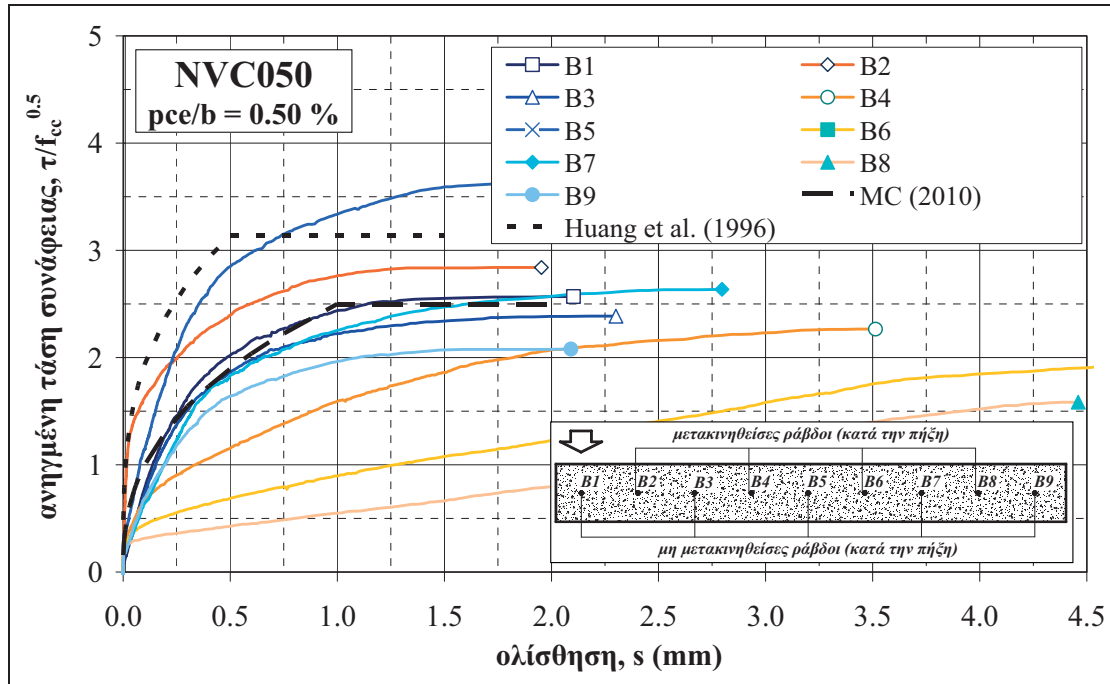
μέγεθος	κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
<i>PR</i>	NVC013	NVC13	-	<b>0.70</b>	-	<b>1.60</b>	-	<b>4.74</b>	-	<b>11.13</b>	-
(N/mm <sup>2</sup> )	NVC050	NVC14	-	<b>0.15</b>	-	<b>3.11</b>	-	<b>7.04</b>	-	<b>12.20</b>	-
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	NVC013	NVC13	1.66	<b>1.70</b>	1.61	<b>1.00</b>	1.24	<b>0.47</b>	1.52	<b>0.25</b>	1.32
	NVC050	NVC14	1.11	<b>1.68</b>	1.06	<b>0.86</b>	1.61	<b>0.53</b>	1.03	<b>0.36</b>	0.94
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	NVC013	NVC13	3.24	<b>4.02</b>	3.66	<b>2.39</b>	2.55	<b>2.24</b>	3.68	<b>2.25</b>	2.79
	NVC050	NVC14	2.57	<b>2.84</b>	2.39	<b>2.27</b>	3.64	<b>1.92</b>	2.64	<b>1.58</b>	2.08
$s_{\tau_{max}}$	NVC013	NVC13	1.5	<b>3.3</b>	3.0	<b>3.0</b>	2.7	<b>4.3</b>	2.1	<b>4.4</b>	1.4
	NVC050	NVC14	2.1	<b>1.7</b>	2.3	<b>3.5</b>	2.1	<b>4.6</b>	2.8	<b>4.5</b>	2.1

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 93 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για τις μετακινηθείσες ράβδους B2, B4, B6 και B8, των οριζόντιων δοκιμίων των μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Στον Πίνακα περιλαμβάνεται η πίεση διείσδυσης κατά τη στιγμή της μετακίνησης κάθε ράβδου, όπως εκτιμήθηκε από την αντίστοιχη πολυωνυμική καμπύλη που περιγράφει την εξέλιξη της πίεσης διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου (Πίνακας 91). Επίσης, για λόγους σύγκρισης, στον Πίνακα περιλαμβάνονται και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας και των υπόλοιπων ράβδων. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα γίνει, συγκριτικά με τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , στην επόμενη Παράγραφο.



**Σχήμα 220** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινηθείσες ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης NVC013 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 221 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινηθείσες ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης NVC050 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και καμπύλες κανονισμών και βιβλιογραφίας

### 3.3.5.2. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 222 και Σχήμα 224), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους ζυγής αρίθμησης (B2, B4, B6 και B8) των οριζόντιων δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , οι οποίες υποβλήθηκαν σε μετακίνηση σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την πήξη του σκυροδέματος. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες των μη μετακινηθεισών ράβδων, μονής αρίθμησης (B1, B3, B5, B7 και B9).

#### Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 94 περιλαμβάνει τον τρόπο αστοχίας κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στις μετακινηθείσες ράβδους των οριζόντιων δοκιμών (B2, B4, B6 και B8) των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Για λόγους σύγκρισης, στον Πίνακα περιλαμβάνονται και οι τύποι αστοχίας των υπόλοιπων ράβδων. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω εξόλκευσης ράβδου (pull-out, PO), ενώ δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα.

Πίνακας 94 Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , για την άνω, τη μεσαία και την κάτω ράβδο

κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
SCCSF2	SCC34	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
SCCSF5	SCC32	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
SCCSF7	SCC36	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO

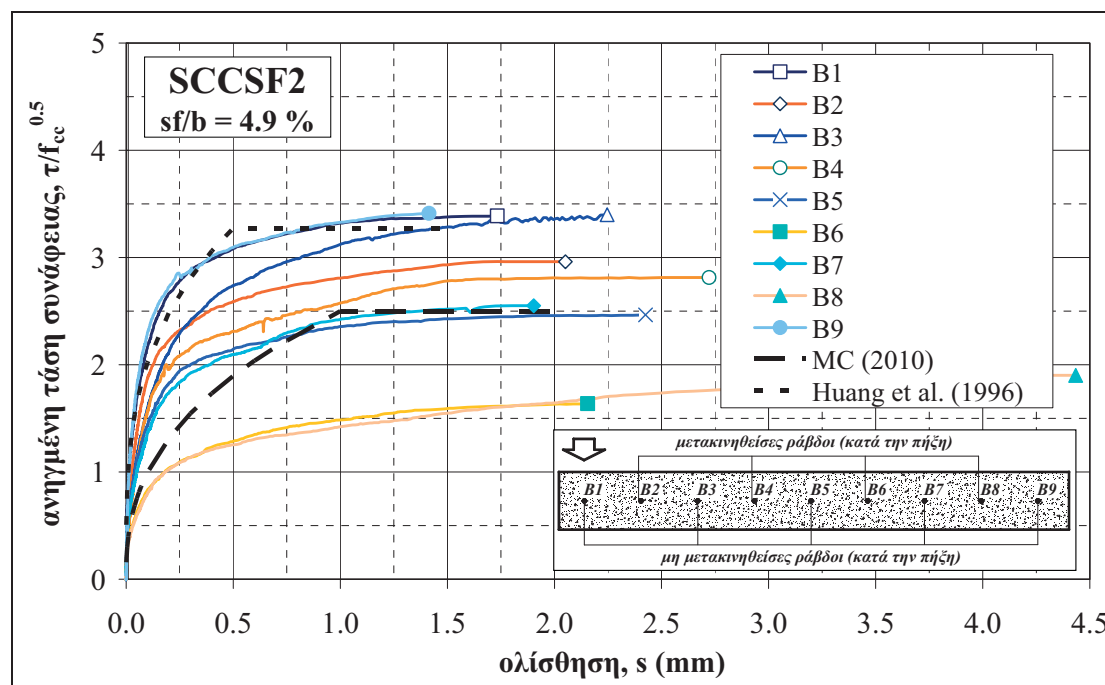
σημείωση: σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε διαρροή του χάλυβα

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

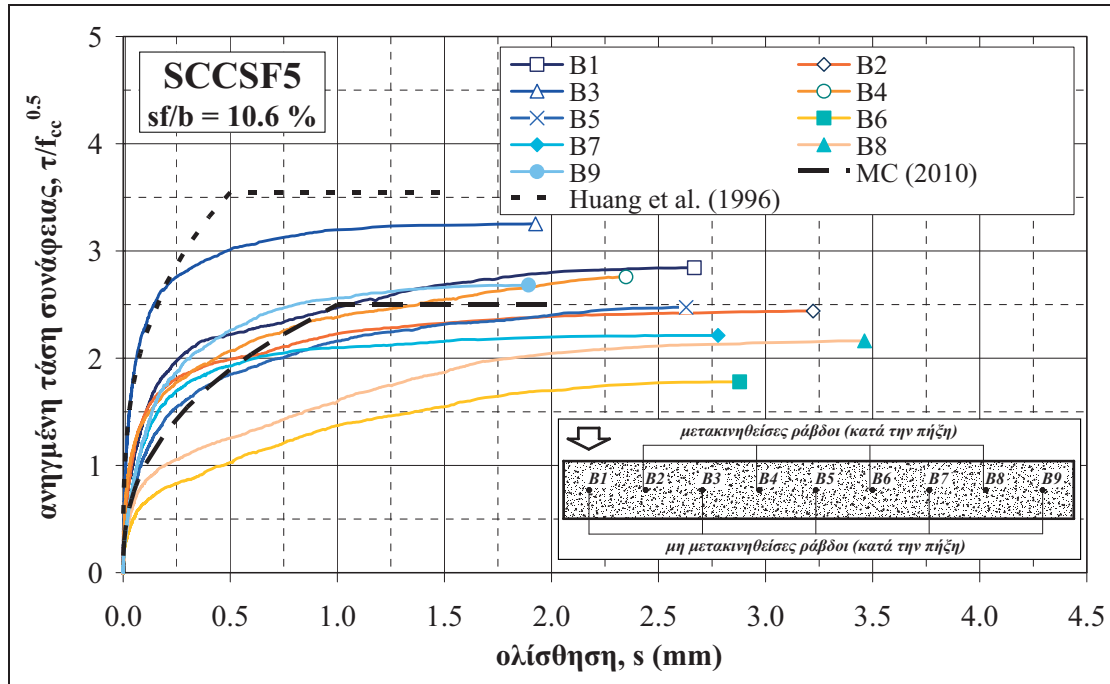
Ο Πίνακας 95 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για όλες τις ράβδους που ελέγχθηκαν στα οριζόντια δοκίμια των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Στον Πίνακα περιλαμβάνεται η πίεση διείδυσης κατά τη στιγμή της μετακίνησης κάθε ράβδου, όπως εκτιμήθηκε από την αντίστοιχη πολυωνυμική καμπύλη που περιγράφει την εξέλιξη της πίεσης διείδυσης συναρτήσει του χρόνου (Πίνακας 91). Επίσης, για λόγους σύγκρισης, στον Πίνακα περιλαμβάνονται και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας και των υπόλοιπων ράβδων.

**Πίνακας 95** Τιμές πίεσης διείδυσης και χαρακτηριστικά μεγέθη συνάφειας για τις ράβδους των οριζόντιων δοκιμίων μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$

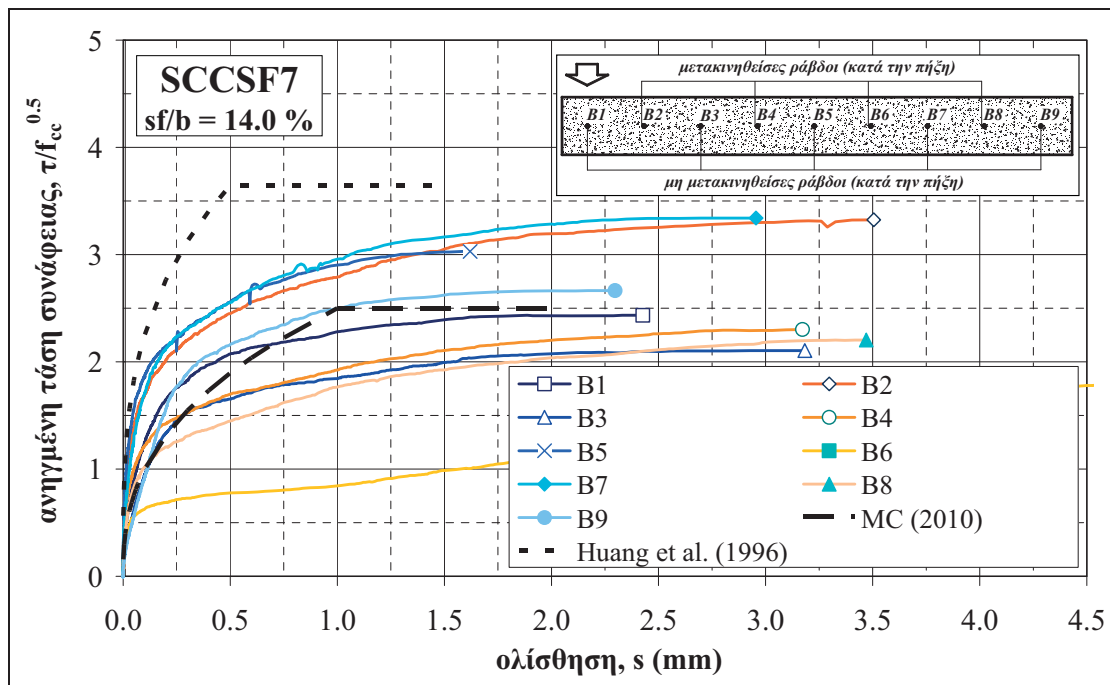
μέγεθος	κωδικός	σύνθεση	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
PR (N/mm <sup>2</sup> )	SCCSF2	SCC34	-	<b>0.01</b>	-	<b>0.84</b>	-	<b>3.28</b>	-	<b>4.98</b>	-
	SCCSF5	SCC32	-	<b>0.54</b>	-	<b>1.28</b>	-	<b>3.85</b>	-	<b>5.18</b>	-
	SCCSF7	SCC36	-	<b>0.25</b>	-	<b>3.54</b>	-	<b>4.75</b>	-	<b>5.49</b>	-
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	SCCSF2	SCC34	2.12	<b>1.76</b>	1.73	<b>1.53</b>	1.45	<b>0.90</b>	1.44	<b>0.85</b>	2.17
	SCCSF5	SCC32	1.42	<b>1.33</b>	1.91	<b>1.46</b>	1.18	<b>0.65</b>	1.20	<b>0.90</b>	0.97
	SCCSF7	SCC36	1.32	<b>1.74</b>	1.01	<b>1.25</b>	1.88	<b>0.59</b>	1.76	<b>1.07</b>	1.21
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	SCCSF2	SCC34	3.39	<b>2.96</b>	3.40	<b>2.81</b>	2.46	<b>1.64</b>	2.55	<b>1.90</b>	3.41
	SCCSF5	SCC32	2.82	<b>2.42</b>	3.22	<b>2.73</b>	2.45	<b>1.76</b>	2.19	<b>2.14</b>	2.66
	SCCSF7	SCC36	2.43	<b>3.32</b>	2.10	<b>2.30</b>	3.03	<b>1.81</b>	3.34	<b>2.20</b>	2.66
$s_{\tau_{max}}$	SCCSF2	SCC34	1.7	<b>2.1</b>	2.2	<b>2.7</b>	2.4	<b>2.2</b>	1.9	<b>4.4</b>	1.4
	SCCSF5	SCC32	2.7	<b>3.2</b>	1.9	<b>2.3</b>	2.6	<b>2.9</b>	2.8	<b>3.5</b>	1.9
	SCCSF7	SCC36	2.4	<b>3.5</b>	3.2	<b>3.2</b>	1.6	<b>4.9</b>	3.0	<b>3.5</b>	2.3



**Σχήμα 222** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινήσιμες ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF2 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινήσιμων ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



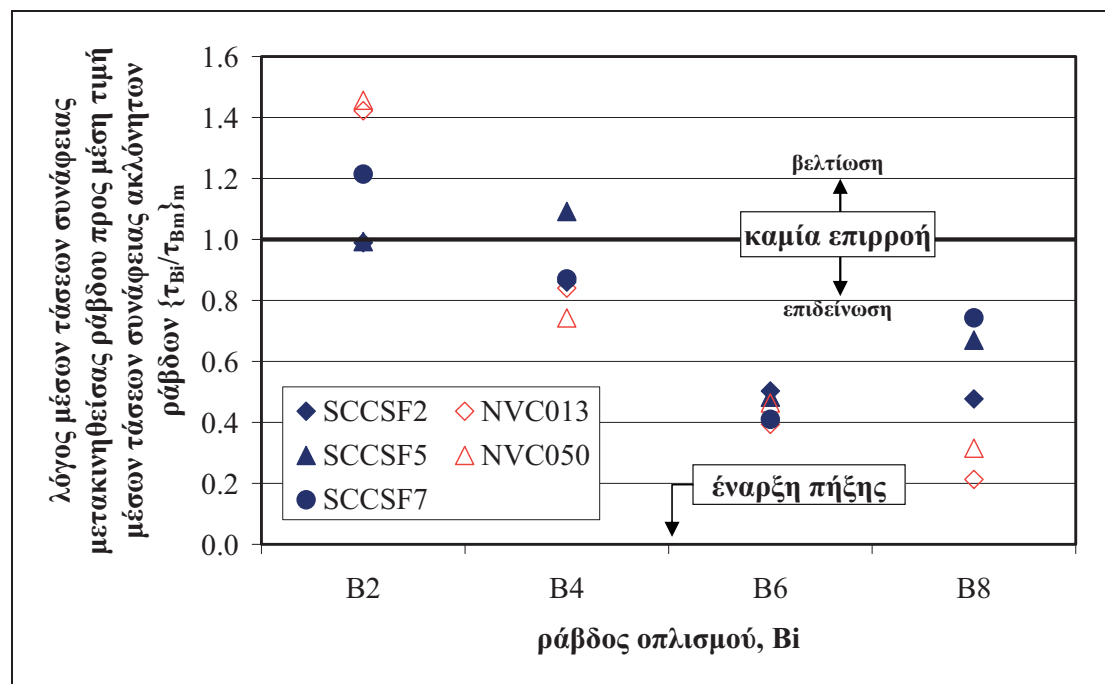
Σχήμα 223 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινηθείσες ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCSF5 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 224 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις μετακινηθείσες ράβδους (ζυγής αρίθμησης) των οριζόντιων δοκιμών της σύνθεσης SCCSF7 – Σύγκριση με καμπύλες μη μετακινηθεισών ράβδων (μονής αρίθμησης) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Σύγκριση τάσεων μεταξύ ράβδων με ή χωρίς μετακίνηση κατά την πήξη

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται η μέση και η μέγιστη τάση συνάφειας κάθε σκοπίμως μετακινηθείσας ράβδου  $B_i$  ( $i = 2, 4, 6$  ή  $8$ ),  $\tau_{Bi}$ , κατά την πήξη του σκυροδέματος, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές των τάσεων συνάφειας,  $\tau_{Bm}$ , των μη μετακινηθεισών ράβδων ( $B1, B3, B5, B7$  and  $B9$ ) των οριζόντιων δοκιμίων, όπως αυτές υπολογίστηκαν στην Παρ. 3.3.3.3 (Πίνακας 90). Αξιολογώντας το λόγο  $\tau_{Bi}/\tau_{Bm}$  (για τις αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας  $\tau_m$  ή  $\tau_{max}$ ) είναι δυνατή η διερεύνηση της επιρροής της σχετικής μετακίνησης  $\pm 1.0$  mm μεταξύ της εξεταζόμενης ράβδου οπλισμού και του περιβάλλοντος σε αυτήν σκυροδέματος, λόγω αθέλητων μετακινήσεων των τύπων κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, στη συνάφεια. Λόγοι μεγαλύτεροι της μονάδας (1.0) συνεπάγονται θετική επιρροή, υπό την έννοια ότι, μέσω της μετακίνησης, επιτυγχάνεται καλύτερη συμπύκνωση του σκυροδέματος στη μεταβατική ζώνη γύρω από τη ράβδο. Σημειώνεται ότι, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα, οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά των συνθέσεων δε φαίνεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα, τόσο για το ΑΣΣ όσο και για το ΣΣ.

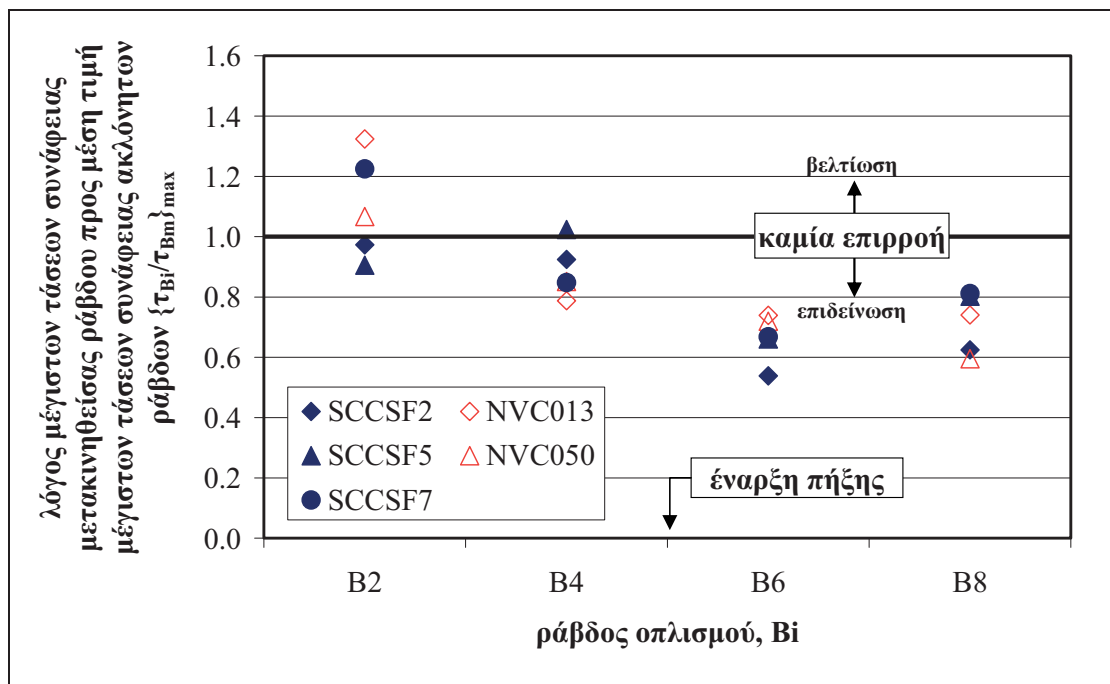


**Σχήμα 225** Επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος στην μέση τάση συνάφειας σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $s/f$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

Ειδικότερα, για τη μέση τάση συνάφειας (Σχήμα 225), η σχετική μετακίνηση μεταξύ ράβδων και σκυροδέματος σε διαφορετικές στιγμές πριν την έναρξη της πήξης του σκυροδέματος (ράβδοι οπλισμού  $B2$  και  $B4$ ) φαίνεται να έχει διαφορετική επιρροή μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, για τα δύο μίγματα ΣΣ και για τη ράβδο  $B2$  (μετακίνηση ράβδου πριν την έναρξη της πήξης) επιτυγχάνεται μία σημαντικά καλύτερη συμπύκνωση, η οποία οδηγεί σε αύξηση της τάσης συνάφειας κατά 40 %. Στη συνέχεια, η τάση συνάφειας μειώνεται σταδιακά έως και σε ποσοστά 20 έως 30 % της αρχικής της τιμής (τιμή αναφοράς,  $\tau_{Bm}$ ) για τη ράβδο  $B8$  (προχωρημένη πήξη σκυροδέματος κατά τη μετακίνηση της ράβδου). Από την άλλη πλευρά, στα μίγματα ΑΣΣ δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφοροποιήσεις στις

τάσεις συνάφειας από τις μετακινήσεις ράβδων πριν την έναρξη της πήξης. Στη συνέχεια, η τάση συνάφειας της ράβδου *B6* εμφανίζεται μειωμένη κατά 40 έως 50 % της  $\tau_{Bm}$  για οποιοδήποτε μίγμα ΑΣΣ, ενώ παρατηρείται μία μικρή αύξηση της τάσης συνάφειας της ράβδου *B8*, ειδικά για το μίγμα SCCSF7. Δεδομένου ότι οι χρονικές στιγμές, κατά τις οποίες έλαβαν χώρα οι μετακινήσεις των ράβδων στο συγκεκριμένο μίγμα είναι πολύ κοντινές, εκτιμάται ότι η διαφορά αυτή οφείλεται στην εσωτερική μεταβλητότητα του υλικού και των διαδικασιών ελέγχου. Η απώλεια συνάφειας μετά την έναρξη της πήξης μπορεί να θεωρηθεί ως πρακτικώς σταθερή για τις ράβδους *B6* και *B8* και χαμηλότερη για το ΑΣΣ (μεταξύ 30 και 60 % για το ΑΣΣ έναντι μεταξύ 60 και 80 % για το ΣΣ).

Αντίστοιχα ευρήματα προκύπτουν και για την περίπτωση της μέγιστης τάσης συνάφειας,  $\tau_{max}$ , και για τις δύο πρώτες ράβδους *B2* και *B4* (Σχήμα 226). Η απώλεια συνάφειας είναι και πάλι πρακτικώς ίδια για τις ράβδους *B6* και *B8* (από 20 έως 40 %). Για τα μίγματα ΣΣ, η ενωρίτερη μετακίνηση (ράβδος *B2*) οδηγεί σε καλύτερη συμπίκνωση, αν και με μικρότερη επιρροή στη συνάφεια εν σχέσει προς την περίπτωση της μέσης τάσης συνάφειας. Στη συνέχεια, η τάση συνάφειας μειώνεται σταδιακά έως το 60 έως 80 % της αρχικής της τιμής (τιμή αναφοράς,  $\tau_{Bm}$ ) για τις ράβδους *B6* και *B8*, οι οποίες και πάλι φαίνεται να παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Σημειώνεται ότι η μείωση αυτή φαίνεται να είναι σημαντικά ηπιότερη εν σχέσει προς την περίπτωση της τάσης συνάφειας  $\tau_m$ .



Σχήμα 226 Επιρροή μετακινήσεων ράβδων κατά την πήξη του σκυροδέματος στην μέγιστη τάση συνάφειας σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

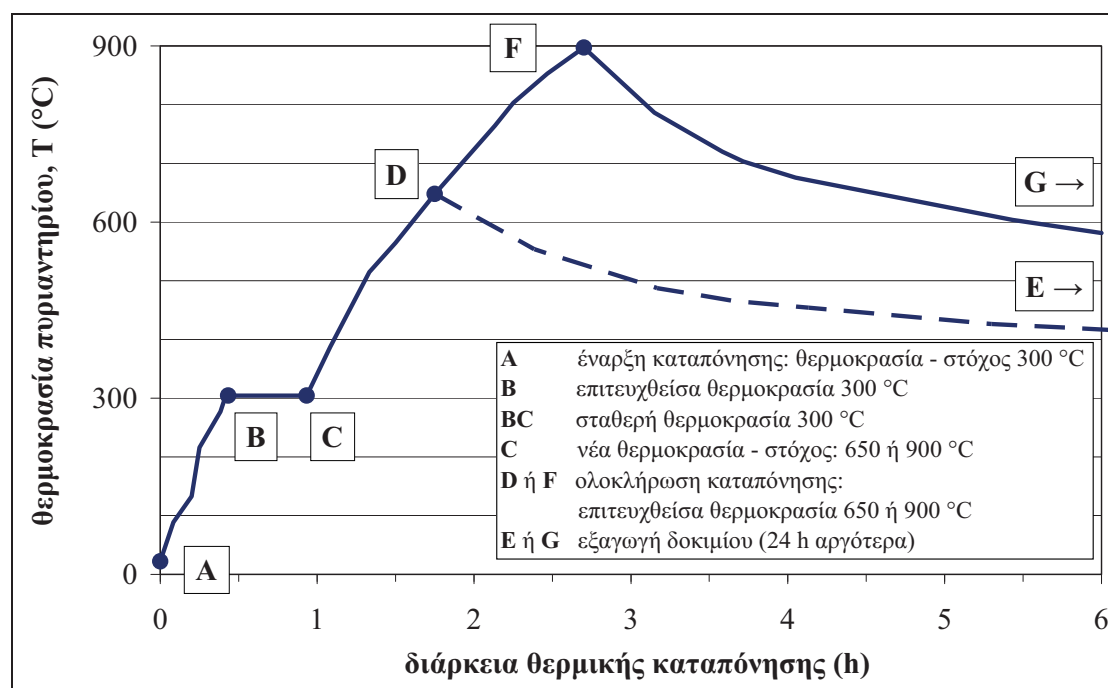
Συνοψίζοντας τα παραπάνω ευρήματα, το ΑΣΣ φαίνεται να παρουσιάζει μία εν γένει καλύτερη συμπεριφορά εν σχέσει προς το ΣΣ έως την αρχική πήξη. Παρά το γεγονός ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή στα μίγματα ΑΣΣ οδηγεί σε μία σημαντική καθυστέρηση της αρχική πήξης, τυχόν σεισμικά γεγονότα που μπορεί αν οδηγήσουν σε μετακινήσεις των τύπων και, συνεπώς, σε σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος, κατά τη διάρκεια της σημαντικά μεγαλύτερης περιόδου μετά την διάστρωση, δεν αναμένεται να επηρεάσουν αρνητικά

τη συνάφεια. Μετά την αρχική πήξη, τόσο το ΑΣΣ όσο και το ΣΣ φαίνεται να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όσο αφορά στην απώλεια της τάσης συνάφειας λόγω των σχετικών μετακινήσεων, η οποία για την περίπτωση της μέσης τάσης συνάφειας είναι ελαφρώς χαμηλότερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ.

### 3.3.6. Επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια<sup>7</sup>

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής πραγματοποιήθηκε, επιπροσθέτως, διερεύνηση της συμπεριφοράς του ΑΣΣ, κατόπιν θερμικής του καταπόνησης σε μέσες και υψηλές θερμοκρασίες, και σύγκριση των αποτελεσμάτων με ομοίως θερμικώς καταπονημένο ΣΣ. Τα αποτελέσματα από τις αντίστοιχες δοκιμές, στις οποίες δεν είχε προηγηθεί θερμική καταπόνηση, αλλά τα δοκίμια είχαν συντηρηθεί εξ ολοκλήρου υπό συνήθεις θερμοκρασίες μέχρι τον έλεγχό τους, χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά.

Πιο συγκεκριμένα, πέντε κυβικά δοκίμια (C1 έως C5) ανά σύνθεση συντηρήθηκαν υπό συνθήκες περιβάλλοντος για 28 ημέρες. Στη συνέχεια, τα τρία εξ αυτών (C1 έως C3) δοκιμάστηκαν σε εξόλκευση. Τα υπόλοιπα δύο δοκίμια (C4 και C5) καταπονήθηκαν θερμικά σε πυριαντήριο υψηλών θερμοκρασιών, σύμφωνα με το θερμοκρασιακό προφίλ, όπως αυτό φαίνεται γραφικά **Σχήμα 227**.



Σχήμα 227 Θερμική καταπόνηση δοκιμίων εντός πυριαντηρίου υψηλών θερμοκρασιών

Πιο αναλυτικά, τα δοκίμια C4 και C5 καταπονήθηκαν θερμικά με θερμοκρασία – στόχο του πυριαντηρίου στους 300 °C, μετά την επίτευξη της οποίας παρέμειναν στο πυριαντήριο για 30 min. Ακολούθως, το ένα δοκίμιο (C4) απομακρύνθηκε από το πυριαντήριο, ενώ το δεύτερο δοκίμιο (C5) συνέχισε να καταπονείται θερμικά με θερμοκρασία – στόχο 650 ή 900 °C. Μετά την επίτευξη της θερμοκρασίας, το πυριαντήριο απενεργοποιήθηκε και το δεύτερο δοκίμιο (C5) παρέμεινε εντός αυτού

<sup>7</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στα πρακτικά του 7<sup>ου</sup> Συνέδριου για το ΑΣΣ (SCC2013): 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 2-4 Σεπτεμβρίου 2013, Παρίσι, Γαλλία [Badogiannis et al. (2013)].



για 24 h μέχρι τη φυσική αποθέρμανσή του. Σημειώνεται ότι τα άκρα των ράβδων δεν ήταν προστατευμένα κατά τη θέρμανση. Η δοκιμή εξόλκευσης πραγματοποιήθηκε και για τα δύο δοκίμια την επόμενη ημέρα από τη θερμική καταπόνησή τους και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης στα δοκίμια C1 έως C3.

### 3.3.6.1. Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

#### Θερμική καταπόνηση & Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο Πίνακας 96 περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες-στόχους και τις μέγιστες επιτευχθείσες θερμοκρασίες κατά τη θερμική καταπόνηση των κυβικών δοκιμών C4 και C5 κάθε διαφορετικής σύνθεσης ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ . Επιπλέον, στον Πίνακα περιλαμβάνονται οι τύποι αστοχίας κατά την εκτέλεση της δοκιμής εξόλκευσης, ήτοι αστοχία σε εξόλκευση ράβδου (pull-out, PO) ή σε διάρρηξη σκυροδέματος (splitting, SP). Σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα.

**Πίνακας 96** Μέγιστη θερμοκρασία-στόχος κατά τη θερμική καταπόνηση και τύπος αστοχίας κατά της δοκιμή εξόλκευσης, ανά σύνθεση

κωδικός	κωδικός	δοκίμιο C4		τύπος αστοχίας	δοκίμιο C5		τύπος αστοχίας
		θερμοκρασία (°C)	επιτευχθείσα		θερμοκρασία (°C)	επιτευχθείσα	
NVC000	NVC11	300	300	PO	900	900	SP
NVC013	NVC13	300	300	PO	650	650	SP
NVC025	NVC12	300	300	PO	900	900	SP
NVC050	NVC14	300	300	PO	650	650	SP

Όσο αφορά στα δοκίμια C4, τα οποία, στο σύνολό τους, καταπονήθηκαν θερμικά με θερμοκρασία-στόχο τους 300 °C, αστόχησαν σε εξόλκευση ράβδου κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής εξόλκευσης. Αντίθετα, η δοκιμή εξόλκευσης σε όλα τα θερμικώς καταπονημένα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (650 ή 900 °C) δοκίμια C5 οδήγησε σε αστοχία λόγω διάρρηξης σκυροδέματος. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι σε κανένα δοκίμιο από εκείνα που καταπονήθηκαν θερμικά δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα εκρηκτικών αποφλοιώσεων (explosive spalling).

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 228 έως Σχήμα 231), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλες τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους κυβικών δοκιμών ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , χωρίς ή με θερμική καταπόνηση (C1, C2, C3 και C4, C5, αντίστοιχα).

#### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 97 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολισθήση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για τις ράβδους των δοκιμών C4 και C5 που παρασκευάστηκαν από μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  και που καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Σημειώνεται ότι δεν ελήφθη υπόψη η απομείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της θερμικής καταπόνησης.

**Πίνακας 97** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , για τα δοκίμια C4 και C5, τα οποία καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες

κωδικός σύνθεση	NVC000	NVC013	NVC025	NVC050
$pce/b$	<b>0.00</b>	<b>0.13</b>	<b>0.25</b>	<b>0.50</b>
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	C4 1.36	0.88	0.79	0.59
	C5 0.13	0.42	0.15	0.32
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	C4 2.95	2.27	2.21	1.52
	C5 0.43	1.22	0.47	0.90
$s_{\tau_{max}}$ (mm)	C4 2.0	0.9	3.9	4.3
	C5 1.4	0.7	1.5	0.6

### 3.3.6.2. Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

#### Θερμική καταπόνηση & Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

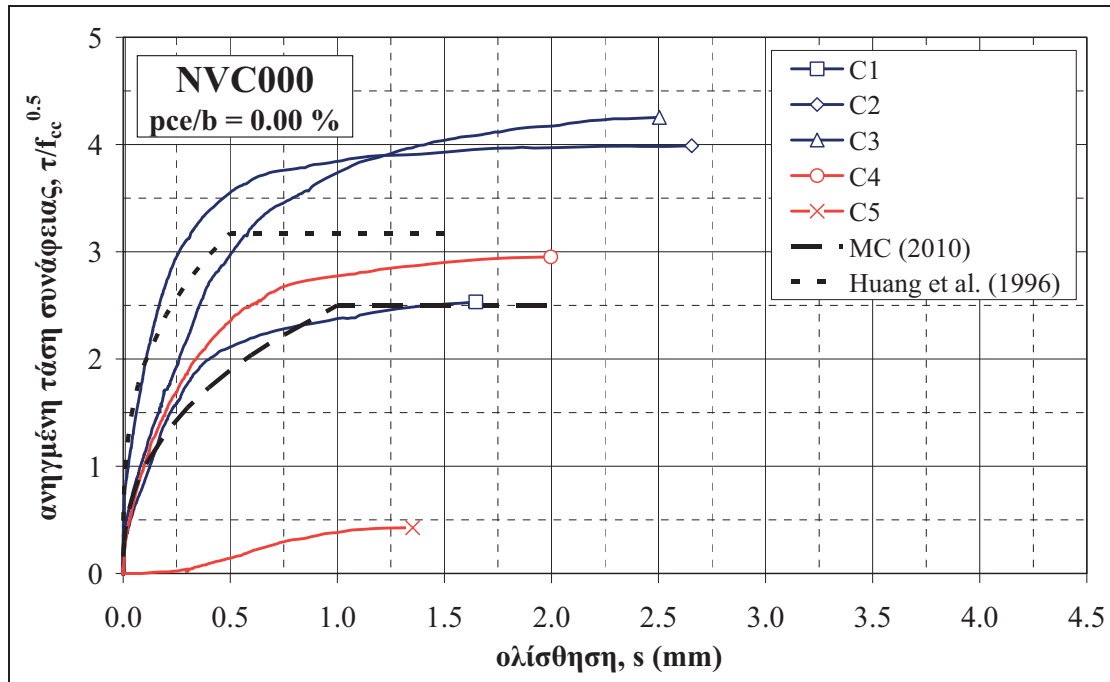
Ο Πίνακας 98 περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες-στόχους και τις μέγιστες επιτευχθείσες θερμοκρασίες κατά τη θερμική καταπόνηση των κυβικών δοκιμών C4 και C5 κάθε διαφορετικής σύνθεσης ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Επιπλέον, στον Πίνακα περιλαμβάνονται οι τύποι αστοχίας κατά την εκτέλεση της δοκιμής εξόλκευσης, ήτοι αστοχία σε εξόλκευση ράβδου (pull-out, PO) ή σε διάρρηξη σκυροδέματος (splitting, SP). Όπως και στην περίπτωση των δοκιμών ΣΣ, όσο αφορά στα δοκίμια C4, τα οποία, στο σύνολό τους, καταπονήθηκαν θερμικά με θερμοκρασία-στόχο τους 300 °C, αστόχησαν σε εξόλκευση ράβδου κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής εξόλκευσης. Αντίθετα, αλλά και πάλι κατ' αντιστοιχία με τα δοκίμια ΣΣ, η δοκιμή εξόλκευσης σε όλα τα θερμικώς καταπονημένα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (650 ή 900 °C) δοκίμια C5 των μιγμάτων ΑΣΣ οδήγησε σε αστοχία λόγω διάρρηξης σκυροδέματος. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι σε κανένα δοκίμιο από εκείνα που καταπονήθηκαν θερμικά δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα εκρηκτικών αποφλοιώσεων (explosive spalling), αν και θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθέσεις με υψηλότερους λόγους  $w/b$  δεν εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες 900 °C, καταπόνηση η οποία θα μπορούσε δυνητικά να οδηγήσει σε ακόμα πιο αυξημένες τάσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Σε καμία ράβδο δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα.

**Πίνακας 98** Μέγιστη θερμοκρασία-στόχος κατά τη θερμική καταπόνηση και τύπος αστοχίας κατά της δοκιμή εξόλκευσης, ανά σύνθεση

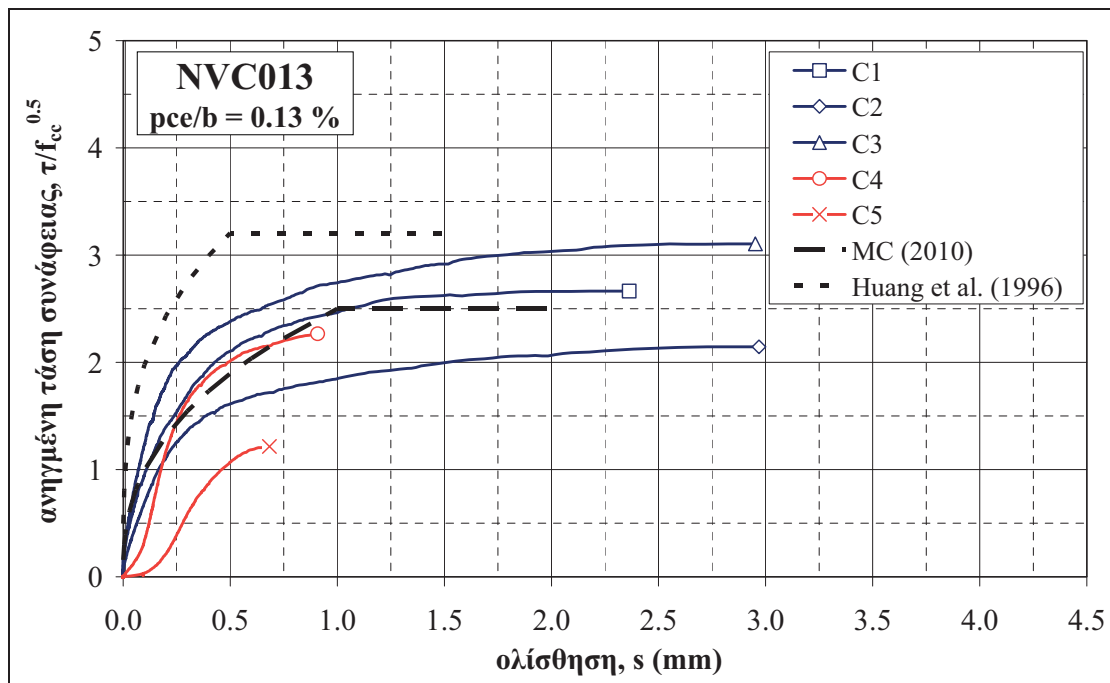
κωδικός	σύνθεση	δοκίμιο C4		δοκίμιο C5			
		θερμοκρασία (°C)	τύπος	θερμοκρασία (°C)	τύπος	τύπος	
		στόχος	επιτευχθείσα	αστοχίας	στόχος	επιτευχθείσα	αστοχίας
SCCWB1	SCC29	300	300	PO	900	900	SP
SCCWB4	SCC28	300	300	PO	650	650	SP
SCCWB5	SCC31	300	300	PO	650	650	SP

#### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

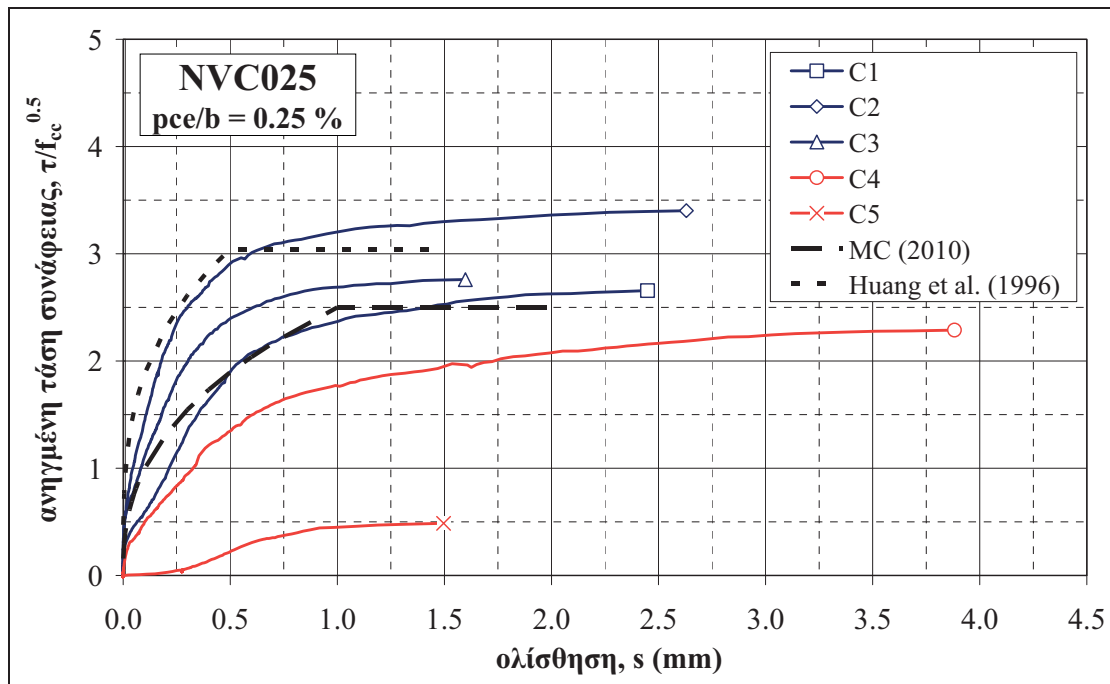
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 232 έως Σχήμα 234), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλες τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους κυβικών δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ , χωρίς ή με θερμική καταπόνηση (C1, C2, C3 και C4, C5, αντίστοιχα).



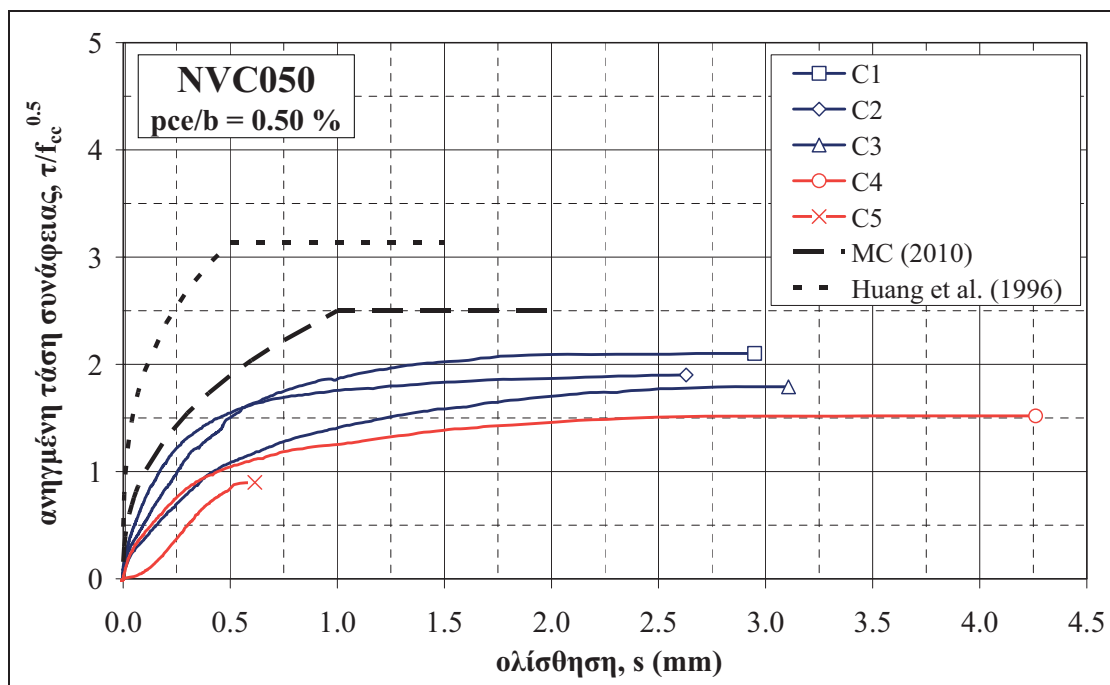
**Σχήμα 228** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC000 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



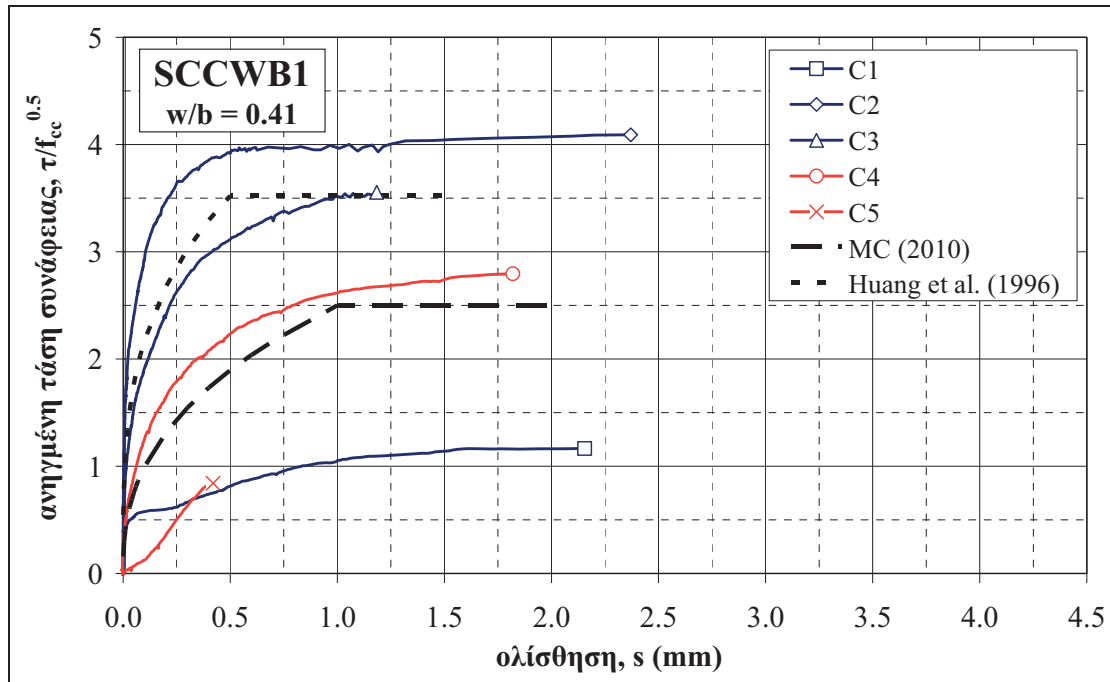
**Σχήμα 229** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC013 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



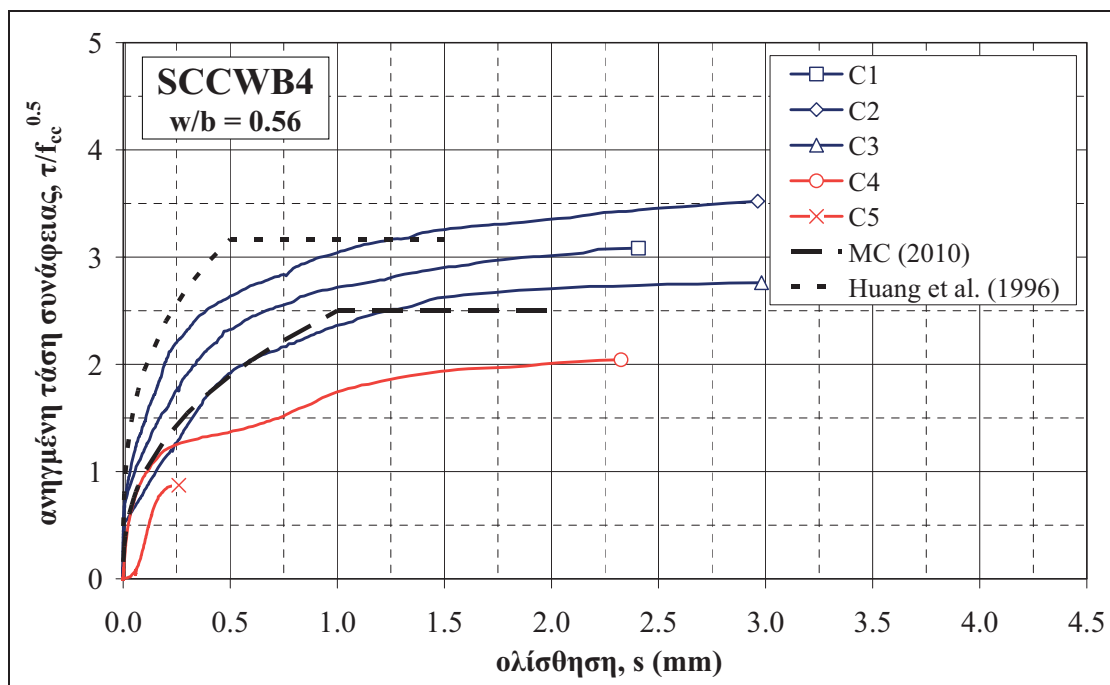
**Σχήμα 230** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC025 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



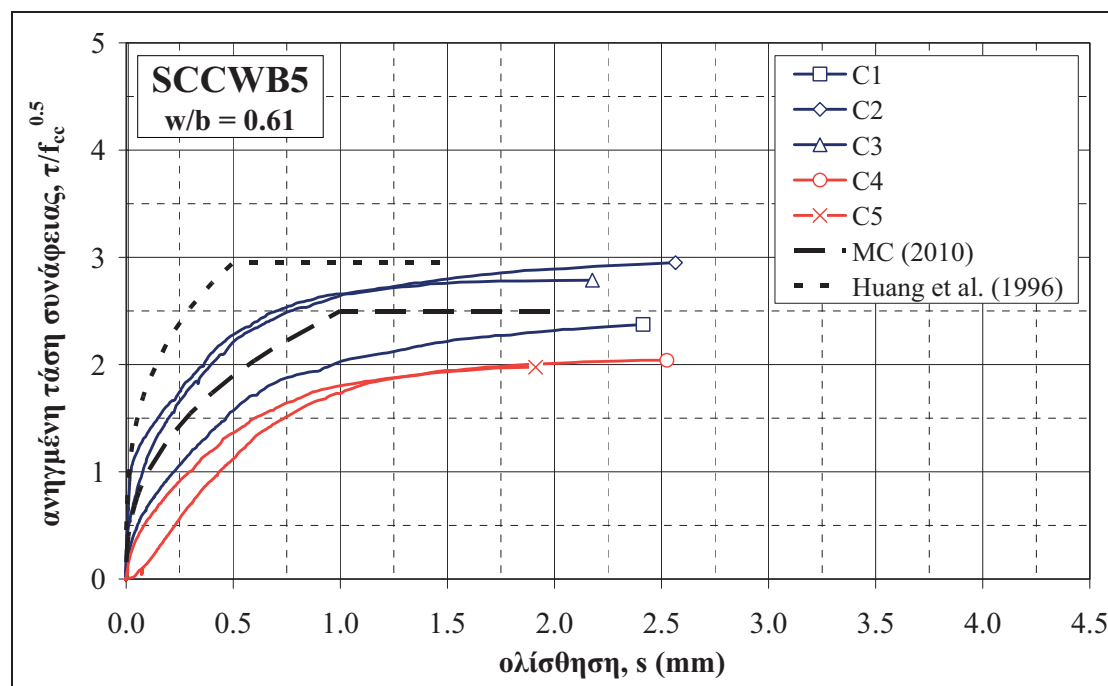
**Σχήμα 231** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης NVC050 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 232 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB1 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 233 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB4 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



**Σχήμα 234** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCWB5 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 99 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για τις ράβδους των δοκιμίων C4 και C5 που παρασκευάστηκαν από μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου w/b και που καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Σημειώνεται ότι δεν ελήφθη υπόψη η απομείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της θερμικής καταπόνησης.

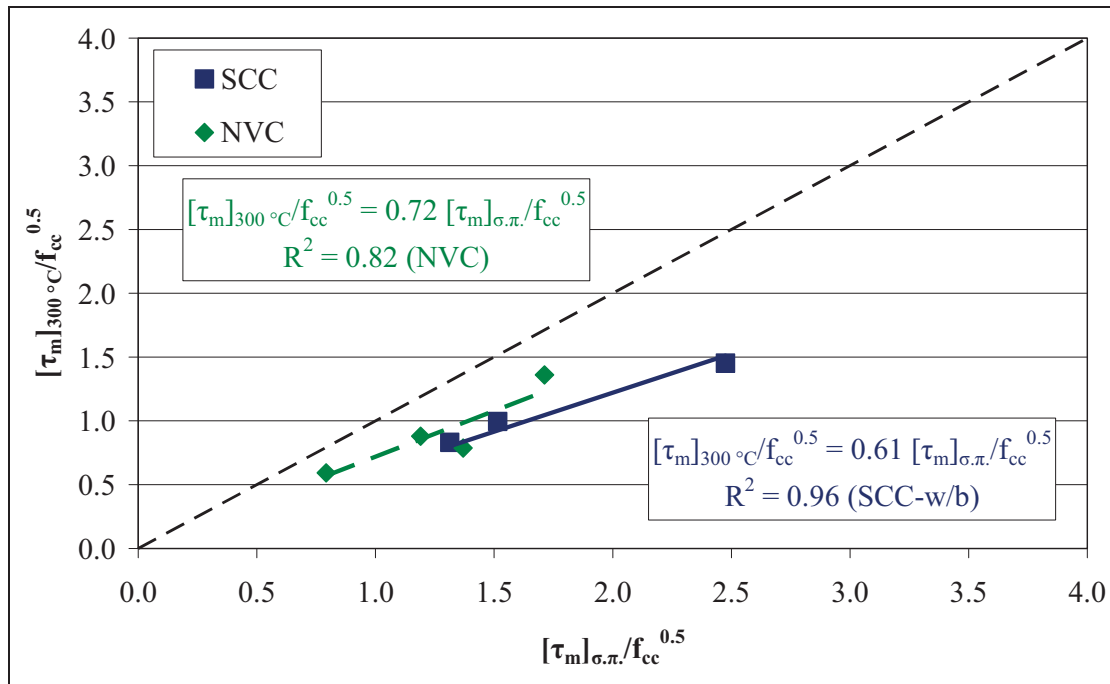
**Πίνακας 99** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου w/b, για τα δοκίμια C4 και C5, τα οποία καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες

	θερμοκρασίες		
κωδικός	SCCWB1	SCCWB4	SCCWB5
σύνθεση	SCC29	SCC28	SCC31
w/b	0.41	0.56	0.61
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	C4	1.45	0.99
	C5	0.33	0.40
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	C4	2.79	2.04
	C5	0.84	0.87
$s_{\tau_{max}}$ (mm)	C4	1.8	2.3
	C5	0.4	0.3

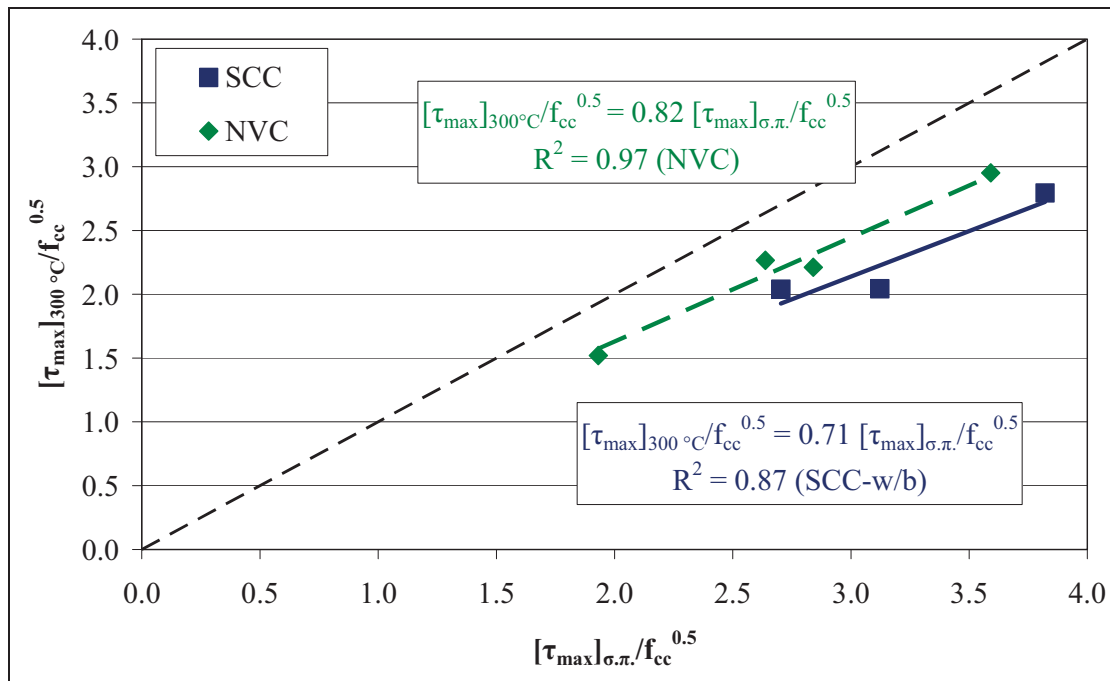
### Επιρροή θέρμανσης στους 300 °C

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκριτικά οι μέσες τιμές της ανηγμένης τάσης συνάφειας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης σε τρία δοκίμια που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) και η ανηγμένη τάση συνάφειας του δοκιμίου που εκτέθηκε σε θερμοκρασία 300 °C. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 235 παρουσιάζονται οι τιμές που αφορούν στην ανηγμένη μέση τάση

συνάφειας, ενώ στο **Σχήμα 236** παρουσιάζονται οι τιμές που αφορούν στην ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας. Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των σημείων με τη διαγώνιο θα συνεπαγόταν απουσία επιρροής της θερμοκρασίας στην εξεταζόμενη αντιπροσωπευτική τάση συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  ή  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ .



**Σχήμα 235** Σύγκριση ανηγμένης μέσης τάσης συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων με μεταβλητή περιεκτικότητα νερού που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των ανηγμένων μέσων τάσεων συνάφειας τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.)

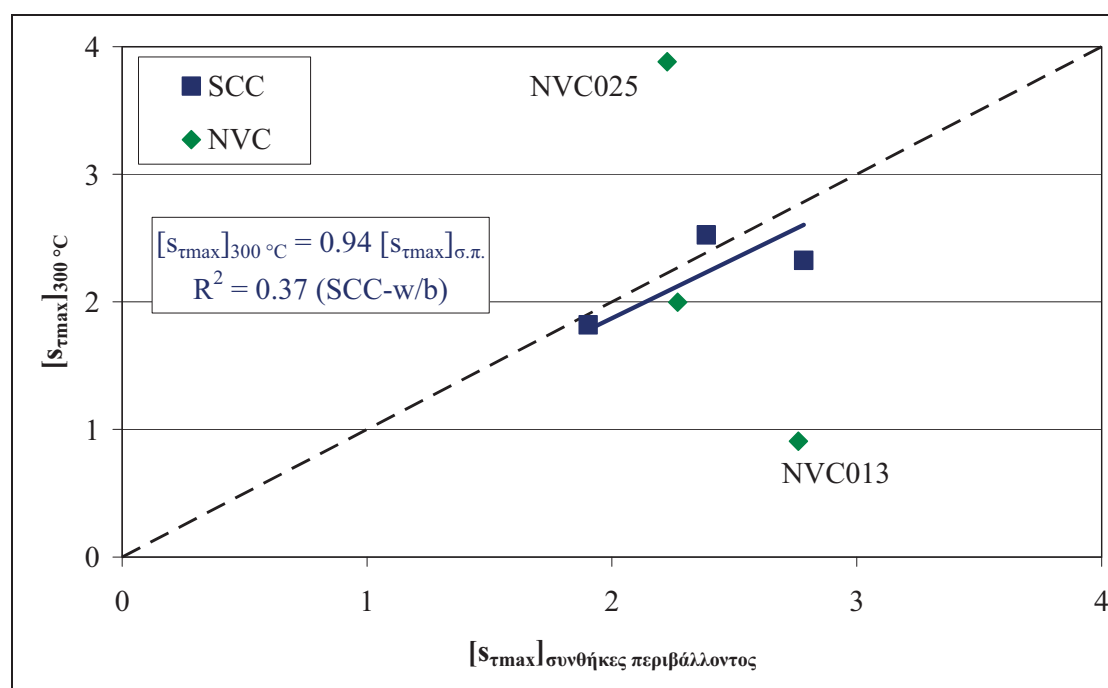


**Σχήμα 236** Σύγκριση ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων με μεταβλητή περιεκτικότητα νερού που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των ανηγμένων μέγιστων τάσεων συνάφειας τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.)

Παρατηρείται ότι η έκθεση σε θερμοκρασία 300 °C οδηγεί σε μείωση των αντιπροσωπευτικών ανηγμένων τάσεων συνάφειας, η οποία είναι ελαφρώς

μεγαλύτερη, κατά περίπου 18 %, για την περίπτωση των μιγμάτων ΑΣΣ, εν σχέσει προς τα μίγματα ΣΣ. Συγκεκριμένα, η ανηγμένη μέση τάση συνάφειας δοκιμίου ΑΣΣ που εκτίθεται σε θερμοκρασία 300 °C ανέρχεται σε 61 % της αντίστοιχης μέσης τιμής της ανηγμένης μέσης τάσης συνάφειας τριών δοκιμίων του ίδιου μίγματος που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.), ενώ για την ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας το αντίστοιχο ποσοστό της μείωσης είναι ελαφρώς μικρότερο και ανέρχεται σε 72 %. Τα αντίστοιχα ποσοστά για την περίπτωση των ΣΣ ανέρχονται σε 71 και 82 %, αντίστοιχα. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, οι συντελεστές συσχέτισης είναι πολύ υψηλοί ( $R^2$  από 0.82 έως 0.97).

Στο **Σχήμα 237** παρουσιάζεται η μέση τιμή της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας, όπως προέκυψε κατά τη δοκιμή εξόλκευσης τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.), συγκριτικά με την αντίστοιχη ολίσθηση ράβδου δοκιμίου που εκτέθηκε σε θερμοκρασία 300 °C. Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των σημείων με τη διαγώνιο θα συνεπαγόταν απουσία επιρροής της θερμοκρασίας στην εξεταζόμενη ολίσθηση,  $s_{\tau_{\max}}$ . Παρατηρείται ότι, για τα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ , η  $s_{\tau_{\max}}$  δε φαίνεται να μεταβάλλεται λόγω της θερμικής καταπόνησης, σε αντίθεση με τα μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , τα δύο εκ των οποίων παρουσιάζουν πολύ μεγάλες και αντίθετες μεταξύ τους αποκλίσεις από τη διαγώνιο.



**Σχήμα 237** Ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας για δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C συναρτήσει της μέσης τιμής των αντίστοιχων ολισθήσεων τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.)

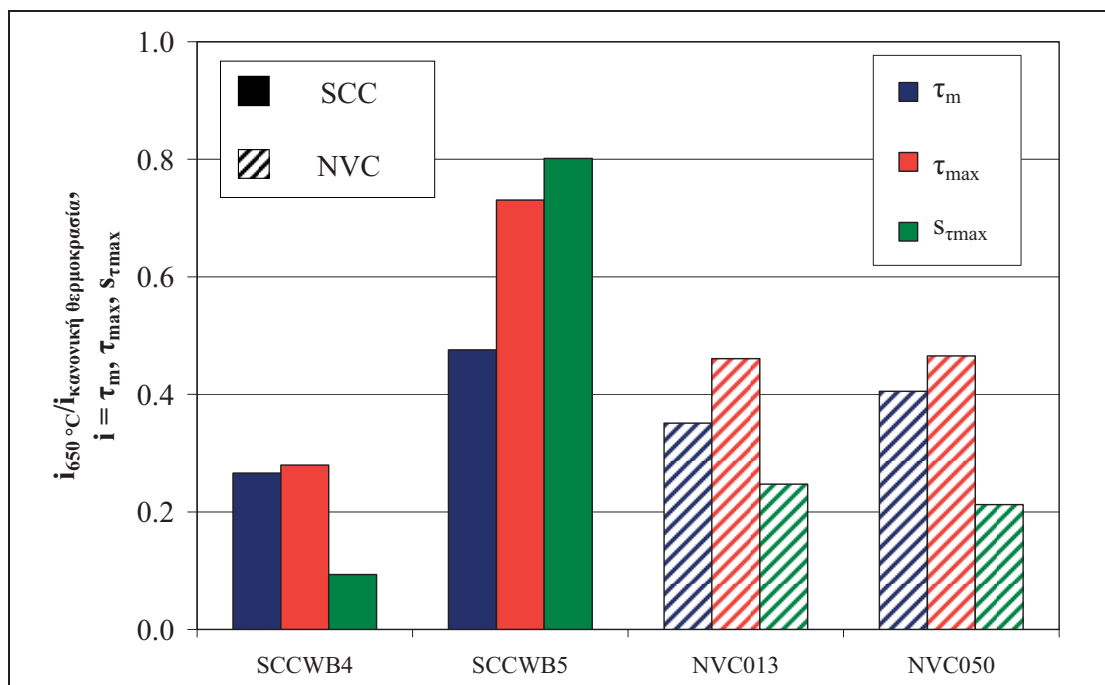
### Επιρροή θέρμανσης στους 650 ή 900 °C

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά συνάφειας (μέση τάση,  $\tau_m$ , μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{\max}$ , και αντίστοιχη ολίσθηση,  $s_{\tau_{\max}}$ ) δοκιμίων που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 ή 900 °C, ανηγμένα στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά δοκιμίων που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.). Για

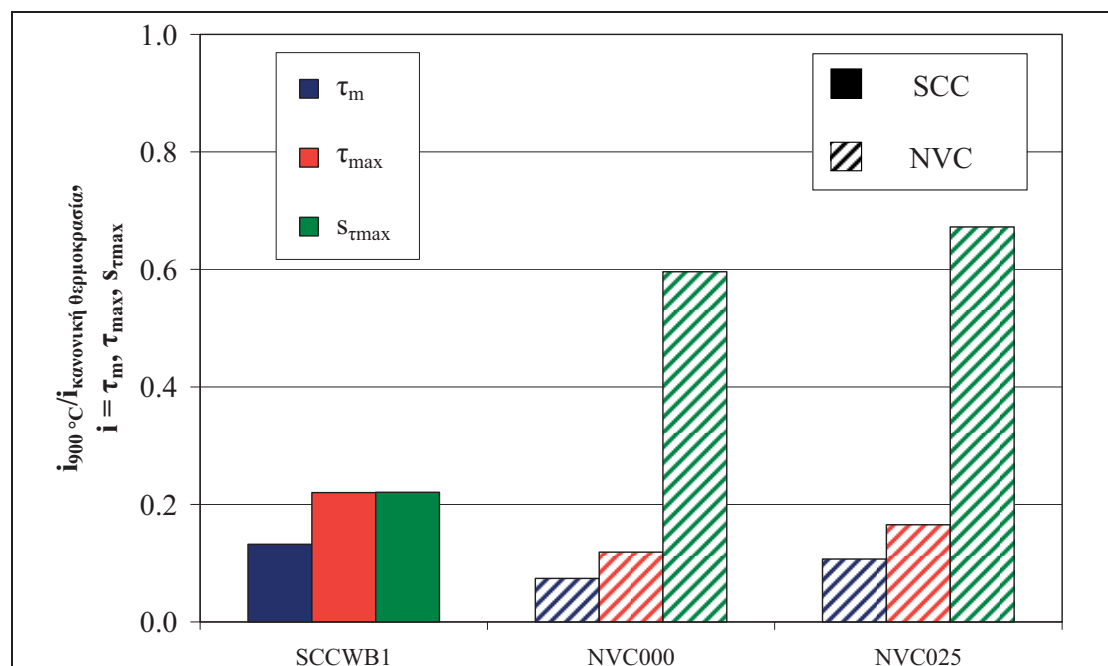


κάθε περίπτωση μέγιστης θερμοκρασίας (650 ή 900 °C) πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ .

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 238** παρουσιάζονται οι λόγοι των χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμίων ΑΣΣ και ΣΣ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 °C προς τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας δοκιμίων που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.). Παρατηρείται ότι, αν και το δείγμα είναι εξαιρετικά μικρό, η σύνθεση των μιγμάτων ΑΣΣ και, συγκεκριμένα, η μεταβολή του λόγου  $w/b$  φαίνεται να επηρεάζει τον τρόπο επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια. Για θερμική καταπόνηση έως 650 °C, τα μίγματα SCCWB4 και SCCWB5 παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Συγκεκριμένα, η μείωση των τάσεων συνάφειας είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του χαμηλότερου λόγου  $w/b = 0.56$  (SCCWB4). Για το μεγαλύτερο λόγο  $w/b = 0.61$  (SCCWB5) η μείωση της μέσης τάσης συνάφειας φαίνεται να είναι εντονότερη εν σχέσει προς την αντίστοιχη μείωση της μέγιστης τάσης συνάφειας, εν αντιθέσει με τον χαμηλότερο λόγο  $w/b = 0.56$  (SCCWB5), για τον οποίο η μείωση είναι πρακτικώς ίδια. Σημαντική διαφορά παρουσιάζουν και οι ολισθήσεις, οι οποίες μειώθηκαν κατά 20 % για τη σύνθεση SCCWB5, αλλά κατά περίπου 90 % για τη σύνθεση SCCWB4. Αντίθετα, η μεταβολή του λόγου  $pce/b$  δε φαίνεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά του ΣΣ υπό την ίδια θερμική καταπόνηση, γεγονός που αποδεικνύεται από την όμοια συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα μίγματα NVC013 και NVC050 για την ίδια θερμική καταπόνηση έως 650 °C. Συγκεκριμένα, όλα τα χαρακτηριστικά συνάφειας παρουσίασαν αντίστοιχες μειώσεις μεταξύ των δύο συνθέσεων ΣΣ, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ των αντίστοιχων μειώσεων των δύο συνθέσεων ΑΣΣ.



**Σχήμα 238** Λόγος χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμίων με μεταβλητή περιεκτικότητα νερού που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) – Σύγκριση με ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$



**Σχήμα 239** Λόγος χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών με μεταβλητή περιεκτικότητα νερού που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 900 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) – Σύγκριση με ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

Στο **Σχήμα 239** οι λόγοι των χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών ΑΣΣ και ΣΣ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 900 °C προς τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας δοκιμών που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.). Υπενθυμίζεται ότι λόγοι εγγύτεροι στη μονάδα (1.0) συνεπάγονται μεγαλύτερη σύμπτωση συμπεριφοράς σε συνάφεια, μεταξύ των διαφορετικά θερμοκώς καταπονημένων δοκιμών. Στην περίπτωση αυτή και για τις δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις, οι μειώσεις είναι παρεμφερείς μεταξύ των δύο τύπων σκυροδεμάτων, ΑΣΣ και ΣΣ, αν και ελαφρώς υψηλότερες στο ΣΣ. Αντίθετα, για την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας, η μείωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην περίπτωση της σύνθεσης SCCWB1.

### 3.3.6.3. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

#### Θερμική καταπόνηση & Τύποι αστοχίας δοκιμών εξόλκευσης

Ο **Πίνακας 100** περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες-στόχους και τις μέγιστες επιτευχθείσες θερμοκρασίες κατά τη θερμική καταπόνηση των κυβικών δοκιμών C4 και C5 κάθε διαφορετικής σύνθεσης ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Επιπλέον, στον Πίνακα περιλαμβάνονται οι τύποι αστοχίας κατά την εκτέλεση της δοκιμής εξόλκευσης, ήτοι αστοχία σε εξόλκευση ράβδου (pull-out, PO) ή σε διάρρηξη σκυροδέματος (splitting, SP). Όσο αφορά στα δοκίμια C4, τα οποία, στο σύνολό τους, καταπονήθηκαν θερμικά με θερμοκρασία-στόχο τους 300 °C, παρατηρείται ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη (SCCSF6, SCCSF7 με ποσοστά αντικατάστασης  $sf/b = 12.3$  και  $14.0$  % κ.β., αντίστοιχα) οδηγούν σε αστοχία από διάρρηξη σκυροδέματος. Επιπλέον, όσο αφορά στα δοκίμια C5 και για ποσοστά αντικατάστασης άνω του  $sf/b = 10.6$  %, παρατηρήθηκε εκρηκτική αποφλοίωση (explosive spalling) πριν την επίτευξη της θερμοκρασίας στόχου, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να μην μπορεί στη συνέχεια να ελεγχθεί.

Σημειώνεται, πάντως, ότι το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον μη ελεγχόμενο, αλλά σταθερό, ρυθμό θερμικής καταπόνησης ( $6.2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ) του πυριαντηρίου του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία [Hertz (1992)] αναφέρεται ότι σκυροδέματα με ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης μπορούν να εμφανίσουν τάση προς εκρηκτική αποφλοΐωση ακόμα και για χαμηλούς ρυθμούς θερμικής καταπόνησης ( $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ), σε αντίθεση με άλλα σκυροδέματα τα οποία είναι ανθεκτικά έναντι του φαινομένου αυτού για πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς θερμικής καταπόνησης (έως και  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ). Για όλα τα δοκίμια C5 που εκτέθηκαν επιτυχώς στη θερμική καταπόνηση, κατά τη δοκιμή εξόλκευσης ο τύπος αστοχίας ήταν σε διάρρηξη σκυροδέματος. Δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα.

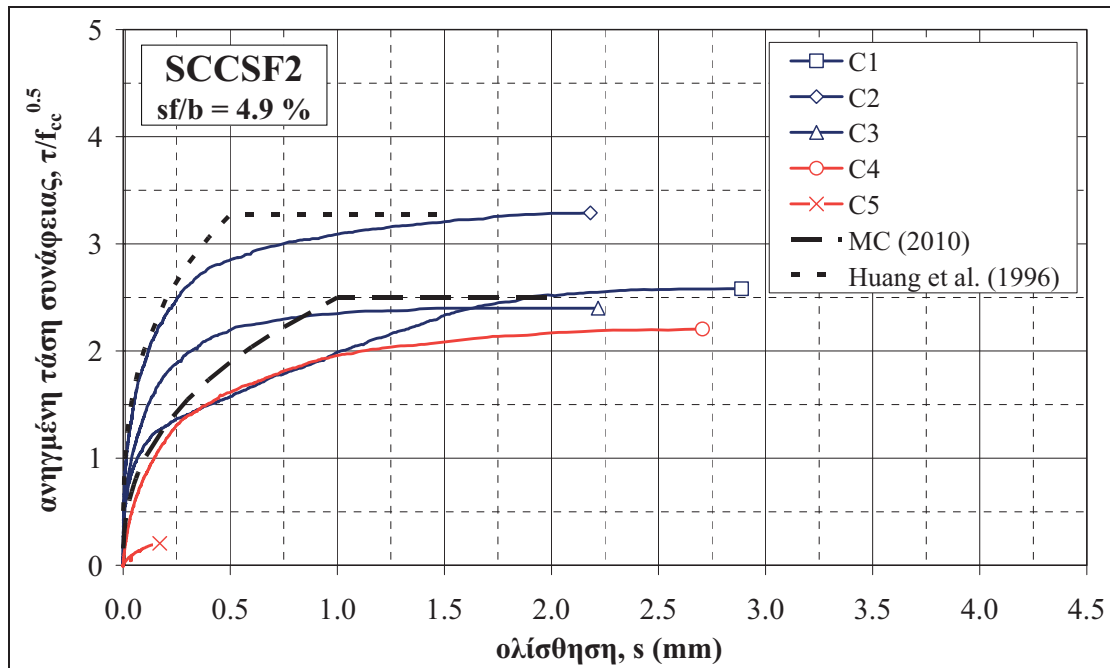
**Πίνακας 100** Μέγιστη θερμοκρασία-στόχος κατά τη θερμική καταπόνηση και τύπος αστοχίας κατά της δοκιμή εξόλκευσης, ανά σύνθεση

κωδικός	σύνθεση	δοκίμιο C4			δοκίμιο C5		
		θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )	τύπος	θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )	τύπος	θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )	τύπος
		στόχος	επιτευχθείσα	αστοχίας	στόχος	επιτευχθείσα	αστοχίας
SCCSF2	SCC34	300	300	PO	650	650	SP
SCCSF3	SCC30	300	300	PO	900	900	SP
SCCSF4	SCC35	300	300	PO	650	615*	**
SCCSF6	SCC33	300	300	SP	650	650	SP
SCCSF7	SCC36	300	300	SP	650	450*	**

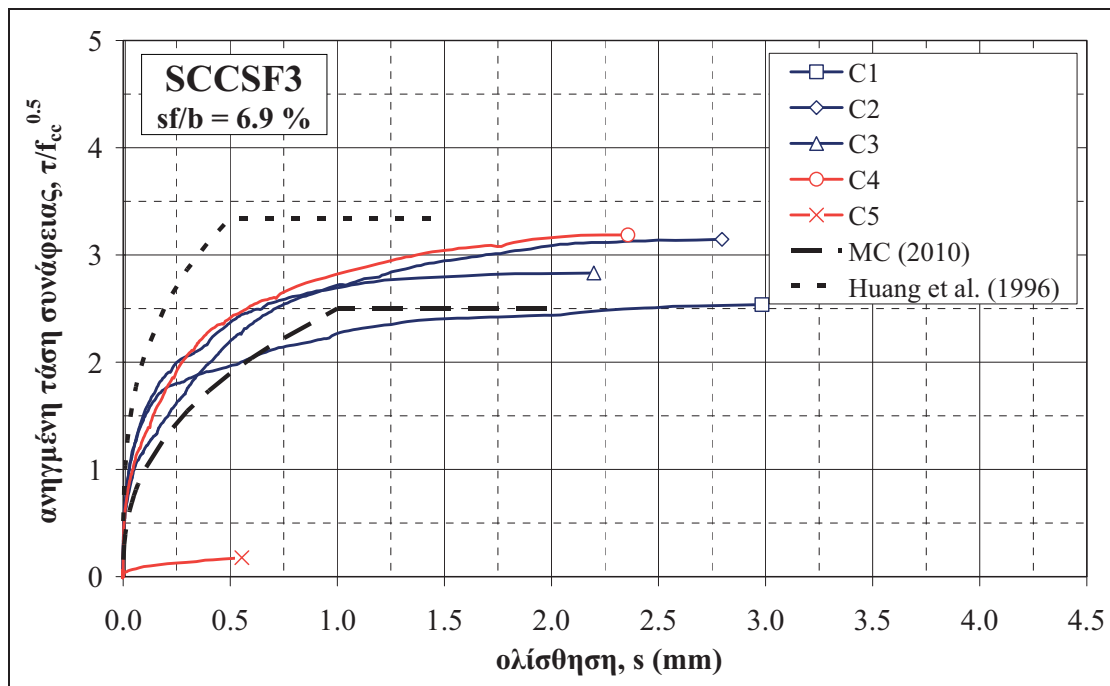
\*θερμοκρασία, κατά την οποία το δοκίμιο καταστράφηκε από εκρηκτική αποφλοΐωση (πριν φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία – στόχο) \*\*δεν πραγματοποιήθηκε δοκιμή εξόλκευσης

### Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

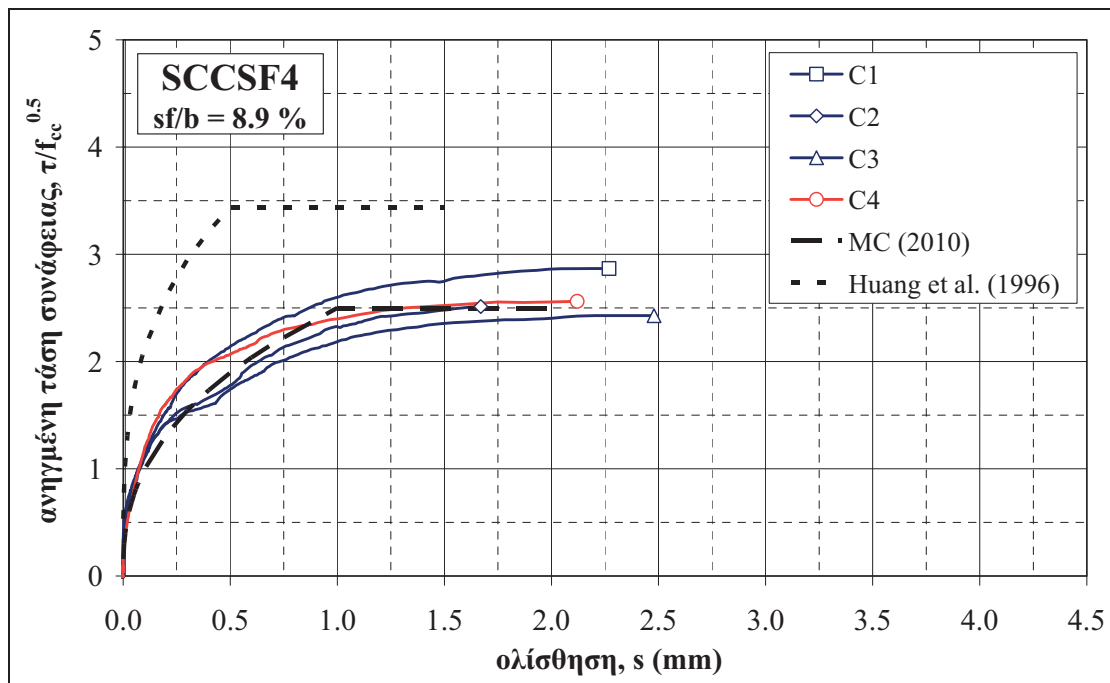
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 240 έως Σχήμα 244), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για όλες τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν για τις ράβδους κυβικών δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , χωρίς ή με θερμική καταπόνηση (C1, C2, C3 και C4, C5, αντίστοιχα).



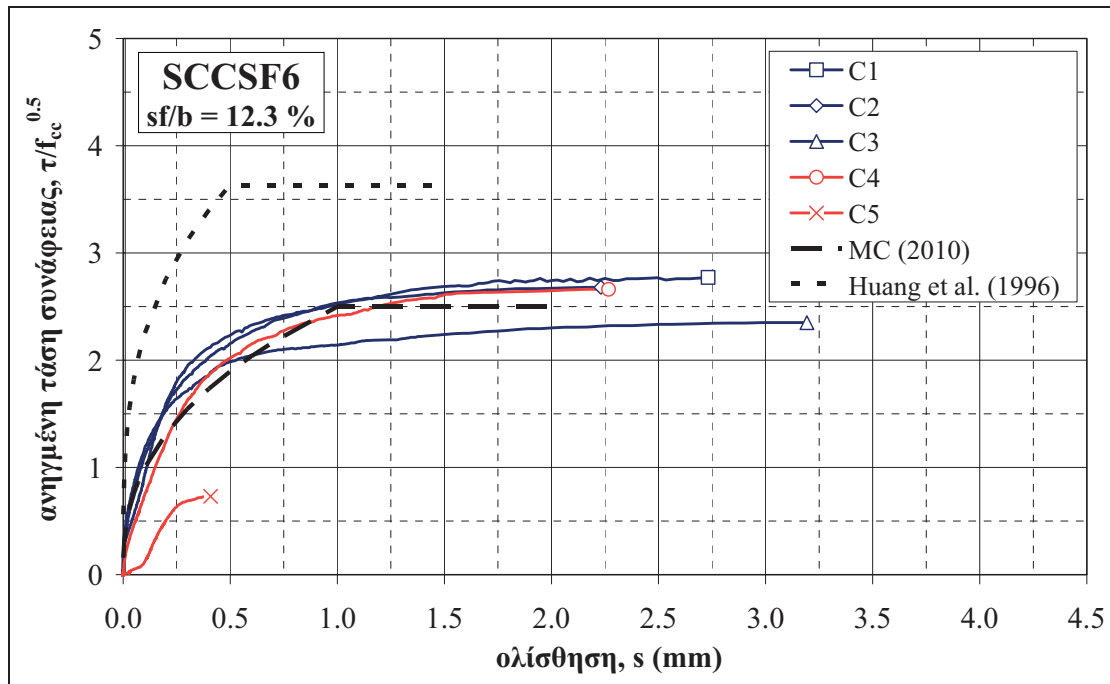
**Σχήμα 240** Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολισθήσης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF2 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμών που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



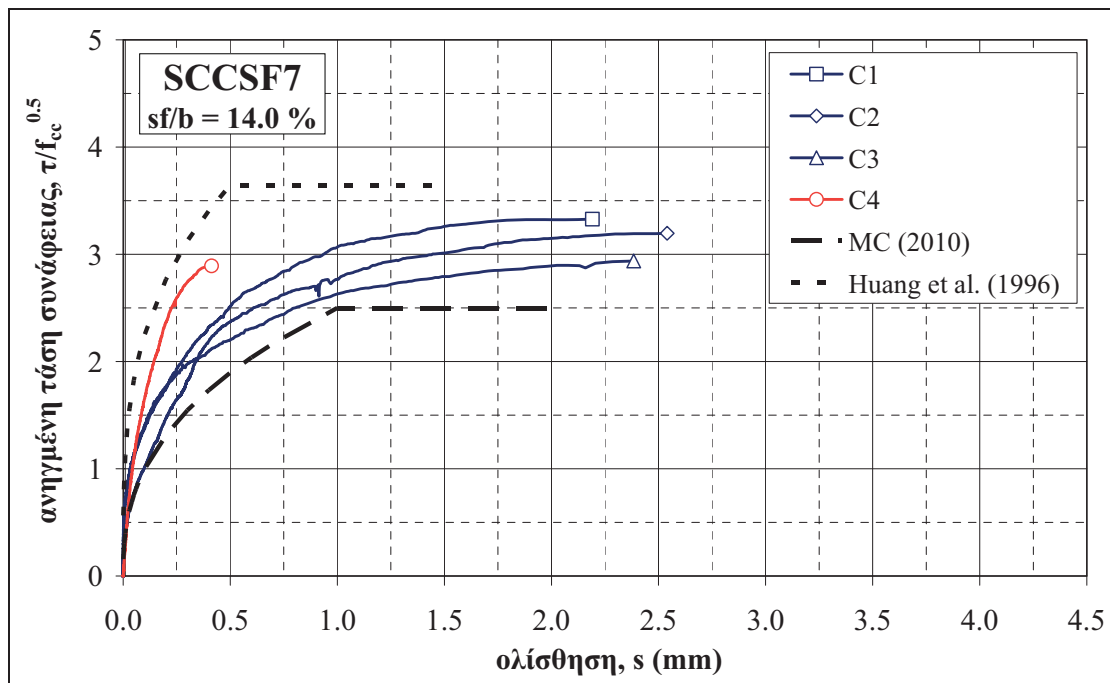
Σχήμα 241 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF3 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 242 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων της σύνθεσης SCCSF4 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμίων που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 243 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF6 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμών που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας



Σχήμα 244 Καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμών της σύνθεσης SCCSF7 που εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C4, C5) και σύγκριση με καμπύλες δοκιμών που δεν εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (C1, C2, C3) και με καμπύλες MC 2010 και βιβλιογραφίας

### Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 101 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , και την ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{tmax}$ , για τις ράβδους των δοκιμίων C4 και C5 που παρασκευάστηκαν από μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και που καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Σημειώνεται ότι δεν ελήφθη υπόψη η απομείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της θερμικής καταπόνησης.

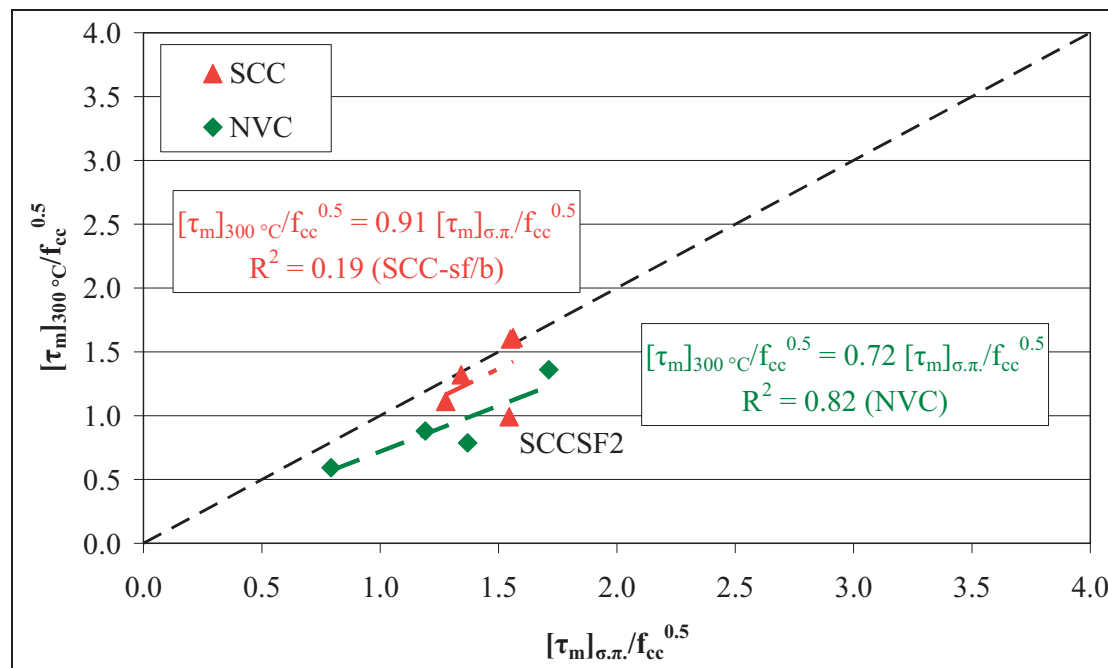
**Πίνακας 101** Ανηγμένες μέσες και μέγιστες τάσεις συνάφειας και αντίστοιχες ολισθήσεις μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , για τα δοκίμια C4 και C5, τα οποία καταπονήθηκαν θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες

κωδικός	SCCSF2	SCCSF3	SCCSF4	SCCSF6	SCCSF7
σύνθεση	SCC34	SCC30	SCC35	SCC33	SCC36
$sf/b$	<b>4.9</b>	<b>6.9</b>	<b>8.9</b>	<b>12.3</b>	<b>14.0</b>
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	C4 0.99	1.60	1.32	1.11	1.61
	C5 0.13	0.10	*	0.29	*
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	C4 2.21	3.21	2.56	2.66	2.89
	C5 0.21	0.18	*	0.73	*
$s_{tmax}$ (mm)	C4 2.7	2.4	2.1	2.3	0.4
	C5 0.2	0.6	*	0.4	*

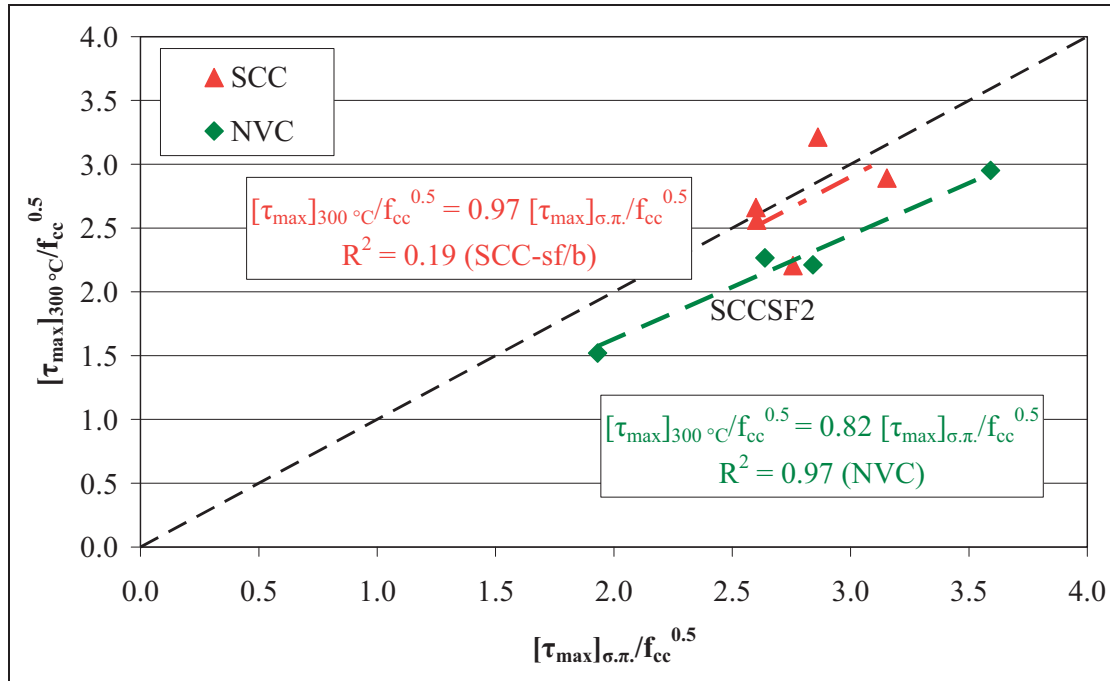
\*το δοκίμιο δεν ελέγχθηκε, καθώς καταστράφηκε κατά τη διάρκεια της θερμικής καταπόνησης από φαινόμενα εκρηκτικής αποφλοίωσης

### Επιρροή θέρμανσης στους 300 °C

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκριτικά οι μέσες τιμές της ανηγμένης τάσης συνάφειας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης σε τρία δοκίμια που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) και η ανηγμένη μέση τάση συνάφειας δοκιμίου που εκτέθηκε σε θερμοκρασία 300 °C.



**Σχήμα 245** Σύγκριση ανηγμένης μέσης τάσης συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των ανηγμένων μέσων τάσεων συνάφειας τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.)

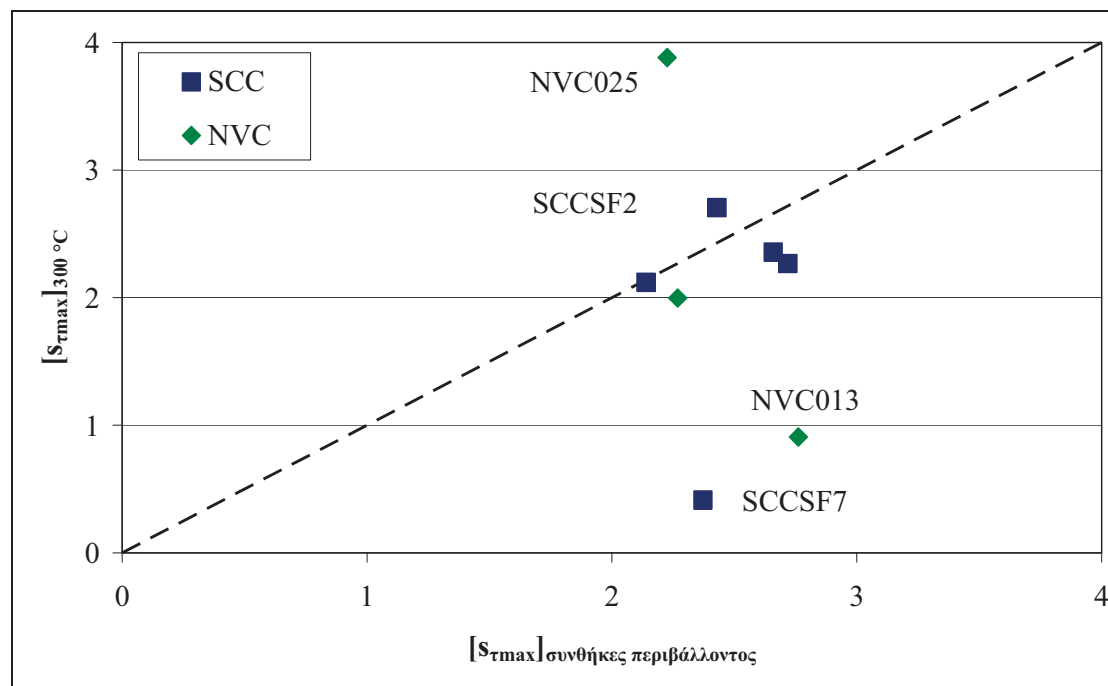


**Σχήμα 246** Σύγκριση ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας για δοκίμια μινιμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των ανηγμένων μέγιστων τάσεων συνάφειας τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.)

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 245** παρουσιάζονται οι τιμές που αφορούν στην ανηγμένη μέση τάση συνάφειας, ενώ στο **Σχήμα 246** παρουσιάζονται οι τιμές που αφορούν στην ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας. Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των σημείων με τη διαγώνιο θα συνεπαγόταν απουσία επιρροής της θερμοκρασίας στην εξεταζόμενη αντιπροσωπευτική τάση συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  ή  $\tau_{\max}/f_{cc}^{0.5}$ . Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με τα μίγματα ΣΣ, η έκθεση σε θερμοκρασία 300 °C δεν οδηγεί εν γένει σε πτώση των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων για την περίπτωση του ΑΣΣ με ενσωματωμένη πυριτική παιπάλη. Το μίγμα που παρουσιάζει σημαντικότερη πτώση των ανηγμένων τάσεων συνάφειας είναι εκείνο με τη χαμηλότερο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη ( $sf/b = 4.9$  %, SCCSF2). Εξαιρουμένου του εν λόγω μίγματος, οι τιμές των ανηγμένων τάσεων είναι πρακτικώς ίδιες.

Στο **Σχήμα 247** παρουσιάζεται συγκριτικά η μέση τιμή της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας όπως προέκυψε κατά τη δοκιμή εξόλκευσης τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) και η αντίστοιχη ολίσθηση ράβδου δοκιμίου που εκτέθηκε σε θερμοκρασία 300 °C. Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των σημείων με τη διαγώνιο θα συνεπαγόταν απουσία επιρροής της θερμοκρασίας στην εξεταζόμενη ολίσθηση,  $s_{\tau_{\max}}$ . Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ , δεν παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, δύο μίγματα παρουσιάζουν πολύ μεγάλες και αντίθετες μεταξύ τους αποκλίσεις από τη διαγώνιο. Όσο αφορά στα μίγματα ΑΣΣ με ενσωματωμένη πυριτική παιπάλη, η εικόνα είναι και πάλι ασαφής. Πάντως, εξαιρουμένου του μίγματος SCCSF7, το οποίο αστόχησε σε διάρρηξη σκυροδέματος και, συνεπώς, ανέπτυξε σημαντικά χαμηλότερη ολίσθηση, οι ολισθήσεις φαίνεται να

κινούνται αρκετά κοντά στη διαγώνιο. Μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει και πάλι το μίγμα με το χαμηλότερο ποσοστό αντικατάστασης ( $sf/b = 4.9 \%$ , SCCSF2).



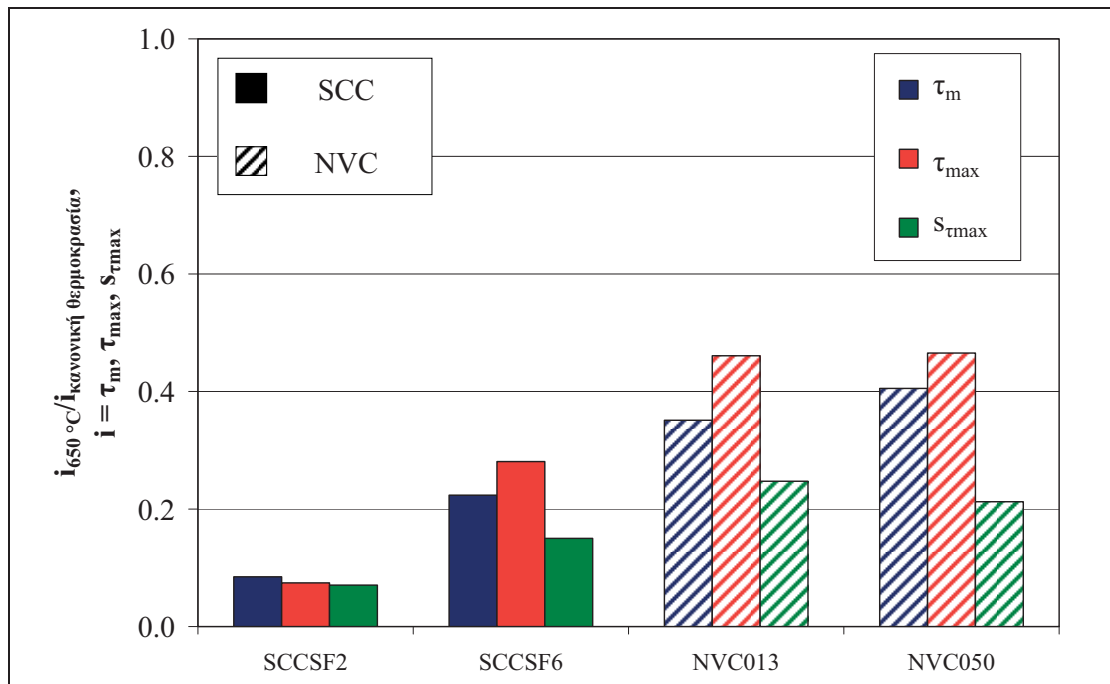
**Σχήμα 247** Σύγκριση ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας για δοκίμια μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων ολισθήσεων τριών δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.)

### Επιρροή θέρμανσης στους 650 ή 900 °C

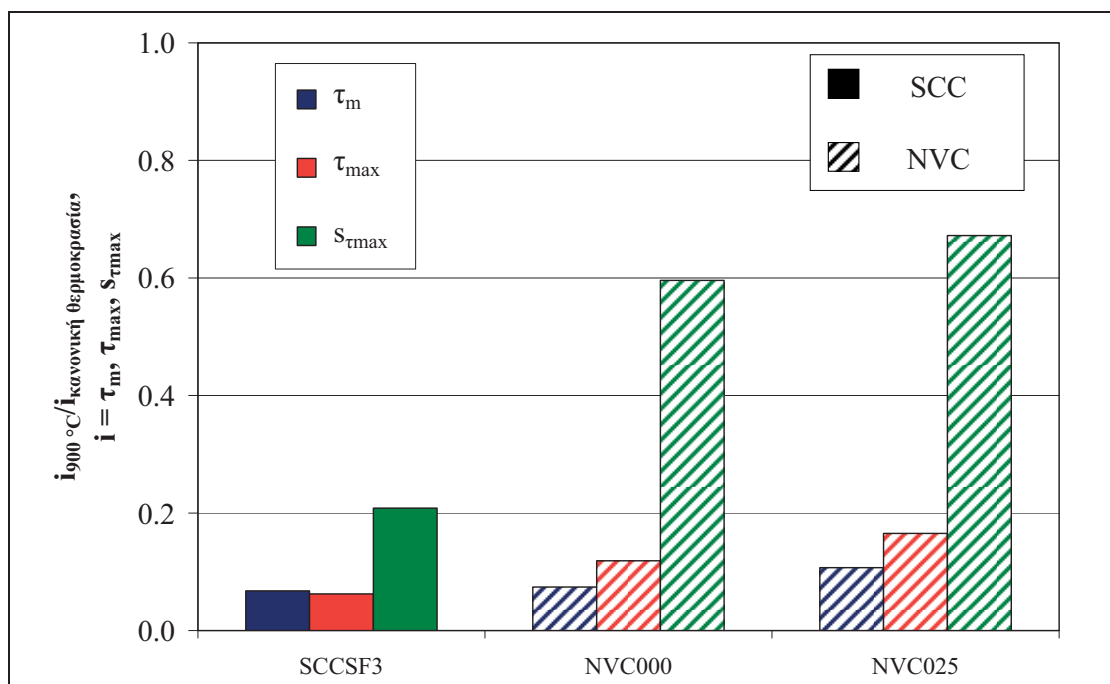
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά συνάφειας (μέση τάση,  $\tau_m$ , μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{max}$ , και αντίστοιχη ολίσθηση,  $s_{\tau max}$ ) δοκιμίων που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 ή 900 °C, ανηγμένα στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά δοκιμίων που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος. Για κάθε περίπτωση μέγιστης θερμοκρασίας (650 ή 900 °C) πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και μιγμάτων ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$ .

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 248** παρουσιάζονται οι λόγοι των χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμίων ΑΣΣ και ΣΣ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 °C προς τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας δοκιμίων που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος. Παρατηρείται ότι, αν και το δείγμα είναι μικρό, η σύνθεση των μιγμάτων ΑΣΣ και, συγκεκριμένα, η μεταβολή του λόγου  $sf/b$  φαίνεται να επηρεάζει τον τρόπο επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια, αν και σε μικρότερο βαθμό από τη μεταβολή του λόγου  $w/b$ . Για θερμική καταπόνηση έως 650 °C, τα μίγματα SCCSF2 και SCCSF6 παρουσιάζουν διαφορές. Συγκεκριμένα, η μείωση των τάσεων συνάφειας είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του χαμηλότερου λόγου  $sf/b = 4.9 \%$ . Αντίθετα, η μεταβολή του λόγου  $pce/b$  δε φαίνεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά του ΣΣ υπό την ίδια θερμική καταπόνηση, γεγονός που αποδεικνύεται από την όμοια συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα μίγματα NVC013 και NVC050 για την ίδια θερμική καταπόνηση έως 650 °C. Συγκεκριμένα, όλα τα χαρακτηριστικά συνάφειας παρουσίασαν αντίστοιχες μειώσεις μεταξύ των δύο συνθέσεων ΣΣ, οι οποίες είναι, πάντως, μικρότερες από τις αντίστοιχες μειώσεις των δύο συνθέσεων ΑΣΣ.





**Σχήμα 248** Λόγος χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 650 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) – Σύγκριση με ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$



**Σχήμα 249** Λόγος χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 900 °C με τη μέση τιμή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τριών δοκιμών που συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος (σ.π.) – Σύγκριση με ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$

Στο **Σχήμα 249** παρουσιάζονται οι λόγοι των χαρακτηριστικών συνάφειας δοκιμών ΑΣΣ και ΣΣ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες έως 900 °C προς τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά συνάφειας δοκιμών που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε συνθήκες περιβάλλοντος. Στην περίπτωση αυτή και για τις δύο αντιπροσωπευτικές τάσεις, οι μειώσεις είναι παρεμφερείς μεταξύ των δύο τύπων σκυροδεμάτων, αν και ελαφρώς

μικρότερες στο ΣΣ. Αντίθετα, για την  $s_{\text{max}}$ , η μείωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην περίπτωση της σύνθεσης SCCSF3.

### 3.3.7. Διεργαστηριακή Αναπαραγωγισιμότητα<sup>8</sup>

Για τη διερεύνηση της δυνατότητας αναπαραγωγής όμοιων μιγμάτων μεταξύ Εργαστηρίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με χρήση υλικών που συμμορφώνονται με τα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης σε όμοια μίγματα που παρασκευάστηκαν αφενός στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ) και αφετέρου στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ). Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της διεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας ελέγχθηκε μέρος των μιγμάτων των υπο-ομάδων συνθέσεων Β1 και Η2 (Πίν. 38 και 46, Κεφ. 2). Ειδικότερα, ελέγχθηκαν οι συνθέσεις με ίδιο λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b = 0.50$ ) και ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου σε ποσοστά από  $sf/b = 4.9$  έως  $14.0$  %, περιλαμβανομένου και ενός μίγματος αναφοράς ( $sf/b = 0.0$  %). Συνολικά ελέγχθηκαν τέσσερα μίγματα ανά εργαστήριο και, συγκεκριμένα, τρία πρότυπα δοκίμια ανά μίγμα στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και δύο πρότυπα δοκίμια ανά μίγμα στο ΕΔΥ/ΠΚ.



Σχήμα 250 Διάταξη δοκιμής εξόλκευσης (α) ΕΩΣ/ΕΜΠ και (β) ΕΔΥ/ΠΚ

<sup>8</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στα Πρακτικά του 5<sup>ου</sup> Συνεδρίου για το ΑΣΣ (SCC2013): 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, Chicago, IL, USA, May 12–15 2013 [Sfikas et al. (2013)].

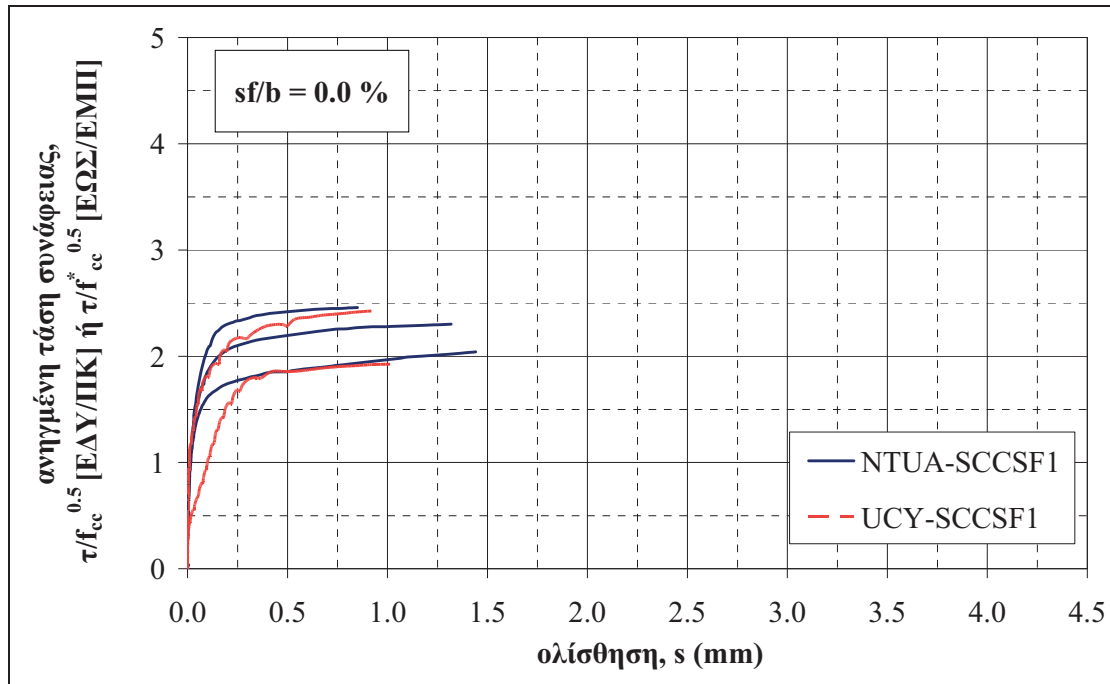
Για τον έλεγχο των δοκιμίων στο ΕΔΥ/ΠΚ εφαρμόστηκε η πρότυπη δοκιμή εξόλκευσης, όπως περιγράφηκε στην Παρ. 3.2.2, ενώ για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τις διεργαστηριακές συγκρίσεις αξιολογήθηκαν όλες οι αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας, όπως περιγράφηκαν στην Παρ. 3.2.4. Οι διατάξεις ελέγχου (Σχήμα 250), αν και διαφορετικές μεταξύ των Εργαστηρίων, θεωρήθηκαν ισοδύναμες. Ειδικότερα, όσο αφορά στην εργαστηριακή διάταξη ελέγχου του ΕΔΥ/ΠΚ χρησιμοποιήθηκε μηχανή ελέγχου αντοχής υλικών, αντί της διάταξης υδραυλικού γρύλου και αντλίας που χρησιμοποιήθηκε στο ΕΩΣ/ΕΜΠ. Για την καταγραφή της ολίσθησης, στο ΕΔΥ/ΠΚ χρησιμοποιήθηκαν δύο βελόμετρα, αντί των τριών που χρησιμοποιήθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ.

### 3.3.7.1. Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

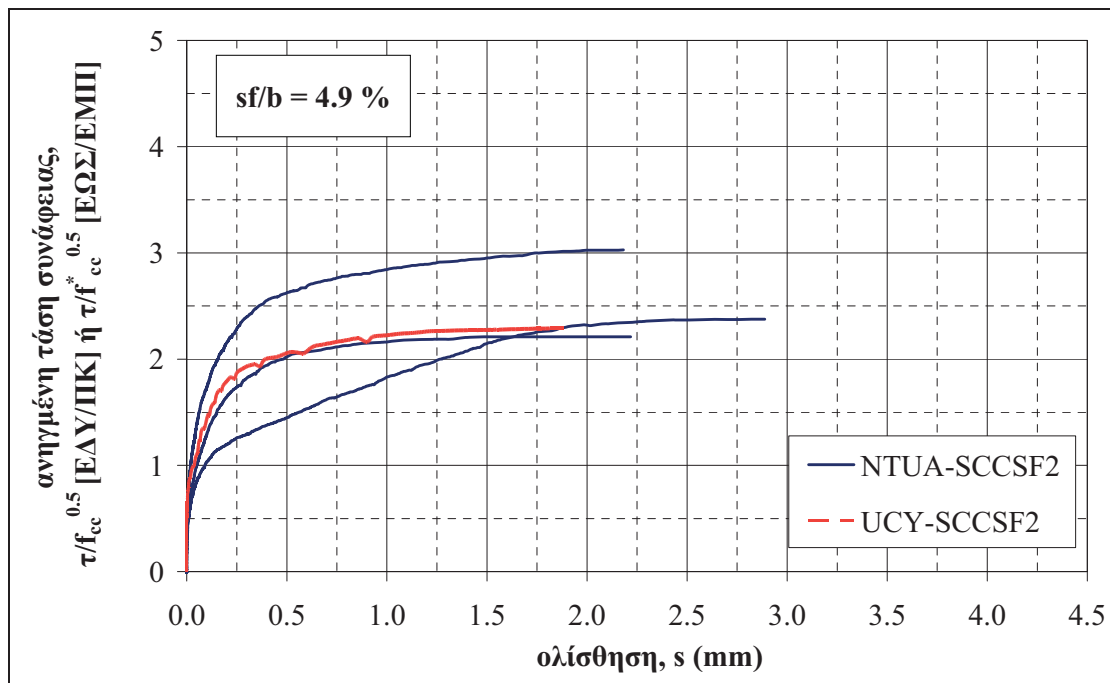
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 251 έως Σχήμα 254), παρουσιάζονται οι καμπύλες ανηγμένων τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων για τις δοκιμές εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν σε ράβδους κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , όπως παρασκευάστηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης της διεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ) και του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ).

Υπενθυμίζεται ότι οι μέσες θλιπτικές αντοχές, στις οποίες ανάγονται οι τάσεις συνάφειας μεταξύ των εργαστηρίων, έχουν προσδιοριστεί από κυβικά δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων. Συγκεκριμένα στο ΕΩΣ/ΕΜΠ χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, ενώ στο ΕΔΥ/ΠΚ χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm για. Για να καταστούν συγκρίσιμες, οι μέσες θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ έχουν τροποποιηθεί με έναν πολλαπλασιαστικό συντελεστή 1.18, ο οποίος προέκυψε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.3.2.1 του Κεφαλαίου 2.

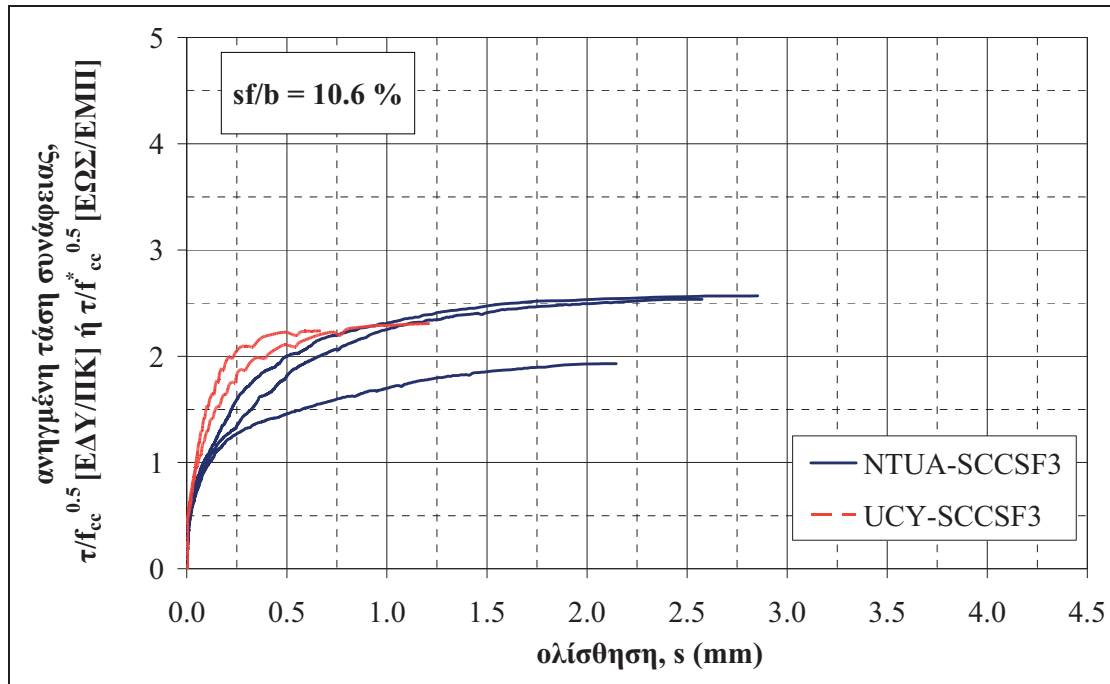
Από την αξιολόγηση των καμπυλών προκύπτει ότι για το μίγμα αναφοράς (SCCSF1) και για χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλης, οι καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων παρουσιάζουν παρεμφερή συμπεριφορά σε συνάφεια. Συγκεκριμένα, τόσο η αρχική δυσκαμψία όσο και η μέγιστη τάση συνάφειας είναι απολύτως συγκρίσιμες μεταξύ των δύο εργαστηρίων, αν και στην περίπτωση των δοκιμίων του ΕΔΥ/ΠΚ η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση είναι ελαφρώς μικρότερη. Για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης  $sf/b$  (έως 14.0 %) η δυσκαμψία των καμπυλών μειώνεται για την περίπτωση των δοκιμίων του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Όσο αφορά στην μέγιστη τάση συνάφειας, αυτή εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένη στα ίδια δοκίμια. Η αντίστοιχη ολίσθηση είναι επίσης αυξημένη. Σημειώνεται, τέλος, ότι ο τύπος αστοχίας ήταν σε κάθε περίπτωση από εξόλκευση των ράβδων.



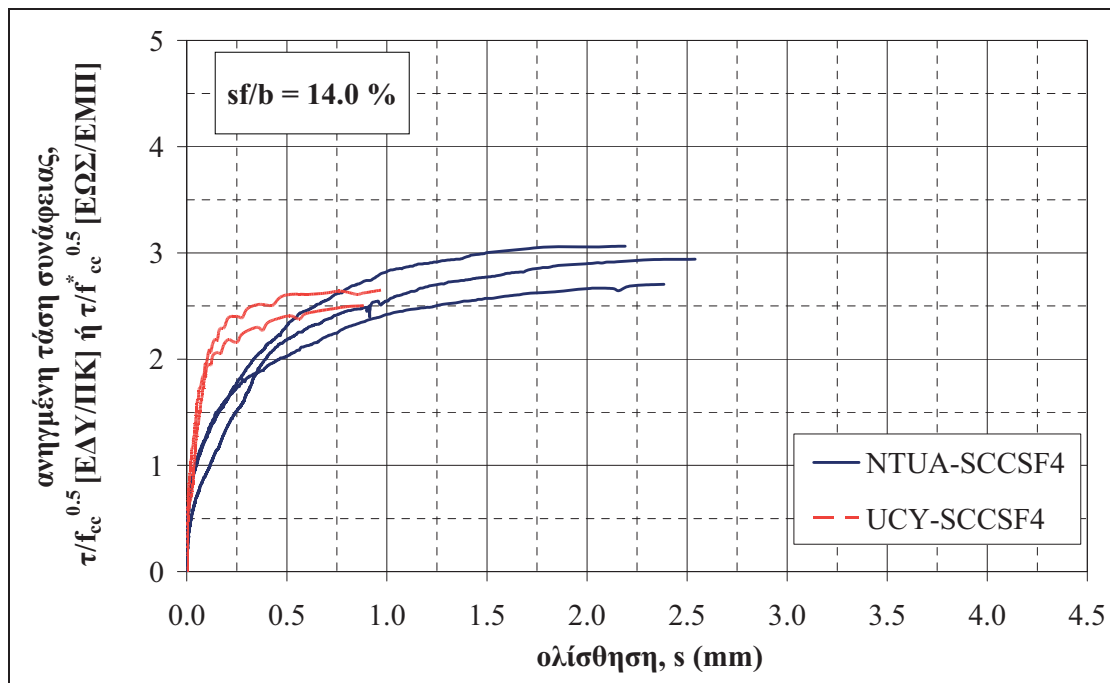
Σχήμα 251 Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων των συνθέσεων NTUA-SCCSF1 και UCY-SCCSF1



Σχήμα 252 Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων των συνθέσεων NTUA-SCCSF2 και UCY-SCCSF2



Σχήμα 253 Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων των συνθέσεων NTUA-SCCSF3 και UCY-SCCSF3



Σχήμα 254 Σύγκριση καμπυλών ανηγμένων τάσεων συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τις ράβδους των κυβικών δοκιμίων των συνθέσεων NTUA-SCCSF4 και UCY-SCCSF4

### 3.3.7.2. Χαρακτηριστικά συνάφειας (αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας – ολισθήσεις)

Ο Πίνακας 102 περιλαμβάνει τις τιμές των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας,  $\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$ ,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$  και  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ , αντίστοιχα, και την ολισθήση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας,  $s_{\tau_{max}}$ , για όλες τις ράβδους που ελέγχθηκαν στο πλαίσιο της διεργαστηριακής αναπαραγωγισιμότητας μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$ . Στον Πίνακα περιλαμβάνονται οι επιμέρους αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και οι ολισθήσεις  $s_{\tau_{max}}$  για κάθε δοκίμιο που ελέγχθηκε σε κάθε εργαστήριο (τρία δοκίμια στο ΕΩΣ/ΕΜΠ, δύο δοκίμια στο ΕΔΥ/ΠΚ), καθώς και μέσες τιμές τους,  $m$ , και οι συντελεστές διακύμανσης,  $cov$ .

Από τον Πίνακα παρατηρείται ότι οι συντελεστές διακύμανσης είναι, κατά κανόνα, ελαφρώς υψηλότεροι στην περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ, αν και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μεγαλύτερο πλήθος δοκιμίων. Οι μέσοι συντελεστές διακύμανσης (μέση τιμή ανά εργαστήριο) των τάσεων συνάφειας ανέρχονται σε περίπου 14 % για το ΕΩΣ/ΕΜΠ και 10 % για το ΕΔΥ/ΠΚ. Μεγαλύτεροι συντελεστές παρατηρούνται για το μίγμα NTUA-SCCSF2 και για την περίπτωση των ολισθήσεων.

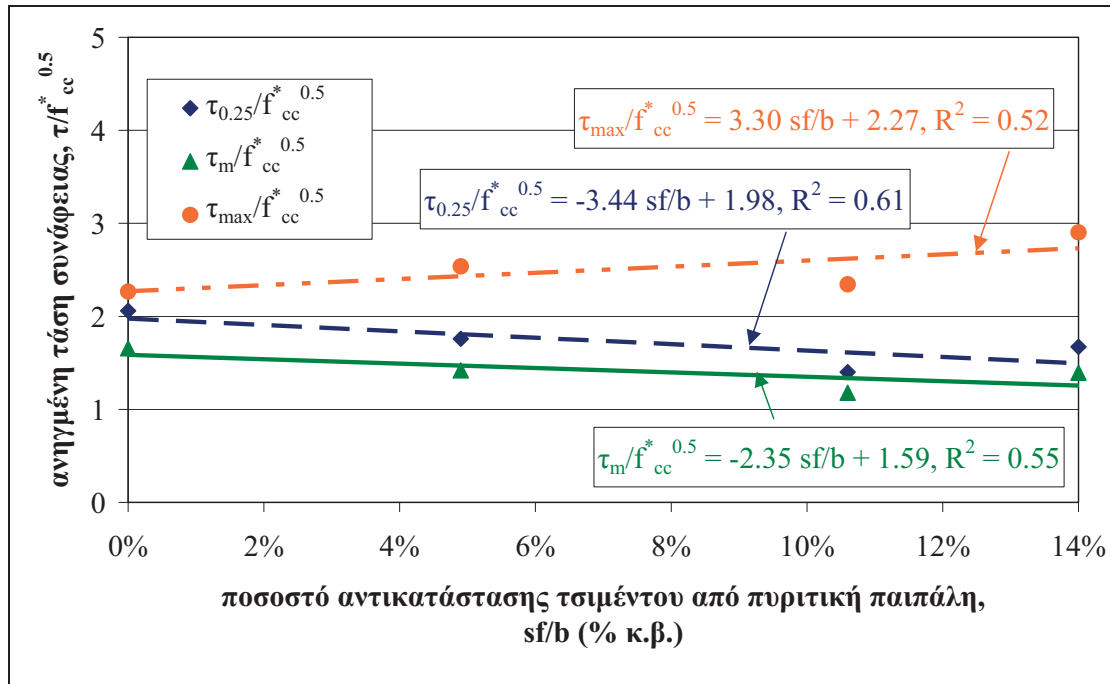
**Πίνακας 102** Αντιπροσωπευτικές ανηγμένες τάσεις συνάφειας και ολισθήσεις (επιμέρους τιμές δύο ή τριών δοκιμίων, 1 έως 3, αντίστοιχες μέσες τιμές,  $m$ , και συντελεστές διακύμανσης,  $cov$ ) μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  που παρασκευάστηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ (NTUA) και στο ΕΔΥ/ΠΚ (UCY)

εργαστήριο		NTUA- SCCSF1	NTUA- SCCSF2	NTUA- SCCSF3	NTUA- SCCSF4	UCY- SCCSF1	UCY- SCCSF2	UCY- SCCSF3	UCY- SCCSF4
$sf/b$		<b>0.0</b>	<b>4.9</b>	<b>10.6</b>	<b>14.0</b>	<b>0.0</b>	<b>4.9</b>	<b>10.6</b>	<b>14.0</b>
$\tau_{0.25}/f_{cc}^{0.5}$	1	2.09	1.26	1.27	1.77	2.17	1.87	2.03	2.16
	2	1.76	2.28	1.34	1.51	1.68	-	1.84	2.40
	3	2.33	1.74	1.59	1.73	-	-	-	-
	$m$	<b>2.06</b>	<b>1.76</b>	<b>1.40</b>	<b>1.67</b>	<b>1.93</b>	<b>1.87</b>	<b>1.94</b>	<b>2.28</b>
	$cov$	0.14	0.29	0.12	0.08	0.18	-	0.07	0.07
$\tau_m/f_{cc}^{0.5}$	1	1.69	1.12	1.01	1.58	1.76	1.47	1.40	1.64
	2	1.47	1.79	1.22	1.16	1.10	-	1.38	1.80
	3	1.81	1.34	1.30	1.44	-	-	-	-
	$m$	<b>1.66</b>	<b>1.42</b>	<b>1.18</b>	<b>1.39</b>	<b>1.43</b>	<b>1.47</b>	<b>1.39</b>	<b>1.72</b>
	$cov$	0.10	0.24	0.13	0.15	0.33	-	0.01	0.06
$\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$	1	2.30	2.38	1.93	3.06	2.43	2.29	2.24	2.49
	2	2.04	3.03	2.53	2.94	1.93	-	2.31	2.65
	3	2.46	2.21	2.57	2.70	-	-	-	-
	$m$	<b>2.27</b>	<b>2.54</b>	<b>2.35</b>	<b>2.90</b>	<b>2.18</b>	<b>2.29</b>	<b>2.27</b>	<b>2.57</b>
	$cov$	0.09	0.17	0.15	0.06	0.16	-	0.02	0.04
$s_{\tau_{max}}$ (mm)	1	1.3	2.8	2.1	2.2	0.9	1.9	0.7	0.9
	2	1.4	2.2	2.4	2.5	1.0	-	1.2	1.0
	3	0.9	1.5	2.9	2.4	-	-	-	-
	$m$	<b>1.2</b>	<b>2.2</b>	<b>2.4</b>	<b>2.4</b>	<b>1.0</b>	<b>1.9</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>
	$cov$	0.26	0.31	0.16	0.07	0.07	-	0.41	0.07

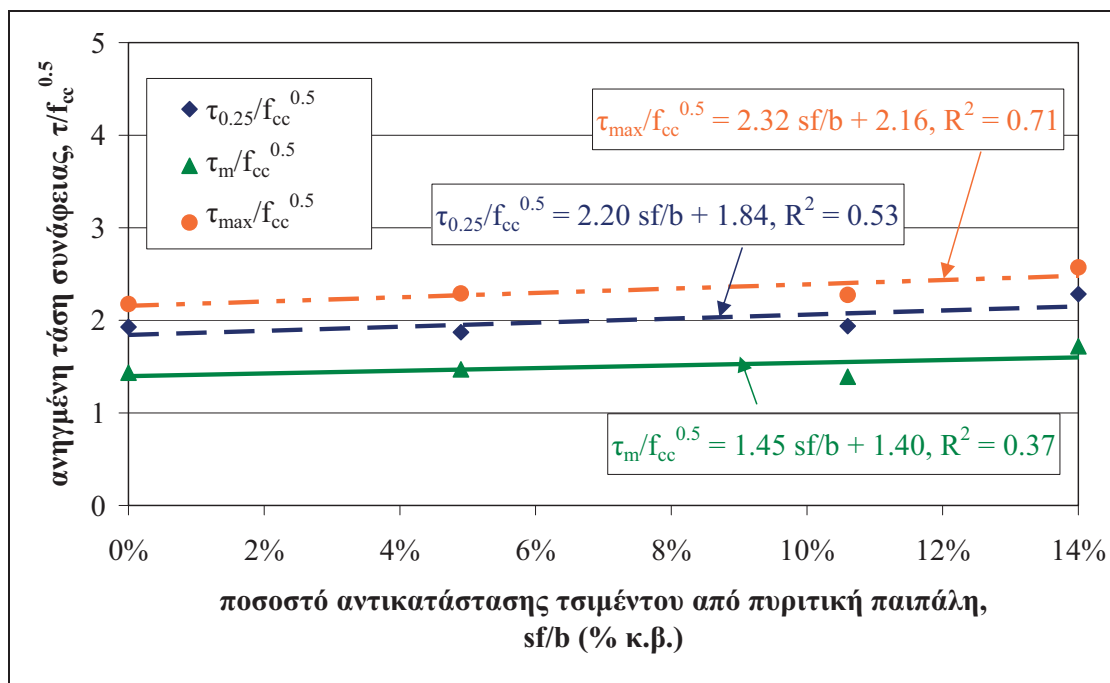
\*για την επίτευξη ισοδυναμίας μεταξύ των θλιπτικών αντοχών των δύο εργαστηρίων, η αντοχή των μιγμάτων του ΕΩΣ/ΕΜΠ έχει τροποποιηθεί μέσω πολλαπλασιαστικού συντελεστή 1.18 (βλ. Παρ. 2.3.2.1 του Κεφαλαίου 2)

### 3.3.7.3. Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

Στο Σχήμα 255 και το Σχήμα 256 παρουσιάζονται οι ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης  $sf/b$ , για το ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ, αντίστοιχα.



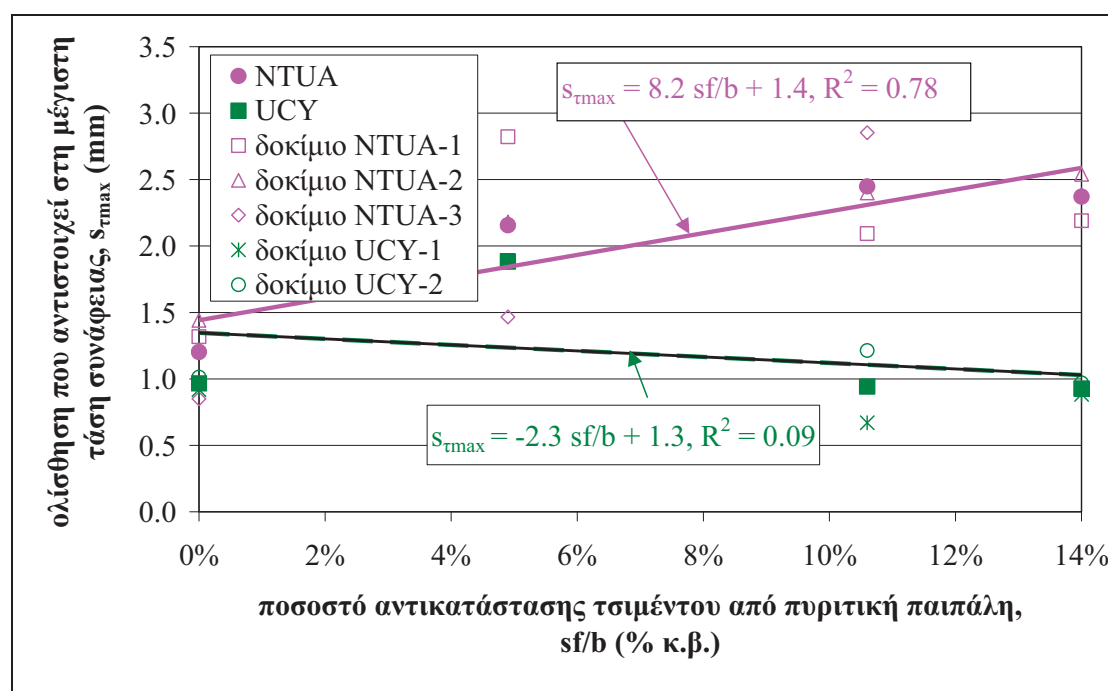
**Σχήμα 255** Ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας συναρτήσεσι του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη για τα δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου sf/b που παρασκευάστηκαν και ελέγχθησαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ



**Σχήμα 256** Ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας συναρτήσεσι του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη για τα δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου sf/b που παρασκευάστηκαν και ελέγχθησαν στο ΕΔΥ/ΠΚ

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων μεταξύ των δύο Εργαστηρίων παρατηρείται ότι η επιρροή του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη είναι διαφορετική για τις αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$ . Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $sf/b$  φαίνεται να μειώνει ελαφρώς τις ανηγμένες τιμές των εν λόγω αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας για την περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ, αλλά να οδηγεί στην ελαφρά αύξηση των αντίστοιχων ανηγμένων τάσεων συνάφειας για την περίπτωση του ΕΔΥ/ΠΚ. Πάντως, σημειώνεται ότι οι μεταβολές των τάσεων είναι σχετικά μικρές στο εξεταζόμενο εύρος των λόγων  $sf/b$  από 0.0 έως 14.0 %. Αντίθετα, η μέγιστη τάση συνάφειας ακολουθεί και για τα δύο εργαστήρια αυξητική τάση με την αύξηση του λόγου  $sf/b$ , αν και ελαφρώς εντονότερη για την περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι σχετικώς ικανοποιητικοί για την πλειοψηφία των περιπτώσεων.

Στο Σχήμα 257 παρουσιάζονται οι ολισθήσεις που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας, συγκριτικά μεταξύ των δύο εργαστηρίων, συναρτήσει του λόγου  $sf/b$ . Παρατηρείται ότι, ενώ για το ΕΩΣ/ΕΜΠ η αύξηση του λόγου  $sf/b$  οδηγεί σε σαφή αύξηση της ολίσθησης, τα αποτελέσματα είναι αρκετά ασαφή για την περίπτωση του ΕΔΥ/ΠΚ.

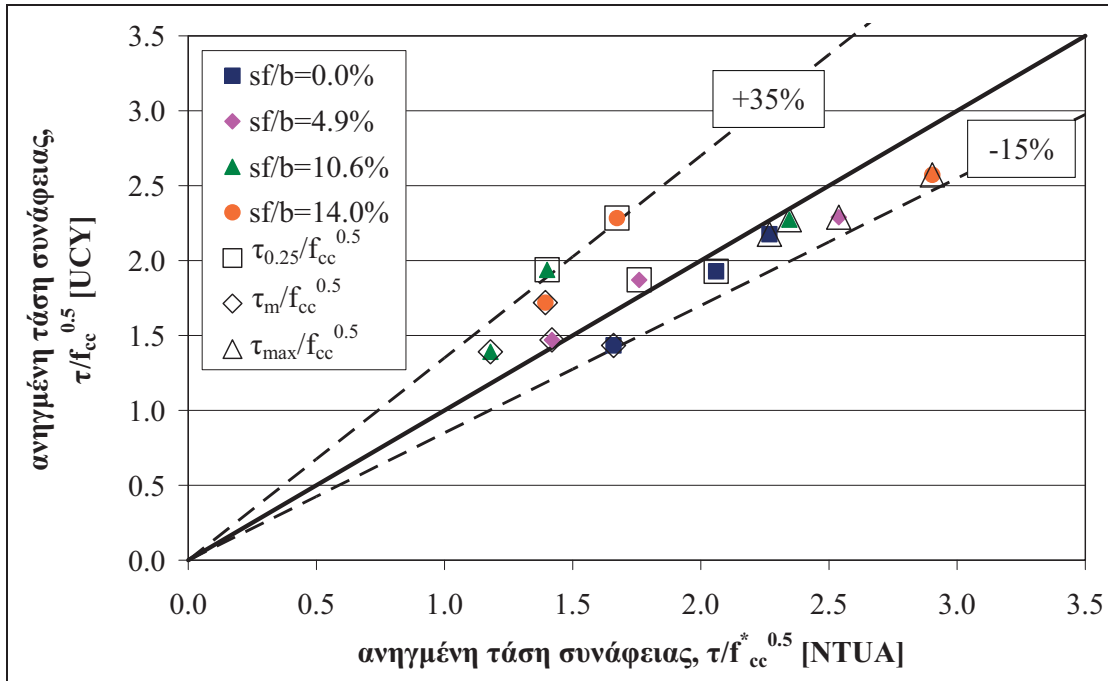


Σχήμα 257 Σύγκριση επιρροής λόγου  $sf/b$  στην ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας μεταξύ των δοκιμών που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ

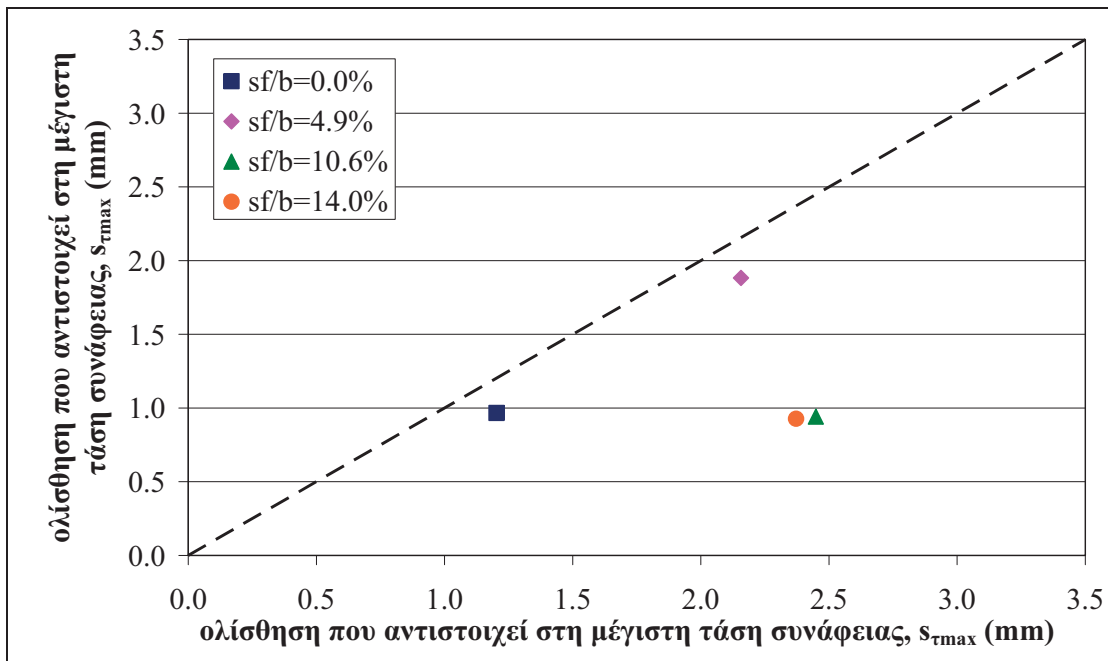
#### 3.3.7.4. Συγκριτική αξιολόγηση χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ εργαστηρίων

Στα Σχήματα που ακολουθούν, πραγματοποιείται σύγκριση των ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας και της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση συνάφειας μεταξύ των δύο εργαστηρίων. Η ιδανική πλήρης σύμπτωση των σημείων με τη διαγώνιο συνεπάγεται ταύτιση των αντίστοιχων χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ των εργαστηρίων.





Σχήμα 258 Σύγκριση ανηγμένων αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας μεταξύ δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ



Σχήμα 259 Σύγκριση ολισθήσεων που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση συνάφειας μεταξύ δοκιμίων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν στο ΕΩΣ/ΕΜΠ και το ΕΔΥ/ΠΚ

Όσο αφορά στις ανηγμένες τάσεις συνάφειας (Σχήμα 258), παρατηρείται μία διακύμανσή τους σε εύρος από - 15 % έως + 35 % από την διαγώνιο, η οποία πάντως περιορίζεται σε  $\pm 15$  % για την πλειοψηφία των τιμών. Εξετάζοντας ξεχωριστά τα μίγματα, ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό πυριτικής παιπάλης, παρατηρείται ότι για το μίγμα αναφοράς (0.0 %) και για χαμηλό λόγο  $sf/b$  (4.9 %), οι ανηγμένες τιμές των τάσεων συνάφειας είναι πρακτικώς ίδιες μεταξύ των εργαστηρίων. Αντίθετα, για υψηλότερους λόγους  $sf/b$  (10.6 %, 14.0 %) και για τις ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  παρατηρείται μία υπεροχή των ανηγμένων τάσεων συνάφειας για

το ΕΔΥ/ΠΚ, η οποία περιορίζεται και αντιστρέφεται για την ανηγμένη αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_{\max}$ . Εξετάζοντας την κάθε αντιπροσωπευτική τάση συνάφειας ξεχωριστά, ανεξαρτήτως της περιεκτικότητας πυριτικής παιπάλης, παρατηρείται ότι η μόνη τάση που συσχετίζεται γραμμικά μεταξύ των δύο εργαστηρίων είναι η ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας, ενώ οι άλλες δύο τάσεις δεν παρουσιάζουν κάποια σαφή συσχέτιση. Όσο αφορά στις εξεταζόμενες ολισθήσεις (**Σχήμα 259**), παρατηρείται ότι, όπως και προηγουμένως, για χαμηλή περιεκτικότητα πυριτικής παιπάλης (0.0 ή 4.9 %), η  $s_{\max}$  είναι πρακτικώς ίδια μεταξύ των εργαστηρίων, με μία ελαφρά υπεροχή για τα δοκίμια του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Αντίθετα, για υψηλότερους λόγους  $sf/b$  (10.6 ή 14.0 %) παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των ολισθήσεων που μετρήθηκαν σε κάθε εργαστήριο. Συγκεκριμένα, οι ολισθήσεις στο ΕΩΣ/ΕΜΠ εμφανίζονται υπερδιπλάσιες των αντίστοιχων ολισθήσεων που μετρήθηκαν στο ΕΔΥ/ΠΚ.

# 4

---

## Θέματα Ανθεκτικότητας

### Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης ΑΣΣ σε θέματα ανθεκτικότητας σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή σε μεγέθη που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος: (α) του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ (β) του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, μέσω του λόγου πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ, (γ) του ποσοστού αντικατάστασης (γ<sub>1</sub>) τσιμέντου ή (γ<sub>2</sub>) ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη, μέσω των λόγων μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ , και μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk+lp\}$ , αντίστοιχα, σε μίγματα ΑΣΣ και (δ) της περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή, μέσω του λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε τυπικά μίγματα ΣΣ.

Ειδικότερα, τα θέματα ανθεκτικότητας που εξετάζονται αφορούν στην εκτίμηση: (α) της διαπερατότητας σε νερό μέσω του υπολογισμού (i) του ανοιχτού πορώδους, (ii) της απορροφητικότητας και (iii) της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση και (β) της διαπερατότητας σε χλωριόντα μέσω του υπολογισμού (i) του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, (ii) της ειδικής αντίστασης του σκυροδέματος και (iii) του ηλεκτρικού φορτίου. Μέρος των αποτελεσμάτων συγκρίνεται διεργαστηριακά, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αναπαραγωγιμότητα παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, με κριτήριο την ανθεκτικότητα.

Όσο αφορά στη δομή του Κεφαλαίου, μετά από μία σύντομη εισαγωγή, περιγράφονται, ανά μέγεθος ανθεκτικότητας, οι πειραματικές διατάξεις και η μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων και αξιολογούνται τα πειραματικά αποτελέσματα.

## 4.1. Εισαγωγή

### 4.1.1. Σκοπός κεφαλαίου

Παρά την αδιαμφισβήτητη σπουδαιότητα της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, η σχετική βιβλιογραφία για το ΑΣΣ είναι πιο περιορισμένη, εν σχέσει προς τη βιβλιογραφία που αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά και, κυρίως, στη ρεολογία. Ιδιαίτερα για το θέμα της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στην ανθεκτικότητα ΑΣΣ η προγενέστερη βιβλιογραφία είναι ελλιπώς τεκμηριωμένη.

Είναι προφανές ότι τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της σύνθεσης του ΑΣΣ, αλλά και η απουσία ανάγκης για δόνηση, μπορούν να επιφέρουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες ανθεκτικότητας, εν σχέσει προς το ΣΣ. Οι διαφορές στη σύνθεση συνοψίζονται στην προσθήκη συμπληρωματικών συστατικών (πρόσμικτα τύπου Ι ή/και ΙΙ, χημικά πρόσθετα) και στις αναλογίες όλων των συστατικών στο μίγμα. Η βελτίωση της μικροδομής του πορώδους, μέσω της πιο ομοιογενούς και πυκνής μεταβατικής ζώνης (interface transition zone, ITZ) του ΑΣΣ που επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης των παραπάνω πρόσθετων υλικών και της συνεπακόλουθης καλύτερης διαβάθμισης αδρανών [Nunes et al. (2009)], σε συνδυασμό με τη δράση του υπερρυστοποιητή, θεωρούνται βασικές παράμετροι που θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του ΑΣΣ έναντι μεταφοράς ρευστών ουσιών [RILEM Report 38 (2007), RILEM TC 205-DSC (2008)]. Από την άλλη πλευρά, η απουσία δόνησης μπορεί να θέσει υπό αμφισβήτηση την ομοιογένεια του σκυροδέματος, αλλά και τον πιθανό εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλου δικτύου πόρων και μεγάλων διασπορών.

Το παρόν κεφάλαιο έρχεται να συμπληρώσει τα διαθέσιμα πειραματικά ευρήματα με νέα πειραματικά αποτελέσματα και στοιχεία επί θεμάτων επιρροής συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της σύνθεσης στην ανθεκτικότητα ΑΣΣ, αλλά και σύγκρισης με τυπικά μίγματα ΣΣ.

Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία στοχεύει στη διερεύνηση της επιρροής στην ανθεκτικότητα ΑΣΣ (α) του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ (β) του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, μέσω του λόγου πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ, (γ) του ποσοστού αντικατάστασης ( $\gamma_1$ ) τσιμέντου ή ( $\gamma_2$ ) ασβεστολιθικού από μετακαολίνη, μέσω των λόγων μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ , ή μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk+lp\}$ , αντίστοιχα, σε μίγματα ΑΣΣ και (δ) της περιεκτικότητας σε υπερρυστοποιητή, μέσω του λόγου υπερρυστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε τυπικά μίγματα ΣΣ. Τα θέματα ανθεκτικότητας που διερευνώνται περιλαμβάνουν:

(α) τη διαπερατότητα σε νερό μέσω δοκιμών που αφορούν

- i) στο ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%),
- ii) στην απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ),
- iii) στην υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη πίεση, μέσω προσδιορισμού δύο νέων μεγεθών, του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$

και του εκθετικού συντελεστή διαπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), αλλά και υπό σταθερή πίεση, μέσω του προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης νερού,  $d$  (mm).

(β) τη διαπερατότητα σε χλωριόντα μέσω δοκιμών που αφορούν

- i) στο συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), μέσω επιταχυνόμενων πειραμάτων μεταφοράς χλωριόντων σε συνθήκες μη σταθερής κατάστασης,
- ii) στην ειδική αντίσταση του σκυροδέματος,  $\rho$  (kΩ-cm).
- iii) στο ηλεκτρικό φορτίο,  $Q$  (C), μέσω επιταχυνόμενων πειραμάτων μεταφοράς χλωριόντων σε συνθήκες μη σταθερής κατάστασης.

Τέλος, μέρος των παραπάνω αποτελεσμάτων για συγκεκριμένα μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  ή μεταβλητού λόγου  $sf/b$  συγκρίνεται διεργαστηριακά, μεταξύ του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ) και του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ), έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αναπαραγωγιμότητα παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ, με κριτήριο την ανθεκτικότητα, μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τα οποία συμμορφώνονται στα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα.

#### 4.1.2. Συνοπτική περιγραφή δοκιμών & διερευνηθέντα μίγματα

Ο Πίνακας 103 συνοψίζει το είδος και το πλήθος των δοκιμών που αφορούν στις ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος, οι οποίες διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, ενώ στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται η αναλυτική περιγραφή τους και αξιολογούνται τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Πίνακας 103 Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών ιδιοτήτων ανθεκτικότητας

περιγραφή δοκιμής	πρότυπη μέθοδος	μετρούμενο μέγεθος	πλήθος δοκιμών			
			ΑΣΣ	ΣΣ	Συν.*	
υδατο-περατότητα	ανοιχτό	ASTM	26	8	34	(45)
	πορώδες	C 642 (1997)				
	απορροφητικότητα	RILEM TC 116-PCD (1999)	44	16	60	(143)
	υπό μεταβαλλόμενη πίεση	GWT-4000 (1999)	$\ln T_{atm}$ ( $T_{atm}$ σε s)	31	12	43
διαπερατότητα σε χλωριόντα	υπό σταθερή πίεση	DIN 1048-5 (1991) EN 12390-8 (2009)	9	2	11	(11)
	επιταχυνόμενη άμεση μέθοδος	NordTest Build 492 (1999)	46	18	64	(152)
	επιταχυνόμενη έμμεση μέθοδος**	ASTM C 1202 (2009)	6	2	8	(8)

\*σε παρένθεση αναφέρεται το πλήθος των δοκιμών (παραπάνω από μία σε ορισμένες συνθέσεις)

\*\*σε συνεργασία με το Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ)

## 4.2. Περιγραφή πειραματικών δοκιμών και σχολιασμός αποτελεσμάτων<sup>1</sup>

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν περιλαμβάνεται μία σύντομη περιγραφή κάθε ξεχωριστής δοκιμής που πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα πειραματικά αποτελέσματα. Δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις δοκιμές ανθεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής εφαρμόζονται ως πρότυπες δοκιμές και στο Συμβατικό Σκυρόδεμα, δε θα πραγματοποιηθεί, κατά κανόνα, εις βάθος ανάλυσή τους, παρά μόνο όπου κρίνεται απαραίτητο, λόγω τυχόν διαφοροποιήσεων στη μεθοδολογία εφαρμογής τους. Εξαιρέση αποτελεί η μέθοδος προσδιορισμού της υδατοπερατότητας μέσω δοκιμών υπό μεταβαλλόμενη πίεση (με χρήση της εμπορικά διαθέσιμης διάταξης GWT-4000), η οποία δεν είναι πρότυπη και αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της Διατριβής.

Η διαπερατότητα σε νερό (ανοιχτό πορώδες, απορροφητικότητα, υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση) και η διαπερατότητα σε χλωριόντα (συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων, ειδική αντίσταση, ηλεκτρικό φορτίο) παρουσιάζονται στα αντίστοιχα υποκεφάλαια 4.2.1 και 4.2.2. Τα αποτελέσματα των διάφορων δοκιμών παρουσιάζονται για κάθε μετρούμενη ιδιότητα ξεχωριστά. Αρχικά, παρουσιάζονται υπό μορφή ραβδογραμμάτων όλα τα επιμέρους αποτελέσματα που αφορούν στην κάθε ιδιότητα, ώστε να πραγματοποιηθεί ένας μακροσκοπικός σχολιασμός τους, ανεξαρτήτως της σύνθεσής τους (μιας και οι συνθέσεις δεν είναι, στο σύνολό τους, συγκρίσιμες). Στη συνέχεια, μελετώνται ξεχωριστά τα επιμέρους αποτελέσματα που αφορούν στις διάφορες υπο-ομάδες συνθέσεων, σύμφωνα με τους Πίνακες 37 έως 46 της Παραγράφου 2.2.2.3 του Κεφαλαίου 2, ώστε να σχολιαστεί η επιρροή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της σύνθεσης στη μετρούμενη, κάθε φορά, ιδιότητα.

### 4.2.1. Διαπερατότητα σε νερό

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την εκτίμηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε νερό εφαρμόστηκαν, κατά περίπτωση, τέσσερις διαφορετικές δοκιμές, ο τρόπος εκτέλεσης των οποίων, καθώς και η μεθοδολογία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων τους, περιγράφονται αναλυτικά στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

<sup>1</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

- στα πρακτικά του 7<sup>ου</sup> Συνεδρίου για το ΑΣΣ (SCC2013): 7<sup>th</sup> RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 2-4 Σεπτεμβρίου 2013, Παρίσι, Γαλλία [Sfikas et al. (2013a)]
- στα πρακτικά του 5<sup>ου</sup> Συνεδρίου για το ΑΣΣ (SCC2013): 5<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, 12-15 Μαΐου 2013, Σικάγο, Ιλλινόις, ΗΠΑ [Trezos et al. (2013)]
- στα πρακτικά του Συμποσίου fib: Concrete Structures for Sustainable Community, Royal Institute of Technology (KTH), 11-14 Ιουνίου 2012, Στοκχόλμη, Σουηδία [Sfikas et al. (2012)]
- στα πρακτικά του 3<sup>ου</sup> Διεθνούς Συμποσίου fib: Think Globally, Build locally. 29 Μαΐου – 2 Ιουνίου 2010, Ουάσιγκτον, Κολούμπια, ΗΠΑ [Trezos et al. (2010)]
- στο επιστημονικό περιοδικό Construction & Building Materials [Sfikas et al. (2013b)]

Επιπλέον, αντλήθηκαν στοιχεία και αποτελέσματα από τις ακόλουθες διπλωματικές / μεταπτυχιακές εργασίες, όπου ο γράφων συμμετείχε στις πειραματικές διεργασίες και αναλύσεις: Μπαγλατζή (2010), Παύλου (2010), Μακρής και Σμαργιανάκη (2012), Βούκια (2013).

- Προσδιορισμός ανοιχτού πορώδους (open porosity),  $p$  (%), σύμφωνα με τη πρότυπη αμερικάνικη μέθοδο [ASTM C 642 \(1997\)](#) (Παρ. 4.2.1.1)
- Προσδιορισμός τριχοειδούς απορρόφησης (capillary suction ή capillary absorption), με σκοπό την εκτίμηση της απορροφητικότητας (sorptivity) μέσω τριχοειδών πόρων,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), σύμφωνα με την οδηγία [RILEM TC 116 PCD \(1999\)](#) (Παρ. 4.2.1.2)
- Προσδιορισμός υδατοπερατότητας ή υδαταπορροφητικότητας (water permeability) μέσω ανάπτυξης νέας μεθόδου εκτίμησης της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε νερό υπό μεταβαλλόμενη πίεση, η οποία συνίσταται στην εφαρμογή αρχικής πίεσης ύδατος με χρήση κατάλληλης εμπορικής πειραματικής διάταξης [[GWT-4000 \(1999\)](#)] και την καταγραφή της πτώσης της πίεσης συναρτήσει του χρόνου και τον υπολογισμό μη πρότυπων δεικτών υδατοπερατότητας: του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ) (Παρ. 4.2.1.3).
- Προσδιορισμός υδατοπερατότητας ή υδαταπορροφητικότητας (water permeability) μέσω της πρότυπης μεθόδου [EN 12390-8 \(2009\)](#), η οποία βασίζεται στο παλαιότερο γερμανικό πρότυπο [DIN 1048-5 \(1991\)](#), μέσω του προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης νερού,  $d$  (mm) (Παρ. 4.2.1.4). Σημειώνεται ότι η απαιτούμενη διάταξη δεν ήταν εργαστηριακώς διαθέσιμη και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μόνο σε περιορισμένο πλήθος δοκιμών, σε συνεργασία με το Εργαστήριο των Τσιμέντων Τιτάν.

Η δυνατότητα αναπαραγωγής παρεμφερών μιγμάτων (αναπαραγωγισιμότητα) μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, με κριτήριο την διαπερατότητα σε νερό, εκτιμήθηκε μέσω δοκιμών για το ανοιχτό πορώδες και την απορροφητικότητα.

#### 4.2.1.1. Ανοιχτό πορώδες

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

Το ανοιχτό πορώδες (open porosity),  $p$  (%), του σκυροδέματος ελέγχθηκε σε πρότυπο κυβικό δοκίμιο, ακμής 100 mm, σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο [ASTM C 642 \(1997\)](#). Κατά την ηλικία ελέγχου και κατόπιν της επιθυμητής περιόδου (28 και 360 ημερών) και μεθόδου συντήρησης αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού, το δοκίμιο ζυγίστηκε με δύο τρόπους: (i) σε νερό υπό άνωση (μάζα υπό άνωση,  $M_{imm}$ ) (**Σχήμα 260α**) και (ii) σε αέρα (μάζα κορεσμένου δοκιμίου,  $M_{sat}$ ) (**Σχήμα 260β**). Αν και στο πλαίσιο των δοκιμών του ανοιχτού πορώδους όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού, αξίζει να σημειωθεί ότι, εάν η συντήρηση δεν πραγματοποιείται σε δεξαμενή νερού, το δοκίμιο πρέπει, πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής, να παραμείνει εμβαπτισμένο σε νερό για κατάλληλο χρονικό διάστημα, ώστε να έρθει σε κατάσταση πλήρους κορεσμού.



**Σχήμα 260** Υπολογισμός ανοιχτού πορώδους σε πρότυπα κυβικά δοκίμια ( $100 \times 100 \times 100$  mm) μέσω προσδιορισμού μαζών (α) σε νερό υπό άνοση και (β) σε αέρα [πηγή: Βούκια (2013)]

Στη συνέχεια, το δοκίμιο ξηράνθηκε σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του, η οποία επιτυγχάνεται συμβατικώς όταν η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου σε δύο διαδοχικές ημερήσιες μετρήσεις υπολογίζεται μικρότερη από  $0.1 \%$ . Η διάρκεια ξήρανσης στο ΑΣΣ, λόγω της εν γένει πυκνότερης δομής εν σχέσει προς το ΣΣ, είναι ελαφρώς μεγαλύτερη και μπορεί, συνήθως, να ανέλθει έως και τις 7 έως 10 ημέρες. Μετά την ξήρανσή του, το δοκίμιο ζυγίστηκε ξανά σε αέρα (μάζα ξηρού δοκιμίου,  $M_{\text{dry}}$ ). Από τον συνδυασμό των τριών μαζών προέκυψε η τιμή του ανοιχτού πορώδους, σύμφωνα με τις **Εξισώσεις (4.1) έως (4.4)**, όπου  $\rho_w$  το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία ( $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), το οποίο για τους υπολογισμούς ελήφθη ίσο με  $998.59 \text{ kg/m}^3$ .

$$\text{Όγκος ανοιχτών πόρων} \quad (M_{\text{sat}} - M_{\text{dry}}) / \rho_w \quad (4.1)$$

$$\text{Φαινόμενος όγκος} \quad (M_{\text{sat}} - M_{\text{imm}}) / \rho_w \quad (4.2)$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα} \quad \rho_w M_{\text{dry}} / (M_{\text{sat}} - M_{\text{imm}}) \quad (4.3)$$

$$\text{Ανοιχτό πορώδες} \quad 100 * (M_{\text{sat}} - M_{\text{dry}}) / (M_{\text{sat}} - M_{\text{imm}}) \quad (4.4)$$

### Γενική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο **Πίνακας 104** περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των συνθέσεων που ελέγχθηκαν ως προς το ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 45 μετρήσεις σε 34 συνθέσεις (26 συνθέσεις ΑΣΣ και 8 συνθέσεις ΣΣ). Η συντήρηση όλων των δοκιμίων είχε πραγματοποιηθεί σε δεξαμενή νερού ( $\Delta\text{N}$ ) μέχρι τον έλεγχό τους, ενώ οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν, κατά κανόνα, σε ηλικία 28 ημερών. Σε μέρος των συνθέσεων πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές δοκιμές σε ηλικία 360 ημερών.

Στο **Σχήμα 261** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τις συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ, σε ηλικία 28 ή/ και 360 ημερών. Από τη μακροσκοπική αποτίμηση των αποτελεσμάτων δεν παρατηρείται κάποια σαφής διαφορά μεταξύ των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ. Τονίζεται, πάντως, ότι η ομοιότητα μεταξύ των τιμών ανοιχτού πορώδους στα διάφορα μίγματα ΣΣ αποδίδεται στις αρκετά παρεμφερείς συνθέσεις μεταξύ των μιγμάτων που ελέγχθηκαν. Αντίθετα,

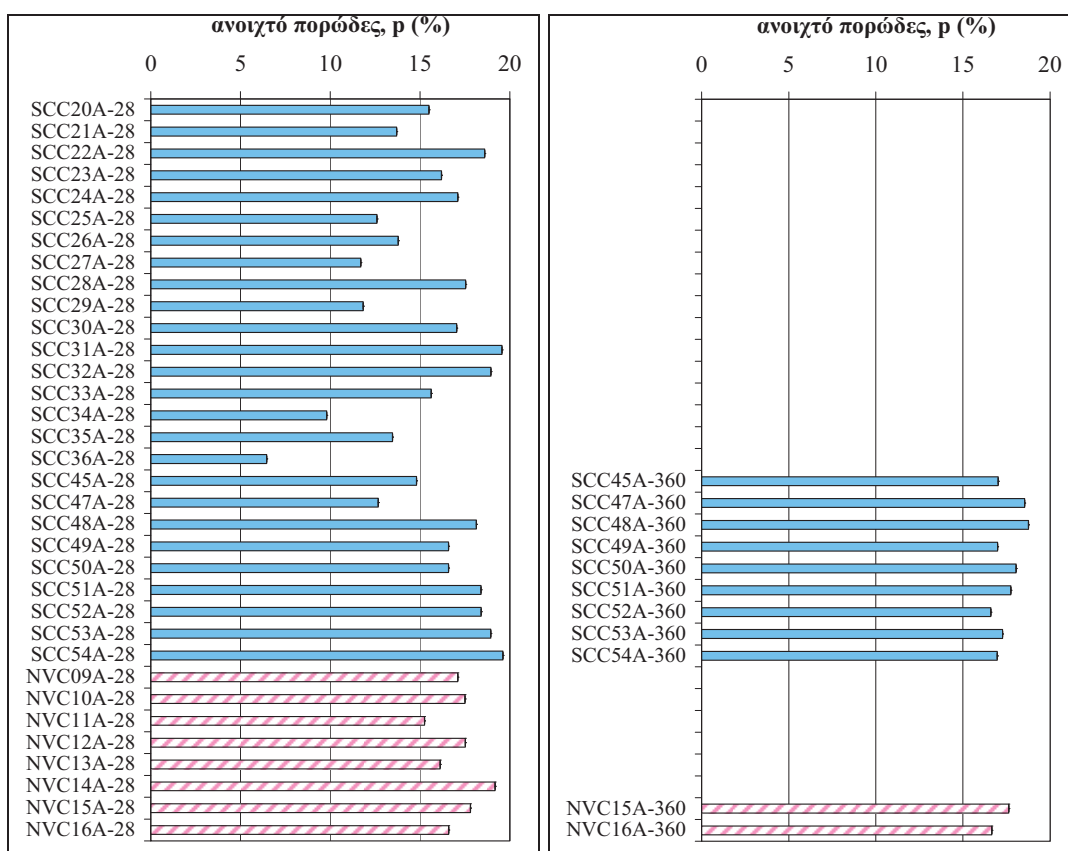


η σημαντική μεταβλητότητα των τιμών ανοιχτού πορώδους στο ΑΣΣ οφείλεται στις σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά των συνθέσεων των ελεγχθέντων μιγμάτων.

**Πίνακας 104** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς το ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%)

Τύπος Σκυροδέματος Συντήρηση	Μίγματα ΑΣΣ					Μίγματα ΣΣ	
	ΔΝ						
Κωδικοί Συνθέσεων	SCC20(1)	SCC25(1)	SCC30(1)	SCC35(1)	SCC49(2)	NVC09(1)	NVC14(1)
	SCC21(1)	SCC26(1)	SCC31(1)	SCC36(1)	SCC50(2)	NVC10(1)	NVC15(2)
	SCC22(1)	SCC27(1)	SCC32(1)	SCC45(2)	SCC51(2)	NVC11(1)	NVC16(2)
	SCC23(1)	SCC28(1)	SCC33(1)	SCC47(2)	SCC52(2)	NVC12(1)	
	SCC24(1)	SCC29(1)	SCC34(1)	SCC48(2)	SCC53(2)	NVC13(1)	
				SCC54(2)			
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	26 Συνθ. (35 μετρ.)					8 Συνθ. (10 μετρ.)	<b>34 Συνθ. (45 μετρ.)</b>

\*σε παρένθεση αναγράφεται το πλήθος των ελεγχόμενων ηλικιών (28 ή/ και 360 ημέρες)



**Σχήμα 261** Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμίων όλων των συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών

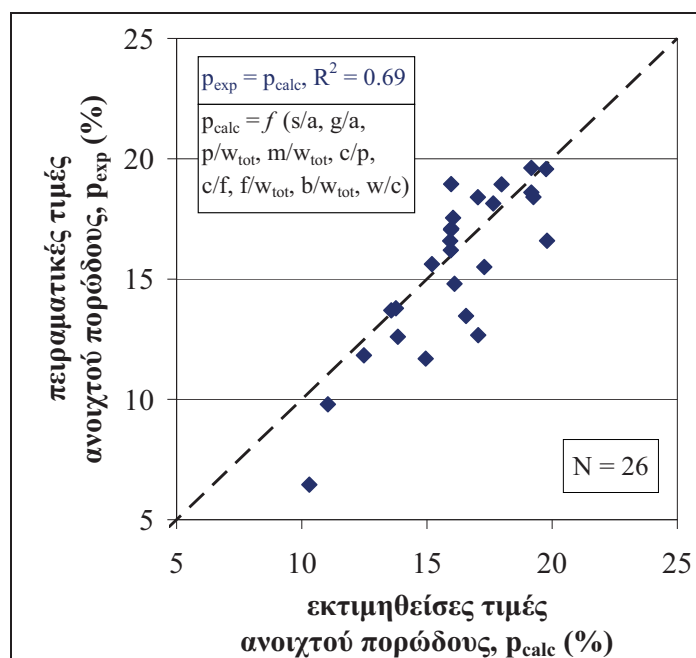
### Συσχέτιση με χαρακτηριστικά σύνθεσης

Το ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), σε ηλικία 28 ημερών συσχετίστηκε μακροσκοπικά με διάφορα χαρακτηριστικά των συνθέσεων και, συγκεκριμένα, με: **(i)** τον λόγο άμμου προς τα συνολικά αδρανή,  $s/a$ , **(ii)** τον λόγο χονδρόκοκκων αδρανών προς τα συνολικά αδρανή,  $g/a$ , **(iii)** τον λόγο πάστας προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $p/w_{tot}$ , **(iv)** τον λόγο κονιάματος προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $m/w_{tot}$ , **(v)** τον λόγο τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$ , **(vi)** τον λόγο τσιμέντου προς λεπτόκοκκα,  $c/f$ , **(vii)** τον λόγο λεπτόκοκκων προς το συνολικό βάρος,  $f/w_{tot}$ , **(viii)** τον λόγο συνδετικού

υλικού προς το συνολικό βάρος,  $b/w_{tot}$ , ( $\mathbf{x}$ ) τον λόγο νερού προς τσιμέντο,  $w/c$ , και ( $\mathbf{x}$ ) τη μέση θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  ( $N/mm^2$ ). Δεν παρατηρήθηκε κάποια αξιολογή συσχέτιση μεταξύ του ανοιχτού πορώδους και των παραπάνω μεγεθών ξεχωριστά, στο σύνολο των μιγμάτων. Στη συνέχεια, θα αναζητηθεί μία γραμμική εξίσωση της μορφής της **Εξίσωσης (4.5)** που να συνδέει το ανοιχτό πορώδες με όλες τις παραπάνω μεταβλητές, πλην της αντοχής.

$$p_{calc} = \alpha_1 (s/a) + \alpha_2 (g/a) + \alpha_3 (p/w_{tot}) + \alpha_4 (m/w_{tot}) + \alpha_5 (c/p) + \alpha_6 (c/f) + \alpha_7 (f/w_{tot}) + \alpha_8 (b/w_{tot}) + \alpha_9 (w/c) + \alpha_{10} \quad (4.5)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha_i$  ( $i = 1$  έως 10) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\alpha_i$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για το ανοιχτό πορώδες 28 ημερών (πλήθος  $N = 26$ ),  $p_{exp}$  (%). Τα αποτελέσματα των γραμμικών αναλύσεων φαίνονται στο **Σχήμα 262**, ενώ ο **Πίνακας 105** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\alpha_i$ .



**Σχήμα 262** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ανοιχτού πορώδους,  $p_{calc}$  (%), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $p_{exp}$  (%)

**Πίνακας 105** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ανοιχτού πορώδους,  $p_{calc}$  (%), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_i$	-498.12	-308.78	-143.33	-167.85	-78.73	136.53	60.07	490.78	58.58	411.65

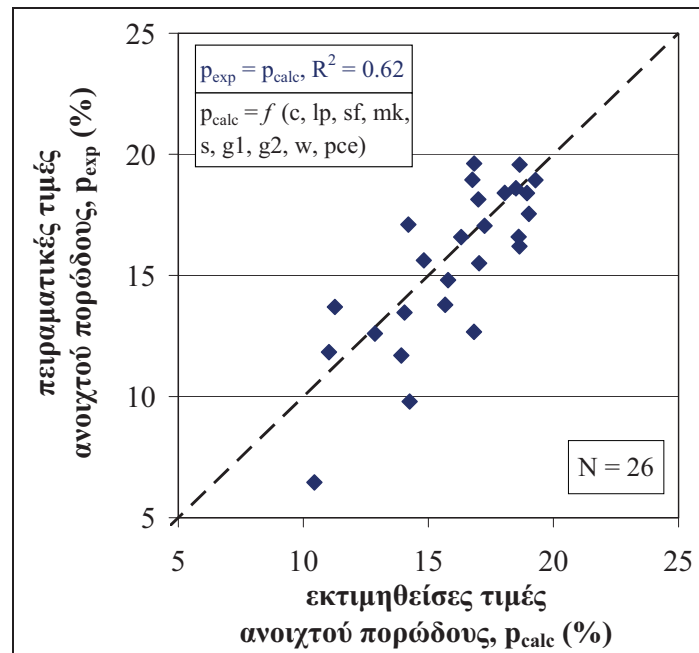
Εν γένει, το φυσικό νόημα του θετικού ή αρνητικού προσήμου σχετίζεται με την θετική ή αρνητική επιρροή, αντίστοιχα, του λόγου συστατικών (ή, όπως θα δούμε στη συνέχεια, της απόλυτης τιμής της περιεκτικότητας του συστατικού στο μίγμα) στο υπό εξέταση μέγεθος ανθεκτικότητας. Σημειώνεται ότι τα εύρη των ανεξάρτητων μεταβλητών (λόγοι συστατικών ή περιεκτικότητες) δεν ήταν πάντοτε επαρκώς μεγάλα, με αποτέλεσμα κάποιοι εκ των συντελεστών να πολλαπλασιάζουν ενίοτε μια πρακτικώς σταθερή τιμή και το πρόσημο να μην έχει κάποιο ουσιαστικό φυσικό νόημα. Επιπλέον, ειδικά στην περίπτωση των λόγων συστατικών, σημειώνεται ότι η τάση επιρροής κάθε λόγου, συνεπηρεάζεται και από τους άλλους λόγους, λόγω της

αλληλεμπλοκής τους, γεγονός που επηρεάζει το τελικό πρόσημο (η συσχέτιση με κάθε λόγο ξεχωριστά μπορεί ενίοτε να οδηγήσει σε αντίθετη τάση επιρροής). Η επιλογή της γενικής λύσης επιλέχθηκε, ώστε να μελετηθούν όλα τα μεγέθη ανθεκτικότητας (βλ. και επόμενες Παραγράφους) με τον ίδιο τρόπο και επιδέχεται μελλοντικής βελτιστοποίησης και περαιτέρω διερεύνησης, βάσει και νέων πειραματικών δεδομένων. Οι πιο αξιόπιστες συσχετίσεις είναι εκείνες που αφορούν τις υπο-ομάδες συνθέσεων (μεταβλητού λόγου  $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk+lp\}$  και  $pce/b$ ), οι οποίες και σχολιάζονται πιο διεξοδικά μέσα στο κείμενο.

Αντίστοιχες γραμμικές αναλύσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν μεταξύ του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), και των επιμέρους ποσοτήτων των συστατικών των συνθέσεων, σύμφωνα με την **Εξίσωση (4.6)**:

$$p_{\text{calc}} = \beta_1 c + \beta_2 lp + \beta_3 sf + \beta_4 mk + \beta_5 s + \beta_6 g1 + \beta_7 g2 + \beta_8 w + \beta_9 pce + \beta_{10} \quad (4.6)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\beta_j$  ( $j = 1$  έως 10) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης φαίνονται στο **Σχήμα 263**, ενώ ο **Πίνακας 106** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\beta_j$ .



**Σχήμα 263** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ανοιχτού πορώδους,  $p_{\text{calc}}$  (%), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές,  $p_{\text{exp}}$  (%)

**Πίνακας 106** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ανοιχτού πορώδους,  $p_{\text{calc}}$  (%), συναρτήσεως των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης

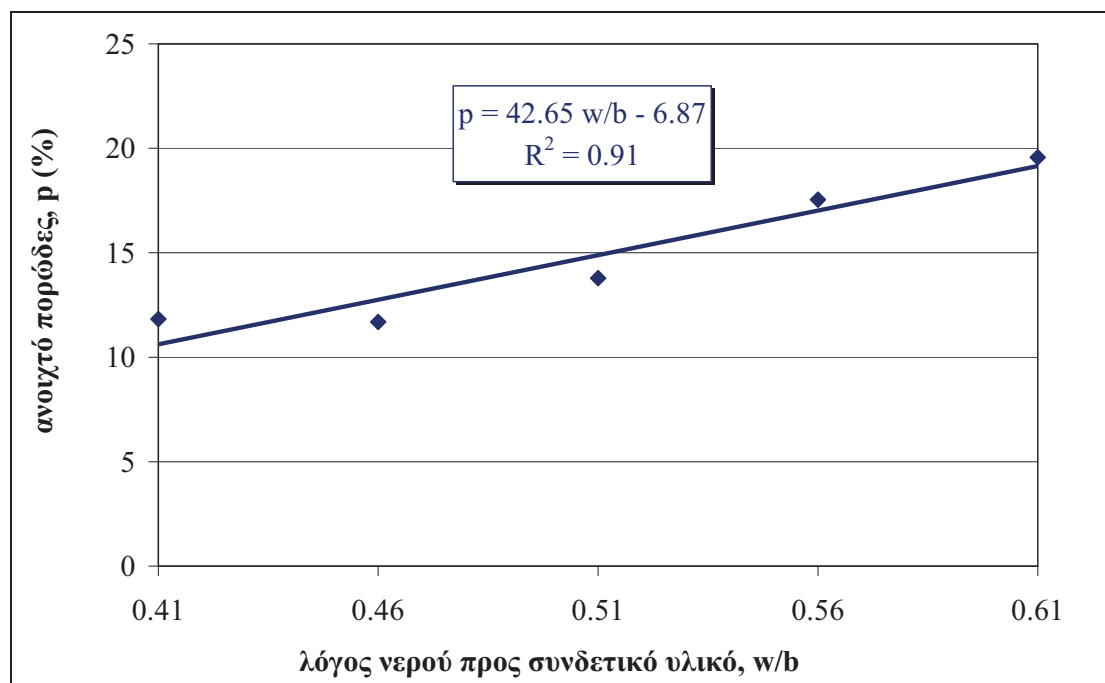
$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\beta_j$	0.121	0.072	0.073	0.146	0.002	0.011	-0.025	-0.075	-1.515	-10.553

Στη συνέχεια, εξετάζονται οι παράμετροι που διερευνήθηκαν σε κάθε υπο-ομάδα συνθέσεων ξεχωριστά, ήτοι: (**α**) ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , (**β**) ο λόγος πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , (**γ**) ο λόγος μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/b$ , (**δ**) ο λόγος μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk+lp\}$ , σε μίγματα ΑΣΣ και (**ε**) ο λόγος υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε μίγματα ΣΣ. Επιπλέον, (**στ**)

εξετάζονται συγκριτικά τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b = 0.51$  και παρεμφερή θλιπτική αντοχή,  $f_{cc} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ . Τέλος, σχολιάζονται τα ευρήματα από (ζ) τη διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν σε δύο εργαστήρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΩΣ/ΕΜΠ και ΕΔΥ/ΠΚ).

### Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

Στο **Σχήμα 264** παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), 28 ημερών, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Α (Πίνακας 37, Κεφ. 2), με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ . Από το Σχήμα παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου  $w/b$  οδηγεί σε μία σαφή γραμμική αύξηση του ανοιχτού πορώδους του υλικού σε ηλικία 28 ημερών, με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των δύο μεγεθών ( $R^2 = 0.91$ ). Ειδικότερα, η αύξηση του λόγου  $w/b$  από 0.41 σε 0.61 οδηγεί σε διπλασιασμό του πορώδους, από περίπου 10 % σε περίπου 20 %. Η εν λόγω αύξηση του ανοιχτού πορώδους αναμένεται να αυξήσει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε επιθετικούς παράγοντες (νερό, χλωριόντα).

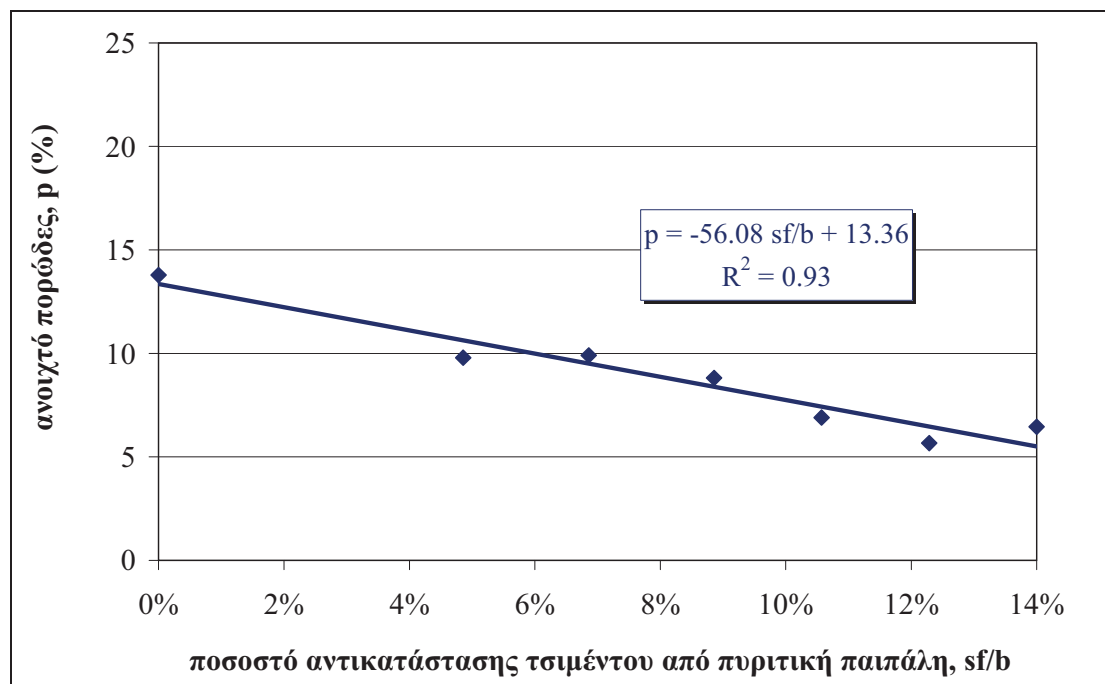


Σχήμα 264 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

Στο **Σχήμα 265** παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), 28 ημερών, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Β1 (Πίνακας 38, Κεφ. 2), με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/\{sf+c\}$  ή  $sf/b$ . Από το Σχήμα παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου  $sf/b$  οδηγεί σε μία σαφή γραμμική μείωση του ανοιχτού πορώδους του υλικού, με πολύ υψηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεγεθών ( $R^2 = 0.93$ ). Παρατηρείται ότι η προσθήκη έστω και μικρής ποσότητας πυριτικής παιπάλης (ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου) κατά περίπου 5 % μειώνει σημαντικά το ανοιχτό πορώδες 28 ημερών, από περίπου 13.5 % σε περίπου 10 %, που ισοδυναμεί με μείωση περίπου 26 %. Περαιτέρω αντικατάσταση τσιμέντου από πυριτική παιπάλη μειώνει περαιτέρω το ανοιχτό πορώδες. Ειδικά για το μέγιστο ποσοστό

αντικατάστασης που εξετάστηκε ( $sf/b = 14.0\%$ ) η συνολική μείωση του πορώδους ήταν πολύ υψηλή (από  $13.5\%$  σε περίπου  $5\%$ , που ισοδυναμεί με μείωση περίπου  $63\%$ ).



Σχήμα 265 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών

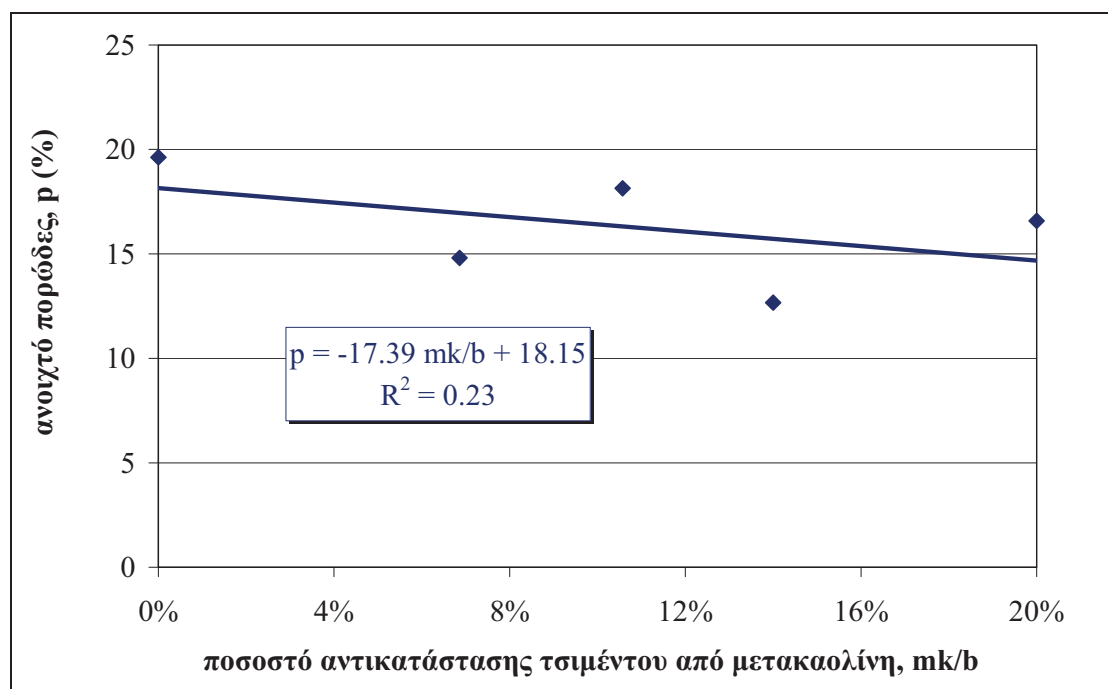
### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ )

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Γ (Πίνακας 40, Κεφ. 2) σε δύο ηλικίες, 28 και 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ . Συγκεκριμένα, το Σχήμα 266 αφορά στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ το Σχήμα 267 αφορά στην ηλικία των 360 ημερών. Παρατηρείται ότι σε ηλικία 28 ημερών η προσθήκη μετακαολίνη σε αντικατάσταση του περιεχόμενου τσιμέντου οδηγεί σε μείωση του ανοιχτού πορώδους του μίγματος αναφοράς. Για τους διάφορους λόγους  $mk/b$  παρατηρείται μια γραμμική, αν και αρκετά ασταθής ( $R^2 = 0.23$ ), μείωση του ανοιχτού πορώδους. Θα μπορούσε να υποθεθεί ότι για τα μίγματα που περιέχουν μετακαολίνη, ανεξαρτήτως της περιεκτικότητάς του, το ανοιχτό πορώδες κυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή με μεγάλη διασπορά. Αντίθετα, σε ηλικία 360 ημερών, η αύξηση του λόγου  $mk/b$  δε φαίνεται να επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στο ανοιχτό πορώδες του υλικού, παρά μόνο μία εξαιρετικά ήπια αύξηση για μεγαλύτερους λόγους  $mk/b$ . Με ασφάλεια, μπορεί να θεωρηθεί ότι ανοιχτό πορώδες παραμένει πρακτικώς σταθερό για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις σε ηλικία 360 ημερών.

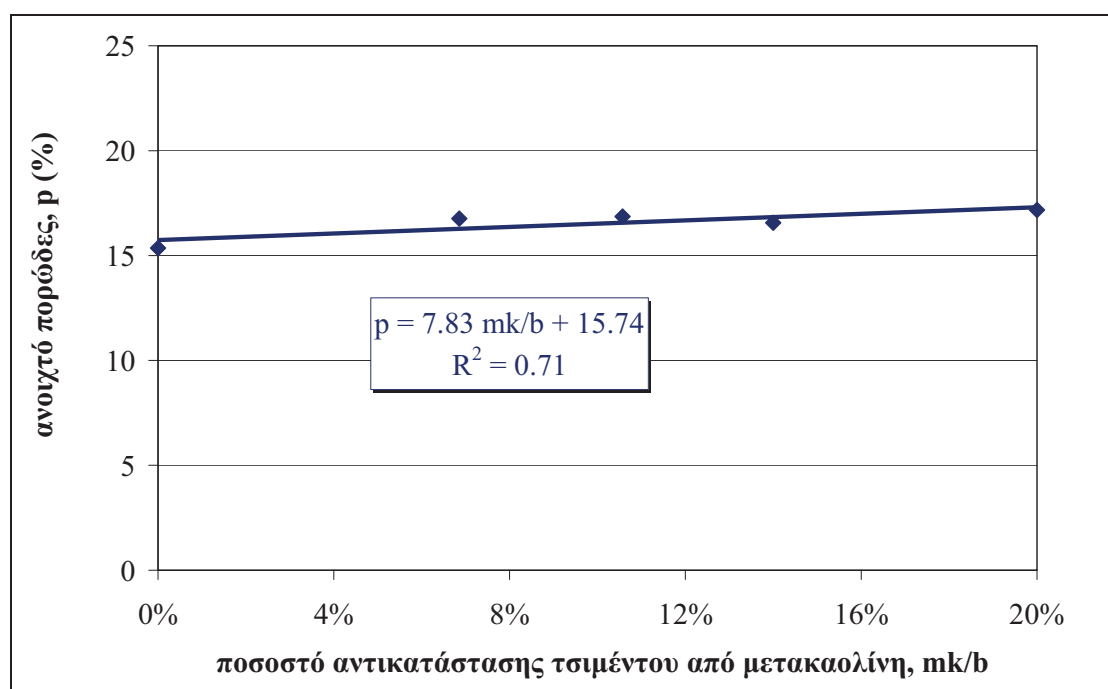
Μελετώντας συγκριτικά τα δύο Σχήματα (στις δύο ηλικίες 28 και 360 ημερών), παρατηρείται ότι η προσθήκη μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου δρα ευεργετικά και συνεισφέρει στη μείωση του ανοιχτού πορώδους του μίγματος αναφοράς μόνο σε ηλικία 28 ημερών και με αρκετά ασταθή αποτελέσματα. Οι διαφορές μεταξύ του μίγματος αναφοράς και των μιγμάτων με ενσωμάτωση μετακαολίνη φαίνεται να εξομαλύνονται σε ηλικία 360 ημερών. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι, γενικώς, τα μίγματα χωρίς μετακαολίνη απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο

συντήρησης για την επίτευξη παρεμφερούς ανοιχτού πορώδους με τα μίγματα με μετακαολίνη. Από τα παραπάνω, συνάγεται το συμπέρασμα ότι, ως προς το ανοιχτό πορώδες, ο μετακαολίνης προσφέρει απλώς ταχύτερη επίτευξη της τελικής τιμής του, η οποία όμως δε διαφέρει από εκείνη του μίγματος αναφοράς.

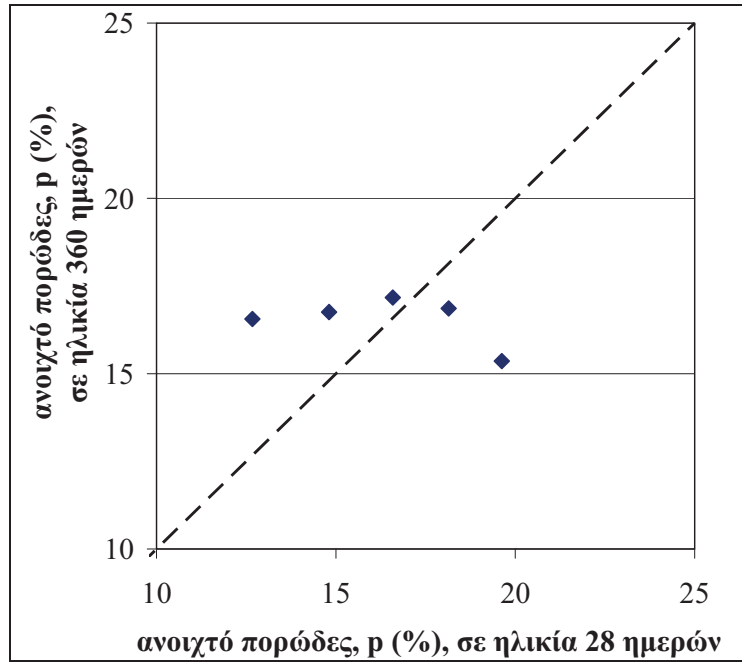
Η σταθεροποίηση του πορώδους, ανεξάρτητα από το λόγο  $mk/b$ , σε ηλικία 360 ημερών, σε αντίθεση με τη μεταβολή της τιμής του (από  $p = 12.7$  έως  $19.6$  %) σε ηλικία 28 ημερών αναδεικνύεται και από τη σύγκριση των τιμών του ανοιχτού πορώδους μεταξύ των δύο ηλικιών στο **Σχήμα 268**.



Σχήμα 266 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών



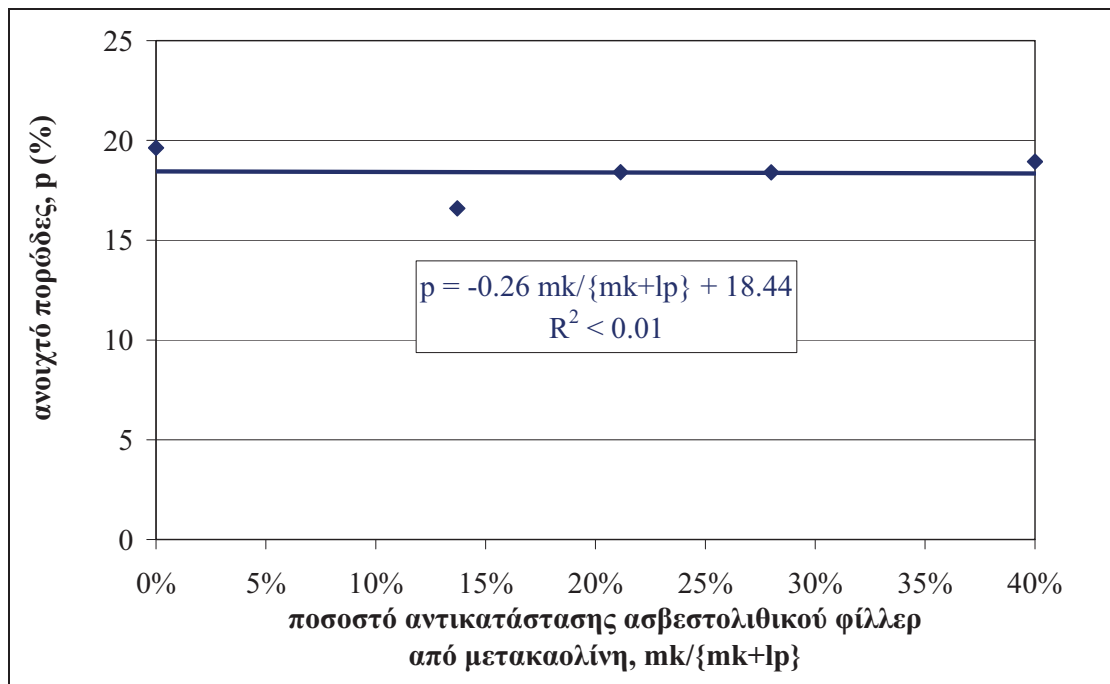
Σχήμα 267 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών



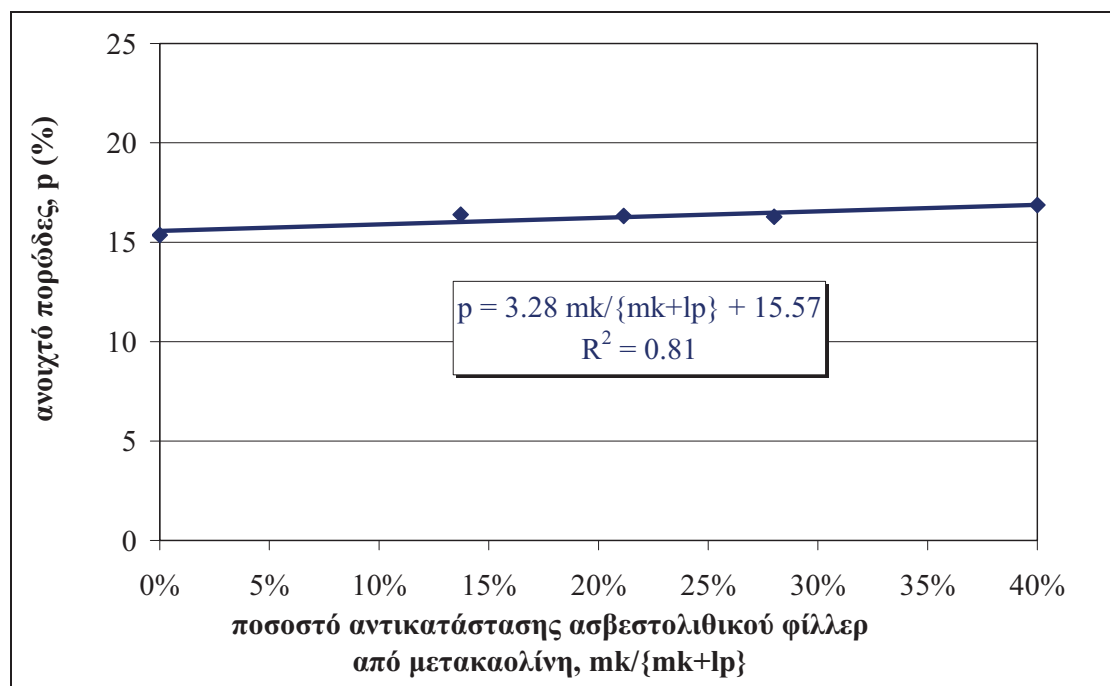
Σχήμα 268 Σύγκριση ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

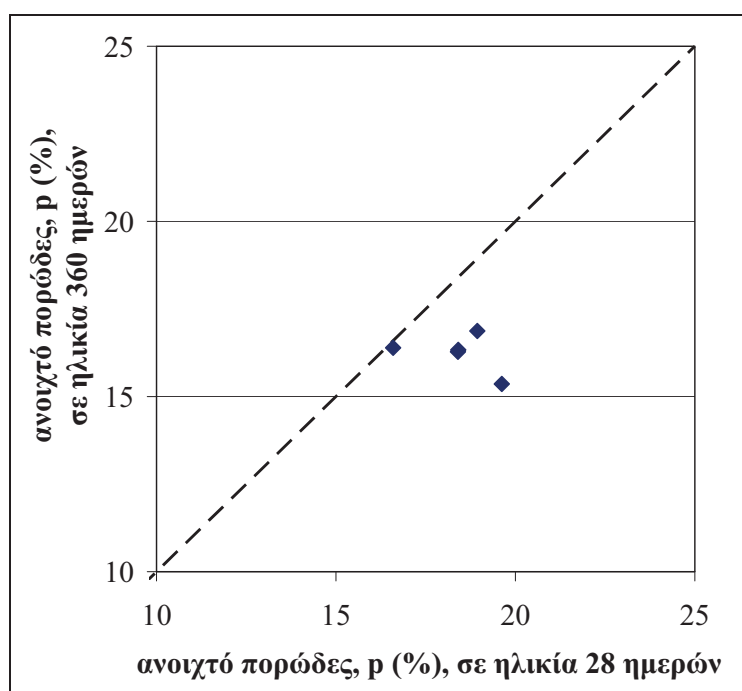
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Δ (Πίνακας 41, Κεφ. 2) σε δύο ηλικίες, 28 και 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$ . Συγκεκριμένα, το Σχήμα 269 αφορά στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ το Σχήμα 270 αφορά στην ηλικία των 360 ημερών.



Σχήμα 269 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 270 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών



Σχήμα 271 Σύγκριση ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$  δεν επηρεάζει το ανοιχτό πορώδες, ανεξαρτήτως της ηλικίας ελέγχου. Η εξαιρετικά ήπια αύξηση που παρατηρείται στην περίπτωση των 360 ημερών εκτιμάται ότι αποτελεί τυχαίο φαινόμενο. Η διασπορά των τιμών γύρω από της μέση τιμή τους είναι ελαφρώς υψηλότερη σε ηλικία 28 ημερών, γεγονός που φαίνεται και στο **Σχήμα 271**. Σε ηλικία 28 ημερών, το μέσο ανοιχτό πορώδες των εξεταζόμενων συνθέσεων είναι ελαφρώς υψηλότερο από το αντίστοιχο μέσο ανοιχτό πορώδες σε ηλικία 360 ημερών (18.4 % έναντι 16.3 % για τις 28 και 360 ημέρες, αντίστοιχα). Η ποζολανικότητα του μετακαολίνης δε φαίνεται να έχει επηρεάσει το ανοιχτό πορώδες, γεγονός που



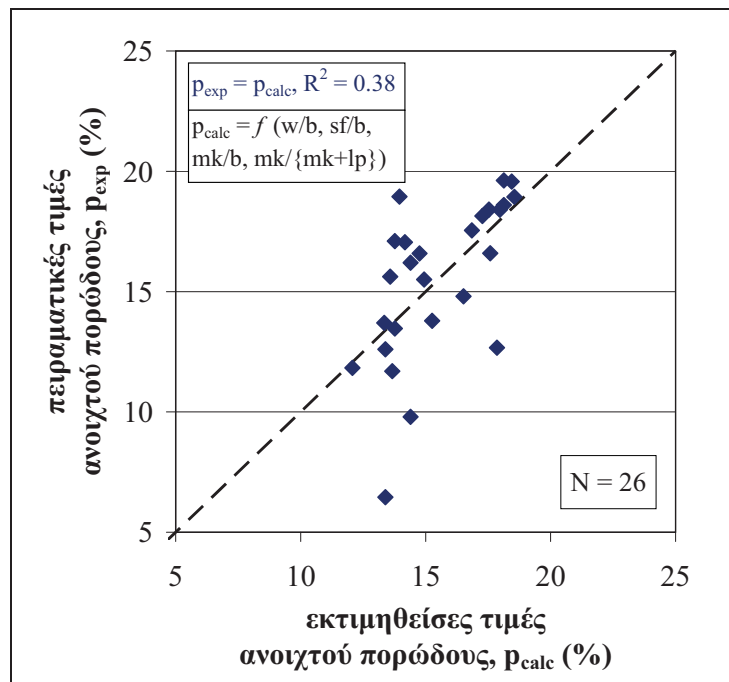
αποδεικνύεται από τη σταθερή τιμή του, ανεξαρτήτως της προσθήκης, αλλά και της περιεκτικότητας σε μετακαολίνη. Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι η μείωση (κατά περίπου 11.5 %) του ανοιχτού πορώδους από την ηλικία των 28 ημερών στην ηλικία των 360 ημερών οφείλεται αποκλειστικά στην θετική επίδραση της συνεχισθείσας συντήρησης στη δεξαμενή νερού.

### Συσχέτιση με χαρακτηριστικούς λόγους συστατικών

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, για σταθερή σύνθεση των αναμιγμάτων με μία μοναδική μεταβλητή, το ανοιχτό πορώδες βρέθηκε ότι εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή των λόγων  $w/b$  και  $sf/b$  με πολύ υψηλούς συντελεστές συσχέτισης ( $R^2 > 0.90$ ). Συναρτήσει του λόγου  $mk/b$ , το ανοιχτό πορώδες φαίνεται επίσης να μεταβάλλεται γραμμικά, αν και με σημαντική διασπορά, ενώ δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$ . Στη συνέχεια, θα αναζητηθεί μία γραμμική εξίσωση της μορφής της **Εξίσωσης (4.7)** που να συνδέει το ανοιχτό πορώδες με όλα τα παραπάνω μεγέθη.

$$p_{\text{calc}} = \gamma_1 (w/b) + \gamma_2 (sf/b) + \gamma_3 (mk/b) + \gamma_4 (mk/\{mk+lp\}) + \gamma_5 \quad (4.7)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\gamma_k$  ( $k = 1$  έως 5) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\gamma_k$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για το ανοιχτό πορώδες 28 ημερών (πλήθος  $N = 26$ ),  $p_{\text{exp}}$  (%). Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης φαίνονται στο **Σχήμα 272**, ενώ ο **Πίνακας 107** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\gamma_k$ .



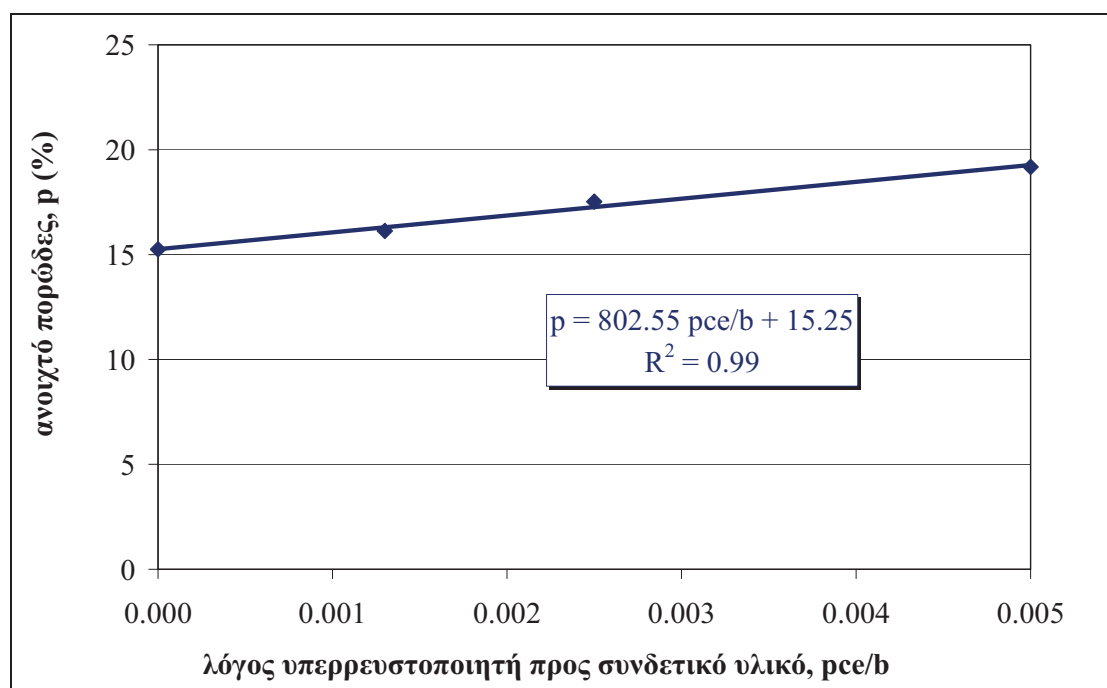
**Σχήμα 272** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ανοιχτού πορώδους,  $p_{\text{exp}}$  (%), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $p_{\text{calc}}$  (%)

**Πίνακας 107** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ανοιχτού πορώδους,  $p_{\text{calc}}$  (%), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

k	1	2	3	4	5
$\gamma_k$	31.87	-11.06	-73.84	39.86	-1.00

### Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

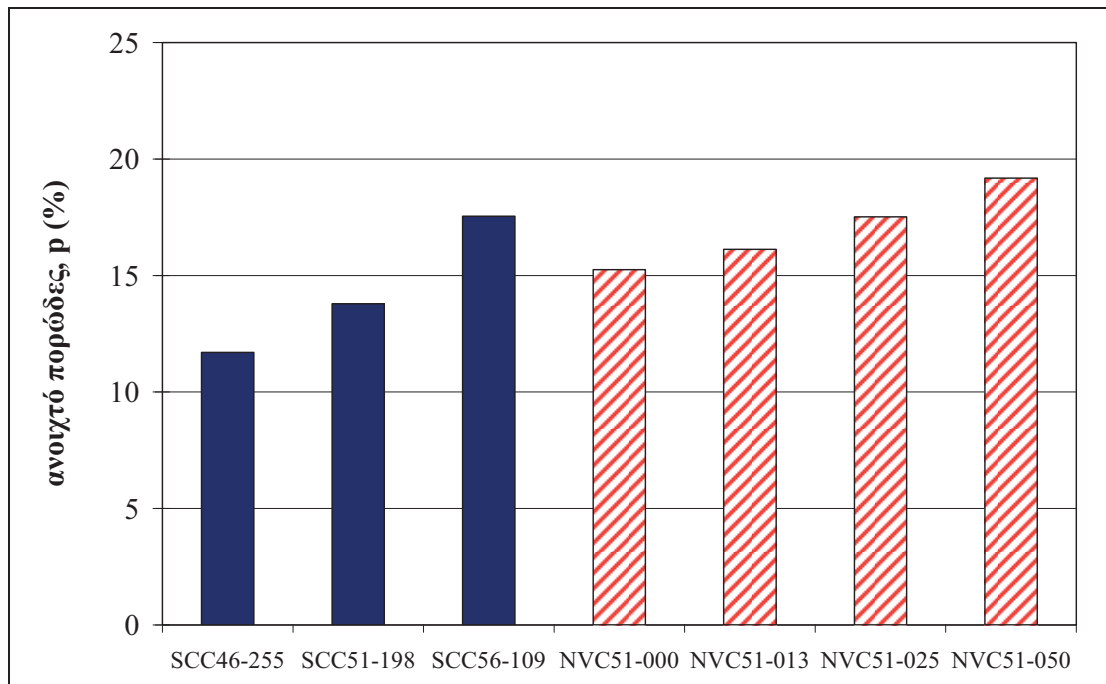
Στο **Σχήμα 273** παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), στις 28 ημέρες, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων E (Πίνακας 42, Κεφ. 2), με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή ως προς το συνδετικό υλικό,  $pce/b$ . Υπενθυμίζεται ότι οι εν λόγω συνθέσεις αφορούν αποκλειστικώς συνθέσεις ΣΣ. Παρατηρείται ότι για το εξεταζόμενο εύρος  $pce/b$ , η προσθήκη υπερρευστοποιητή (για σταθερή περιεκτικότητα συνδετικού υλικού) οδηγεί σε γραμμική αύξηση του ανοιχτού πορώδους, με εξαιρετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.99$ ). Ειδικότερα, η προσθήκη υπερρευστοποιητή 0.5 % κ.β. του τσιμέντου (που εδώ ταυτίζεται με το συνολικό συνδετικό υλικό) οδηγεί σε αύξηση του ανοιχτού πορώδους στις 28 ημέρες από 15 % σε περίπου 20 %.



Σχήμα 273 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων E σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή τύπου σκυροδέματος

Στο **Σχήμα 274** παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), στις 28 ημέρες, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Πίνακας 43 και Πίνακας 44, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή. Υπενθυμίζεται ότι η ονοματολογία των συνθέσεων έχει δοθεί ως εξής {ΤύποςΣκυροδέματος} $w/b$ (%)- $pce/b$ (%). Από το Σχήμα παρατηρείται ότι για συνθέσεις παρεμφερούς κοκκομετρίας και τον ίδιο λόγο  $w/b = 0.51$  (σύγκριση SCC51-198 με NVC51-000, NVC51-013, NVC51-025 και NVC51-050), το ανοιχτό πορώδες στις 28 ημέρες είναι μικρότερο στην περίπτωση του ΑΣΣ, κατά 15 έως 30 %. Παρεμφερές ανοιχτό πορώδες μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος επιτυγχάνεται για συνθέσεις παρεμφερούς κοκκομετρίας και μεγαλύτερο λόγο  $w/b$  στο ΑΣΣ κατά περίπου 10 %.



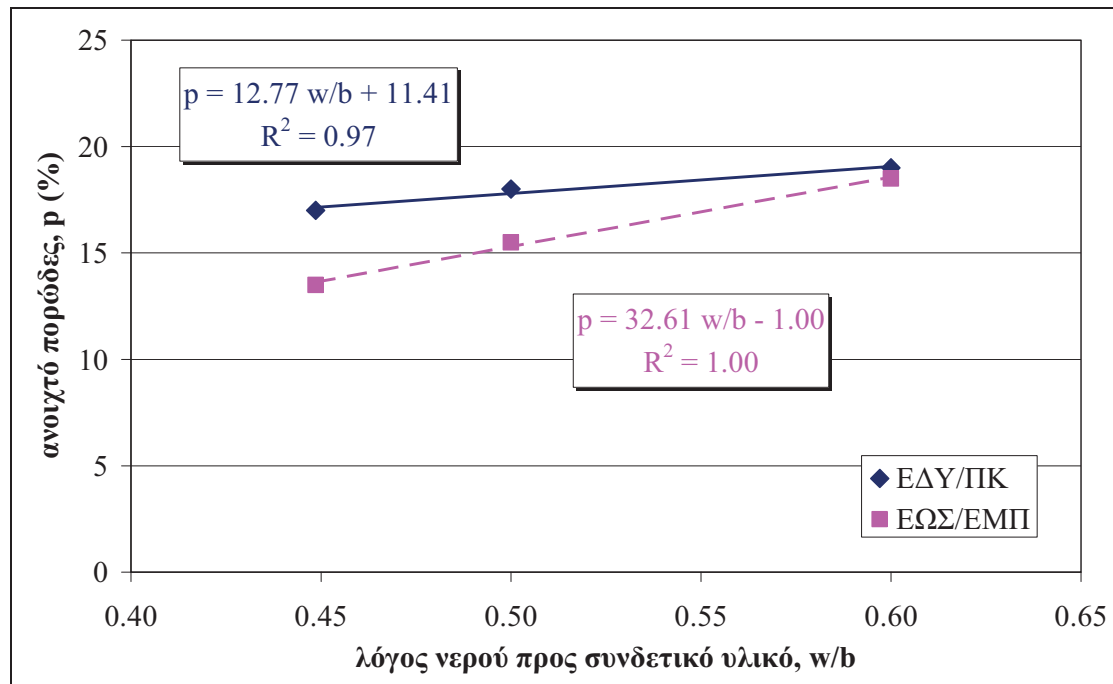
Σχήμα 274 Ανοιχτό πορώδες,  $p$  (%), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Z1 και Z2) σε ηλικία 28 ημερών

### Διεργαστηριακή σύγκριση

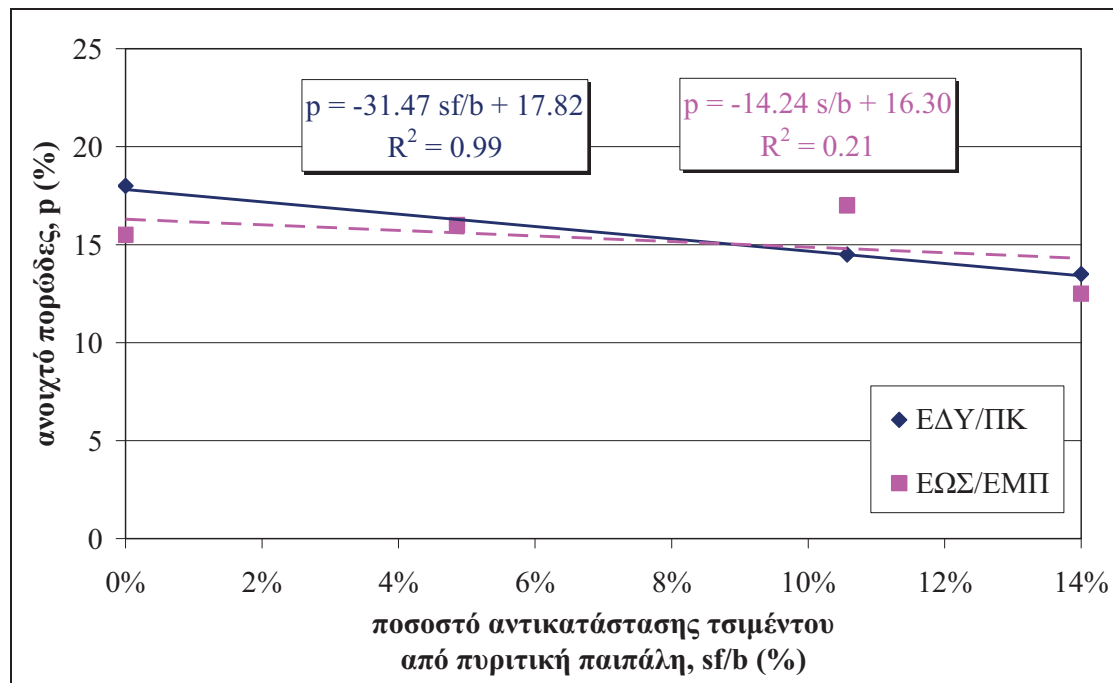
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), σε ηλικία 28 ημερών, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Πίν. 45 και 46, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ, αφενός με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , και αφετέρου με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/sf+c$  ή  $sf/b$ .

Στο Σχήμα 275, που αφορά στην περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ , παρατηρείται μία σαφής αυξητική τάση του ανοιχτού πορώδους, αν και ηπιότερη στην περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Πάντως, για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ , κοντά στο 0.60, η διαφορά μεταξύ των τιμών του ανοιχτού πορώδους των δύο εργαστηρίων φαίνεται να μειώνεται. Για την περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , στο Σχήμα 276, παρατηρείται μία σαφής μείωση μόνο για την περίπτωση του ΕΔΥ/ΠΚ. Για την περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ, η μείωση του ανοιχτού πορώδους είναι πιο ήπια (περίπου κατά 50 % σε σχέση με την αντίστοιχη μειωτική τάση για το ΕΔΥ/ΠΚ), αλλά και πιο ασταθής. Εκτιμάται ότι η μείωση είναι παρεμφερής μεταξύ των εργαστηρίων και η διαφορά οφείλεται σε υπερεκτίμηση του ανοιχτού πορώδους στο ΕΩΣ/ΕΜΠ για το λόγο  $sf/b = 10.6$  %.

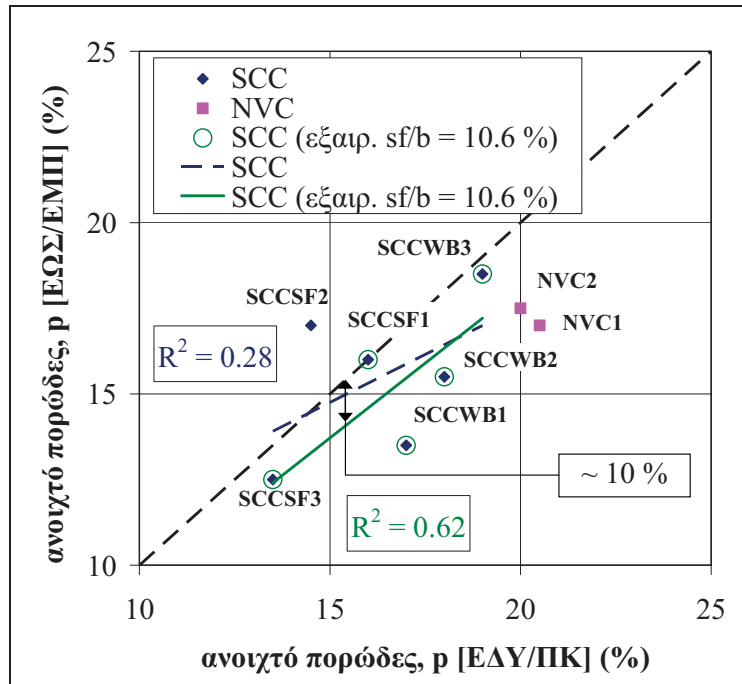
Στο Σχήμα 277 παρουσιάζονται τα ζεύγη των τιμών του ανοιχτού πορώδους μεταξύ των δύο εργαστηρίων, ώστε να εκτιμηθεί η εγγύτητά τους (σύμπτωση με τη διαγώνιο). Παρατηρείται ότι, για την περίπτωση των συνθέσεων ΑΣΣ και εξαιρουμένης της σύνθεσης SCCSF2 ( $sf/b = 10.6$  %), οι τιμές του ανοιχτού πορώδους είναι ελαφρώς χαμηλότερες στην περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ κατά περίπου 10 %. Αντίστοιχα, διαφορά μεταξύ των τιμών του ανοιχτού πορώδους 28 ημερών παρατηρείται και στην περίπτωση των συνθέσεων ΣΣ, η οποία είναι μάλιστα ακόμα μεγαλύτερη (διαφορά περίπου 17.5 %), λόγω και του υψηλότερου λόγου  $w/b$  που εφαρμόστηκε στις συνθέσεις του ΕΩΣ/ΕΜΠ (0.56 έναντι 0.50).



Σχήμα 275 Διεργαστηριακή σύγκριση ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 276 Διεργαστηριακή σύγκριση ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό λόγο πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 277 Διεργαστηριακή σύγκριση ανοιχτού πορώδους δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) σε ηλικία 28 ημερών

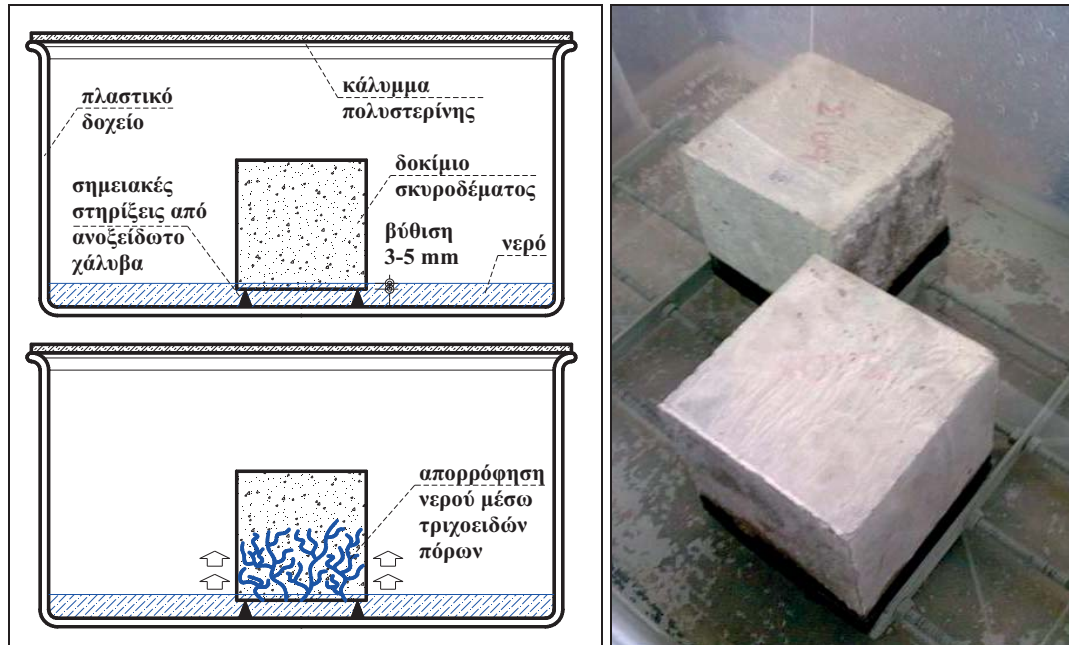
#### 4.2.1.2. Απορροφητικότητα

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

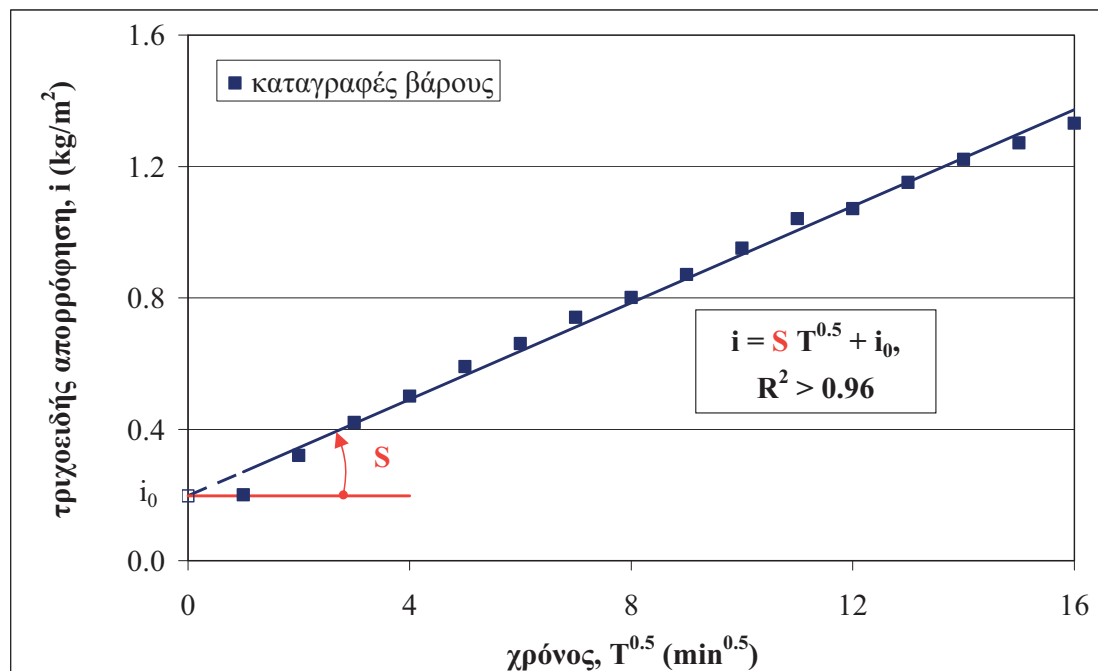
Η απορροφητικότητα (sorptivity),  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), υπολογίστηκε, σύμφωνα με την οδηγία RILEM TC 116-PCD (1999), μέσω της μεταβολής του βάρους του υπό έλεγχο δοκιμίου, λόγω της απορρόφησης νερού διαμέσου των τριχοειδών πόρων του (τριχοειδής απορρόφηση, capillary suction, capillary absorption). Πριν τον έλεγχο, το δοκίμιο ξηράνθηκε σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του, η οποία επιτυγχάνεται συμβατικά όταν η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου σε δύο διαδοχικές ημερήσιες μετρήσεις υπολογίζεται μικρότερη από  $0.1\%$ . Στη συνέχεια, και αφού το δοκίμιο παρέμεινε σε συνθήκες περιβάλλοντος για ικανό διάστημα περίπου μίας έως δύο ωρών για την εξίσωση της θερμοκρασίας του με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή απορροφητικότητας.

Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε πλαστικό δοχείο, με αποσπώμενο κάλυμμα πολυστερίνης (Σχήμα 278), ώστε να περιορίζονται τυχόν μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασία, θερμοκρασία) κατά τη διάρκεια του πειράματος. Κατά την έναρξη της δοκιμής, η επιφάνεια του δοκιμίου τοποθετούταν πάνω σε μεταλλικές στηρίξεις από ανοξείδωτο χάλυβα, σε οριακή επαφή με δεξαμενή νερού (βάθος εμβάπτισης περίπου 3 έως 5 mm), και καταγραφόταν το βάρος του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Σημειώνεται ότι οι εν λόγω μετρήσεις δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζονται ποσοτικά ή χρονικά μεταξύ των υπό έλεγχο δοκιμίων, αν και ο προκαθορισμός τους βοηθά στη συστηματοποίηση της δοκιμής. Για τον περιορισμό της πλευρικής εισροής ύδατος στο σκυρόδεμα, στα δοκιμαστικά πειράματα αξιολογήθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι πλευρικής προστασίας: (α) επάλειψη με τσιμεντοειδές κονίαμα και (β) εφαρμογή

μονωτικής ταινίας, περιμετρικά του δοκιμίου. Παρατηρήθηκε ότι το τσιμεντοειδές κονίαμα παρουσίαζε μια αρχική προσρόφηση νερού που επηρέαζε το αποτέλεσμα, ενώ η μονωτική ταινία δεν είχε πλήρη εφαρμογή, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή στεγάνωση. Καθώς κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων η συνήθης βύθιση ήταν μικρότερη από 3 mm, αποφασίστηκε η μη πλευρική στεγάνωση.



Σχήμα 278 (α) Πειραματική διάταξη δοκιμής απορροφητικότητας και (β) εκτέλεση δοκιμής σε πρότυπα κυβικά δοκίμια (100 × 100 × 100 mm) με πλευρική στεγάνωση με μονωτική ταινία.



Σχήμα 279 Τυπικό διάγραμμα πρωτογενών μετρήσεων τριχοειδούς απορρόφησης – Γραφικός ορισμός απορροφητικότητας

Έχει ήδη αποδειχθεί [Hall and Tse (1986), Hall and Yau (1987)] ότι, συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου,  $T^{0.5}$  ( $T$  σε min), η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου, ανηγμένου στην επιφάνεια έκθεσης σε νερό (αγνοούμενης της πλευρικής

έκθεσης),  $\Delta W/A$  ( $\text{kg/m}^2$ ), ακολουθεί τη γραμμική **Εξίσωση (4.8)**, με μικρή ή καθόλου διακριτή καμπυλότητα για τις πρώτες ώρες επαφής με το νερό (τουλάχιστον έως 4 h). Ως απορροφητικότητα ορίζεται η κλίση,  $S$  ( $\text{mm/min}^{0.5}$ ), της ευθείας. Στο **Σχήμα 279** παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα καταγραφών πίεσης συναρτήσει του χρόνου.

$$i = \Delta W/A = S T^{0.5} + i_0 \quad (4.8)$$

Η γραμμικότητα ελέγχεται μέσω της τιμής του συντελεστή συσχέτισης,  $R^2$ , της γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με τους **Reda Taha et al. (2001)**, η ροή κατά τη δοκιμή απορροφητικότητας διαφόρων πορώδων τεχνικών υλικών, μεταξύ των οποίων και του σκυροδέματος, φαίνεται να είναι γενικώς μονοδιάστατη και οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης πρέπει να ξεπερνούν το 0.96 για δεδομένα που λαμβάνονται τουλάχιστον έως τις πρώτες οκτώ ώρες της δοκιμής. Επομένως, τιμές του συντελεστή συσχέτισης μικρότερες από 0.96 συνεπάγονται μη επαρκή γραμμικότητα της καμπύλης και η τιμή της απορροφητικότητας θα πρέπει να απορρίπτεται και να επανελέγχεται.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αρχικός ρυθμός απορρόφησης είναι αρκετά υψηλός και αποδίδεται [**Hall and Yau (1987)**] στο φυσικό φαινόμενο της πλήρωσης του ανοιχτού πορώδους στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με το νερό. Ο εν λόγω υψηλός ρυθμός απορρόφησης έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή καθυστέρηση στην έναρξη του χρονόμετρου να οδηγεί στη δημιουργία μίας αρχικής αρνητικής τεταγμένης  $A$  στον άξονα της τριχοειδούς απορρόφησης. Από την άλλη πλευρά, εάν ο χρόνος μέτρησης ξεκινήσει νωρίτερα, τότε η τεταγμένη θα έχει θετική τιμή [**Wilson et. al. (1999)**]. Στην δημιουργία της αρχικής τεταγμένης συνεισφέρουν και οι ενδιάμεσες διακοπές της διαδικασίας απορρόφησης κατά τις περιόδους εξαγωγής και ζύγισης του δοκιμίου, οι οποίες για πρακτικούς λόγους δε συνοδεύονται από προσωρινές διακοπές του χρόνου μέτρησης. Γενικά, πάντως, οι τιμές της αρχικής τεταγμένης είναι σχετικά χαμηλές.

### Γενική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο **Πίνακας 108** περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των συνθέσεων που ελέγχθηκαν ως προς την απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm/min}^{0.5}$ ). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 143 μετρήσεις σε 60 συνθέσεις (44 συνθέσεις ΑΣΣ και 16 συνθέσεις ΣΣ). Η συντήρηση όλων των δοκιμίων είχε πραγματοποιηθεί, κατά περίπτωση, σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) ή σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) μέχρι τον έλεγχό τους. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, σε ηλικία 7, 28, 56 ή 360 ημερών. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που είχε προηγηθεί υπολογισμός του ανοιχτού πορώδους, το ίδιο δοκίμιο χρησιμοποιούταν στη συνέχεια και για τον υπολογισμό της απορροφητικότητας.

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της δοκιμής, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής και σε πρώτο, δοκιμαστικό στάδιο (έως SCC15 και NVC06, βάσει του αύξοντος αριθμού της σύνθεσης), τα δοκίμια εξασφαλιζόνταν πλευρικά έναντι της εισροής ύδατος με επάλειψη στεγανοποιητικού υλικού επάλειψη 3-4 στρώσεων στεγανωτικού κονιάματος τσιμεντοειδούς βάσης ISOMAT Aquamat σε αναλογία νερού προς κονίαμα 1:4, σε ύψος περίπου 50 mm στις κάθετες στην επιφάνεια ελέγχου πλευρές. Στις επόμενες συνθέσεις (έως SCC-19 και NVC-08, βάσει του αύξοντος αριθμού της σύνθεσης), η επιθυμητή πλευρική στεγανότητα επετεύχθη μέσω επικόλλησης αδιαπέρατης μεμβράνης, πρακτική που επιτρέπει την άμεση εκτέλεση της δοκιμής.

Στις επόμενες συνθέσεις (έως SCC-54 και NVC-16), τα δοκίμια τοποθετούνταν χωρίς κάποιο μέτρο προστασίας έναντι πλευρικής διείσδυσης, με προσεκτική όμως μέριμνα για οριακή επαφή με την επιφάνεια του νερού (ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα λόγω της πλευρικής διείσδυσης). Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν συνολικά δεκαέξι μετρήσεις σε διάστημα τεσσάρων ωρών (από SCC-20 και NVC-09 και εξής). Σε παλαιότερες συνθέσεις, οι μετρήσεις διήρκεσαν από 2 έως 4 ώρες (έως SCC-19 και NC-08). Σημειώνεται, πάντως, ότι η διαφορά αυτή δεν αποτυπώνεται στο αποτέλεσμα, καθώς η μετρούμενη κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης πρακτικά δε μεταβάλλεται μετά τις 2 ώρες. Επομένως, τα αποτελέσματα μπορούν με ασφάλεια να θεωρηθούν συγκρίσιμα.

**Πίνακας 108** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την υδαταπορροφητικότητα τους μέσω της μεθόδου της τριχοειδούς απορρόφησης.

Τύπος Σκυροδέματος Συντήρηση	Μίγματα ΑΣΣ			Μίγματα ΣΣ		
	ΠΕ	ΔΝ		ΠΕ	ΔΝ	
Κωδικοί	SCC04(2) <sup>3*</sup>	SCC16(1) <sup>1**</sup>	SCC31(1) <sup>1***</sup>	3xNVC03(3) <sup>13*</sup>	NVC08(1) <sup>1**</sup>	
Συνθέσεων	SCC05(3) <sup>3*</sup>	SCC17(1) <sup>1**</sup>	SCC32(1) <sup>1***</sup>	3xNVC04(3) <sup>13*</sup>	NVC09(1) <sup>1***</sup>	
	2xSCC06(3) <sup>8*</sup>	SCC18(1) <sup>1**</sup>	SCC33(1) <sup>1***</sup>	NVC06(2) <sup>5*</sup>	NVC10(1) <sup>1***</sup>	
	SCC07(3) <sup>5*</sup>	SCC19(1) <sup>1**</sup>	SCC34(1) <sup>1***</sup>		NVC11(1) <sup>1***</sup>	
	SCC08(3) <sup>5*</sup>	SCC20(1) <sup>1***</sup>	SCC35(1) <sup>1***</sup>		NVC12(1) <sup>1***</sup>	
	SCC09(3) <sup>5*</sup>	SCC21(1) <sup>1***</sup>	SCC36(1) <sup>1***</sup>		NVC13(1) <sup>1***</sup>	
	2xSCC10(3) <sup>8*</sup>	SCC22(1) <sup>1***</sup>	SCC45(2) <sup>2***</sup>		NVC14(1) <sup>1***</sup>	
	2xSCC11(3) <sup>8*</sup>	SCC23(1) <sup>1***</sup>	SCC47(2) <sup>2***</sup>		NVC15(2) <sup>2***</sup>	
	SCC13(3) <sup>3*</sup>	SCC24(1) <sup>1***</sup>	SCC48(2) <sup>2***</sup>		NVC16(2) <sup>2***</sup>	
	SCC14(3) <sup>5*</sup>	SCC25(1) <sup>1***</sup>	SCC49(2) <sup>2***</sup>			
	SCC15(3) <sup>3*</sup>	SCC26(1) <sup>1***</sup>	SCC50(2) <sup>2***</sup>			
		SCC27(1) <sup>1***</sup>	SCC51(2) <sup>2***</sup>			
		SCC28(1) <sup>1***</sup>	SCC52(2) <sup>2***</sup>			
		SCC29(1) <sup>1***</sup>	SCC53(2) <sup>2***</sup>			
		SCC30(1) <sup>1***</sup>	SCC54(2) <sup>2***</sup>			
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	14 Συνθ. (62 μετρ.)	30 Συνθ. (39 μετρ.)		7 Συνθ. (31 μετρ.)	9 Συνθ. (11 μετρ.)	<b>60 Συνθ. (143 μετρ.)</b>

\*σε παρένθεση αναγράφεται το πλήθος των ελεγχόμενων ηλικιών (7, 28, 56 ή/ και 360 ημέρες) και σε δύναμη το πλήθος των επιμέρους μετρήσεων

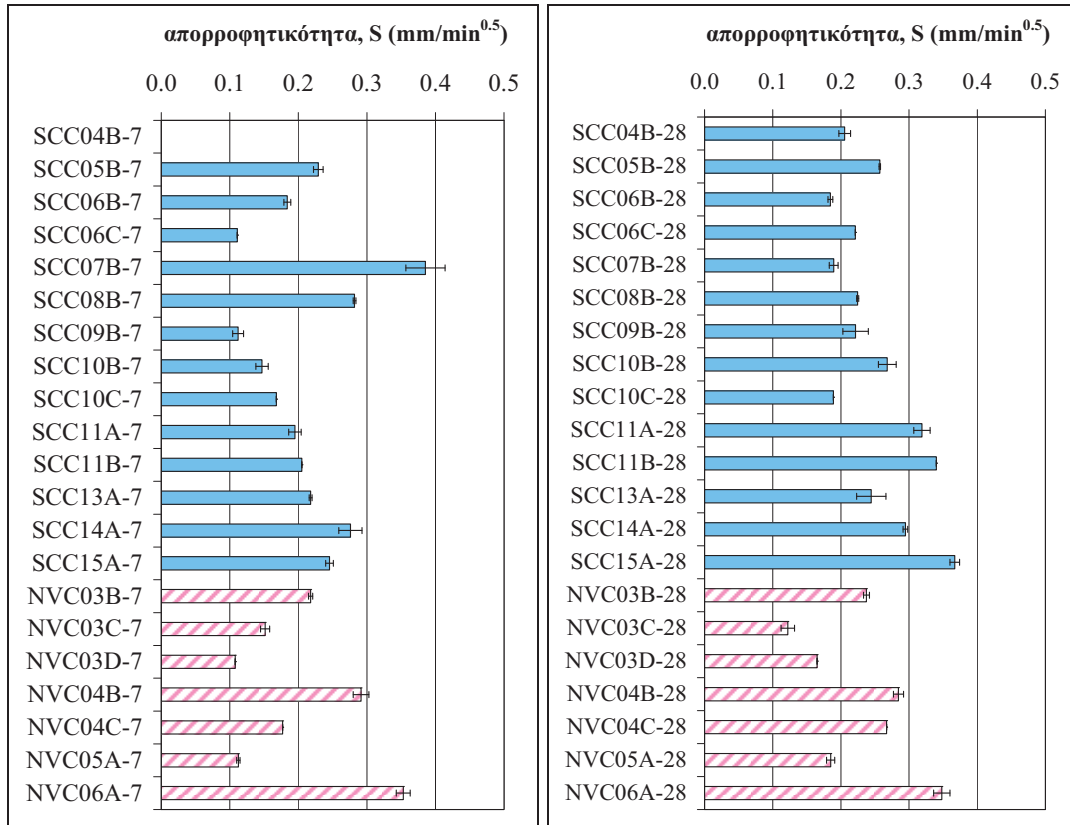
\*επάλειψη με στεγανοποιητικό κονίαμα στις πλευρές του δοκιμίου (εκτός της πλευράς σε επαφή με το νερό), έλεγχος σε περισσότερες ηλικίες + διάρκεια ξήρανσης 1:30 h (100 °C). Έλεγχος μέχρι τουλάχιστον 24 ώρες.

\*\*χρήση αδιαπέρατης μεμβράνης πλευρικά, έλεγχος μόνο σε μία ηλικία (28 ημέρες) + διάρκεια ξήρανσης 1:30 h (100 °C). Έλεγχος μέχρι τουλάχιστον 24 ώρες.

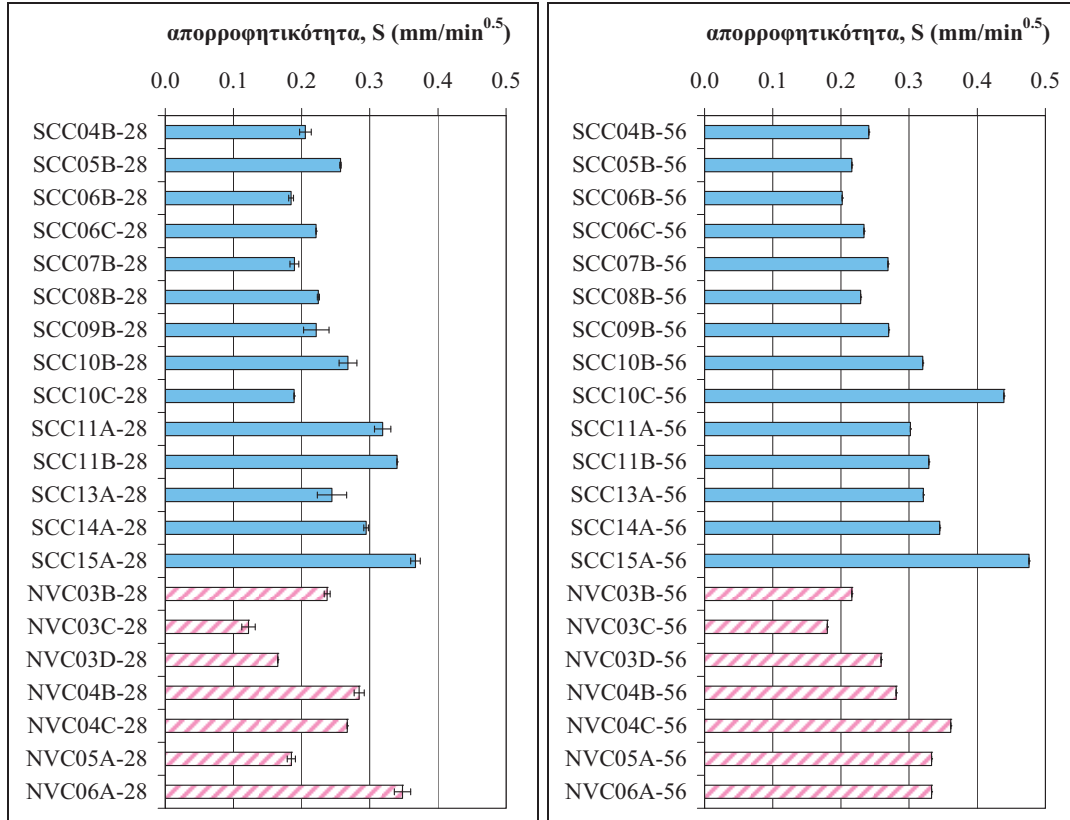
\*\*\* χωρίς χρήση στεγανοποιητικού κονιάματος ή μεμβράνης, ηλικία: 28 ημ. + διάρκεια ξήρανσης (100 °C) έως μεταβολή βάρους < 0.10 %. Έλεγχος μέχρι 4 ώρες.

Στο **Σχήμα 280** και στο **Σχήμα 281** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για όλες τις συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ, σε ηλικία 7, 28 και 56 ημερών, κατόπιν συντήρησης σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ), ενώ στο **Σχήμα 282** και στο **Σχήμα 283** παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν σε ηλικία 28 και 360 ημερών, κατόπιν συντήρησης σε δεξαμενή νερού (ΔΝ), για τις συνθέσεις ΑΣΣ και ΣΣ, αντίστοιχα.

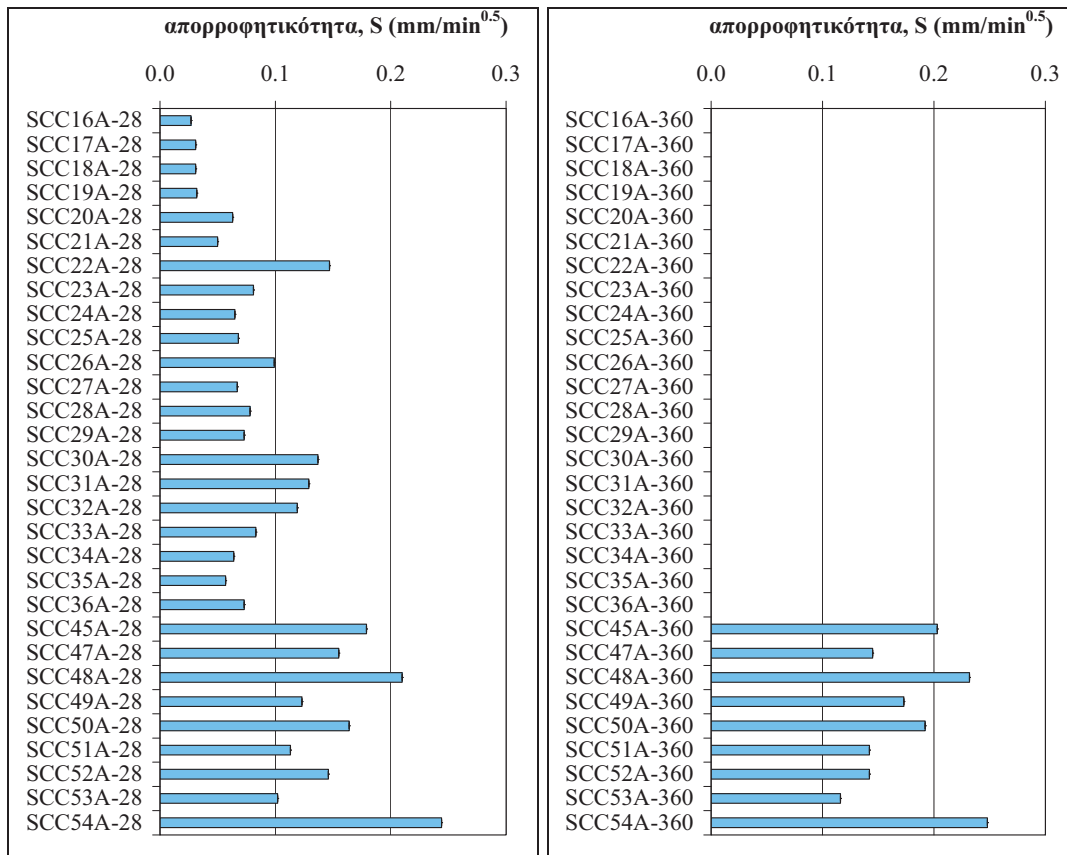




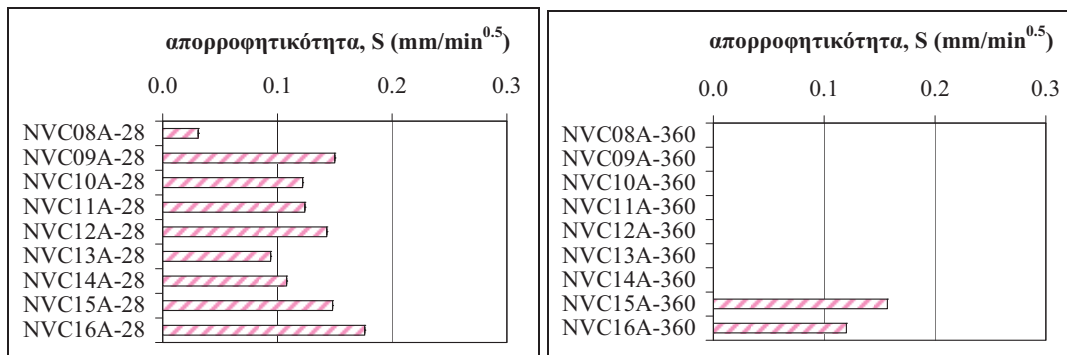
**Σχήμα 280** Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 7 ημερών και (β) 28 ημερών



**Σχήμα 281** Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 56 ημερών



Σχήμα 282 Απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμών συνθέσεων ΑΣΣ που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού ( $\Delta\text{N}$ ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών

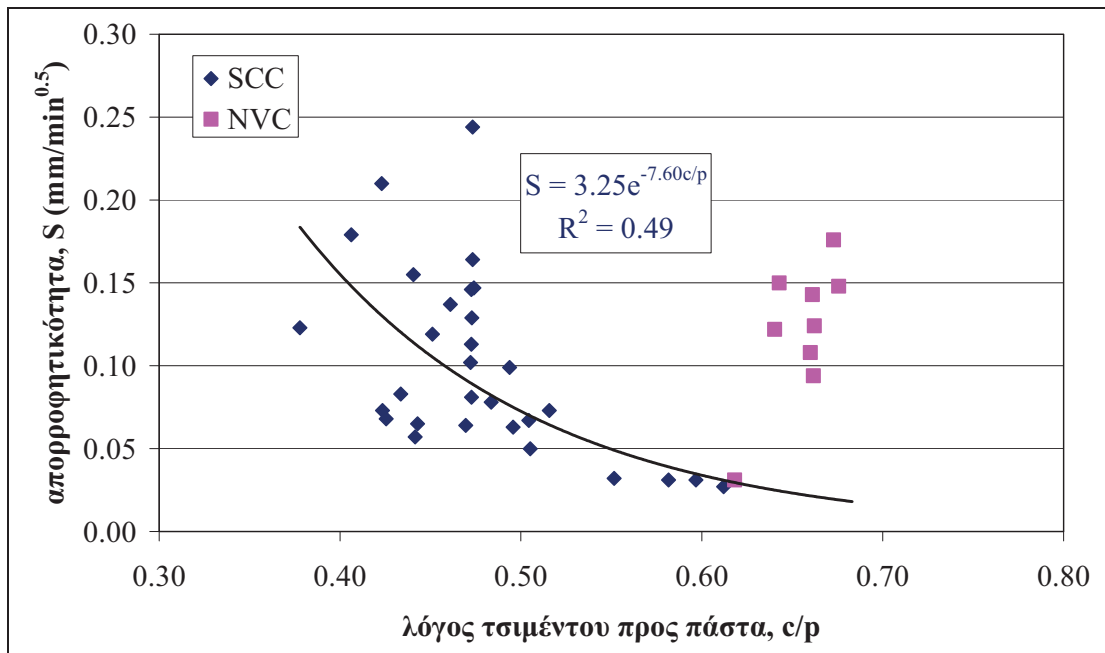


Σχήμα 283 Απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμών συνθέσεων ΣΣ που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού ( $\Delta\text{N}$ ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών

### Συσχέτιση με χαρακτηριστικά σύνθεσης

Η απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), συσχετίστηκε με διάφορα χαρακτηριστικά των συνθέσεων και, συγκεκριμένα, με: **(i)** τον λόγο άμμου προς τα συνολικά αδρανή,  $s/a$ , **(ii)** τον λόγο χονδρόκοκκων αδρανών προς τα συνολικά αδρανή,  $g/a$ , **(iii)** τον λόγο πάστας προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $p/w_{\text{tot}}$ , **(iv)** τον λόγο κονιάματος προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $m/w_{\text{tot}}$ , **(v)** τον λόγο τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$ , **(vi)** τον λόγο τσιμέντου προς λεπτόκοκκα,  $c/f$ , **(vii)** τον λόγο λεπτόκοκκων προς το συνολικό βάρος,  $f/w_{\text{tot}}$ , **(viii)** τον λόγο συνδετικού υλικού προς το συνολικό βάρος,  $b/w_{\text{tot}}$ , **(ix)** τον λόγο νερού προς τσιμέντο,  $w/c$ , και **(x)** τη μέση θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ). Δεν παρατηρήθηκε κάποια αξιόλογη συσχέτιση μεταξύ της απορροφητικότητας και των παραπάνω μεγεθών ξεχωριστά, στο σύνολο των

μιγμάτων, παρά μόνο με το λόγο  $c/p$ . Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε (Σχήμα 284) ότι αυξανόμενου του λόγου  $c/p$  η απορροφητικότητα του ΑΣΣ μειώνεται εκθετικά, αν και για μικρότερους λόγους  $c/p$  η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι σχετικά μεγάλη. Στο ΣΣ, αν και το εύρος λόγων  $c/p$  ήταν εξαιρετικά μικρό και, ως εκ τούτου, τα συμπεράσματα δεν μπορούν να είναι σαφή, δεν παρατηρήθηκε κάποια αντίστοιχη τάση και η διασπορά της απορροφητικότητας ήταν επίσης σημαντική για σταθερό λόγο  $c/p$ . Θα μπορούσε, πάντως, να αναφερθεί ότι ίδιες τιμές απορροφητικότητας μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ επιτυγχάνονται για μικρότερους λόγους  $c/p$  στο ΑΣΣ.



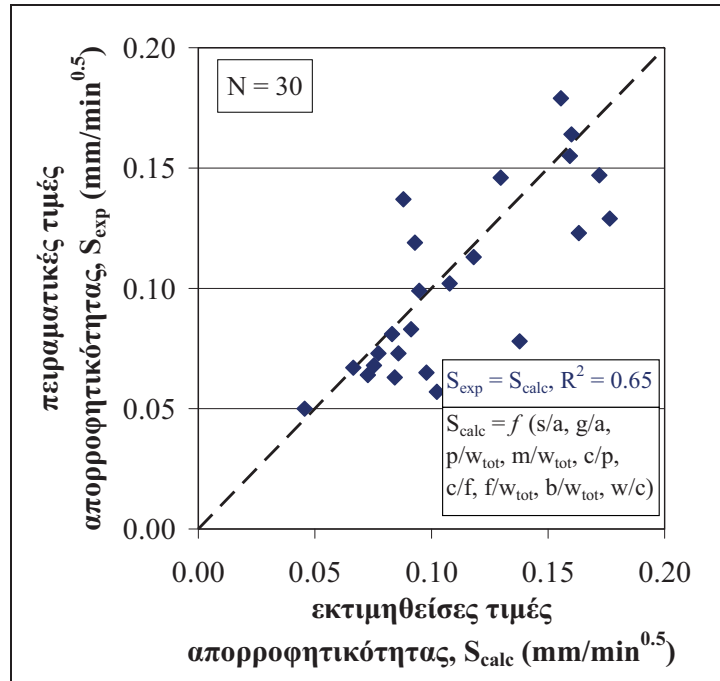
Σχήμα 284 Απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού ( $\Delta\text{N}$ ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών συναρτήσει του λόγου τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$

Κατ' αντιστοιχία με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά την αξιολόγηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στο ανοιχτό πορώδες, θα αναζητηθούν ακολούθως γραμμικές εξισώσεις της μορφής των **Εξισώσεων (4.9)** και **(4.10)** που να συνδέουν την απορροφητικότητα στις 28 ημέρες αφενός με όλες τις παραπάνω μεταβλητές, πλην της αντοχής, και αφετέρου με όλες τις επιμέρους ποσότητες των συστατικών των μιγμάτων.

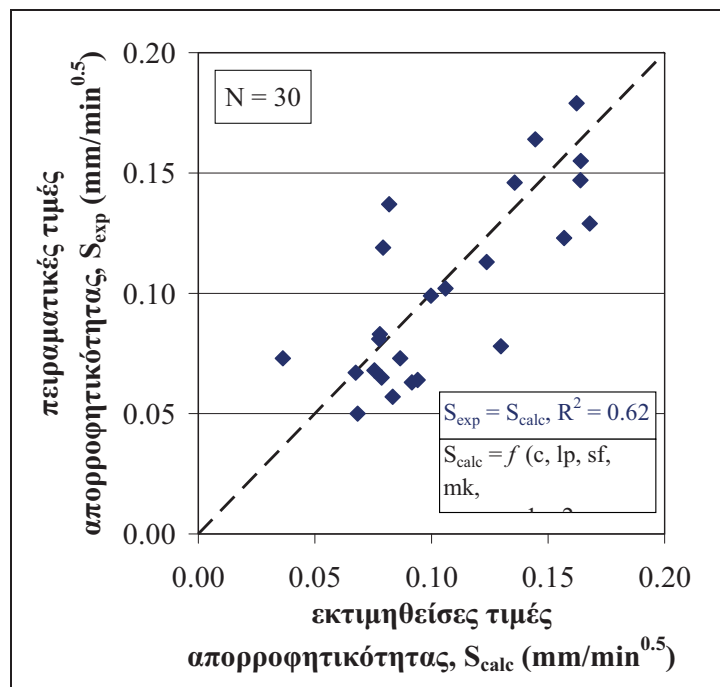
$$S_{\text{calc}} = \alpha_1 (s/a) + \alpha_2 (g/a) + \alpha_3 (p/w_{\text{tot}}) + \alpha_4 (m/w_{\text{tot}}) + \alpha_5 (c/p) + \alpha_6 (c/f) + \alpha_7 (f/w_{\text{tot}}) + \alpha_8 (b/w_{\text{tot}}) + \alpha_9 (w/c) + \alpha_{10} \quad (4.9)$$

$$S_{\text{calc}} = \beta_1 c + \beta_2 lp + \beta_3 sf + \beta_4 mk + \beta_5 s + \beta_6 g1 + \beta_7 g2 + \beta_8 w + \beta_9 pce + \beta_{10} \quad (4.10)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha_i$  και  $\beta_j$  ( $i, j = 1$  έως  $10$ ) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\alpha_i$  και  $\beta_j$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την απορροφητικότητα 28 ημερών (πλήθος  $N = 30$ ),  $S_{\text{exp}}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ). Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης φαίνονται στο **Σχήμα 285** για την περίπτωση συσχέτισης με τους χαρακτηριστικούς λόγους των συστατικών της σύνθεσης και στο **Σχήμα 286** για την περίπτωση εκτίμησης της απορροφητικότητας μέσω των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης. Ο **Πίνακας 109** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\alpha_i$  και  $\beta_j$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση.



Σχήμα 285 Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών απορροφητικότητας,  $S_{calc}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $S_{exp}$



Σχήμα 286 Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών απορροφητικότητας,  $S_{calc}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές,  $S_{exp}$

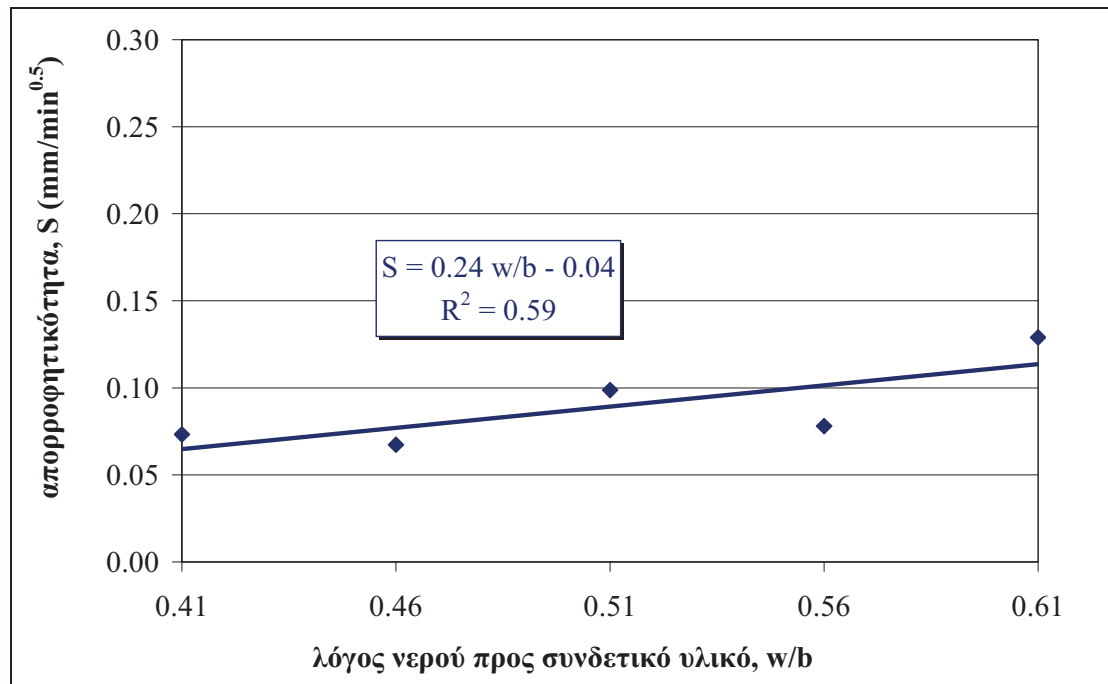
Πίνακας 109 Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού απορροφητικότητας,  $S_{calc}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$ )

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_i$	-2.60	-2.84	0.44	-11.12	-1.64	1.59	7.02	1.04	0.44	8.78
$\beta_j$	-0.0009	-0.0002	-0.0013	-0.0012	0.0073	0.0019	0.0200	0.0024	0.0042	-14.8816

Στη συνέχεια, εξετάζονται οι παράμετροι που διερευνήθηκαν σε κάθε υπο-ομάδα συνθέσεων ξεχωριστά, ήτοι: **(α)** ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , **(β)** ο λόγος πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , **(γ)** ο λόγος μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/b$ , **(δ)** ο λόγος μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk/lp\}$ , σε μίγματα ΑΣΣ και **(ε)** ο λόγος υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε μίγματα ΣΣ. Επιπλέον, **(στ)** εξετάζονται συγκριτικά τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b = 0.51$  και παρεμφερή θλιπτική αντοχή,  $f_{cc} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ . Τέλος, σχολιάζονται τα ευρήματα από **(ζ)** τη διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν σε δύο εργαστήρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΩΣ/ΕΜΠ και ΕΔΥ/ΠΚ).

### Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

Στο **Σχήμα 287** παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), σε ηλικία 28 ημερών, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Α (Πίνακας 37, Κεφ. 2), με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ .



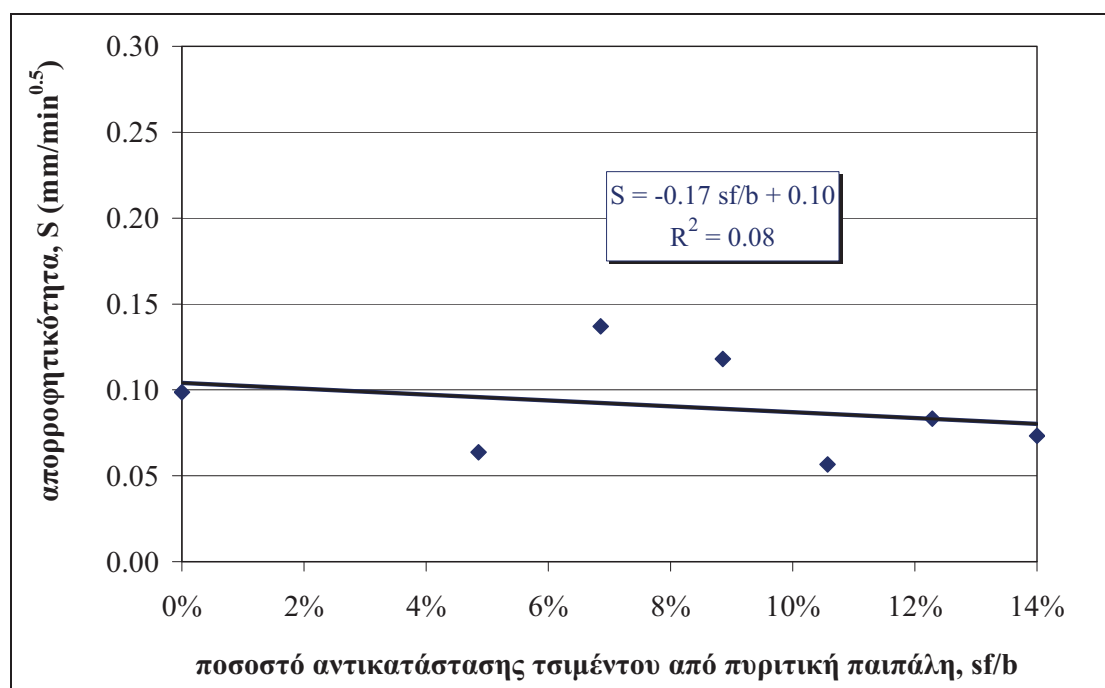
**Σχήμα 287** Απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών

Αν και οι διακυμάνσεις των επιμέρους τιμών απορροφητικότητας για τις διάφορες συνθέσεις είναι σχετικά υψηλές, παρατηρείται μία σαφής αυξητική τάση της απορροφητικότητας για την αύξηση του λόγου  $w/b$ , στο εξεταζόμενο εύρος από 0.41 έως 0.61. Συγκεκριμένα, η απορροφητικότητα 28 ημερών αυξάνεται από περίπου 0.060 σε περίπου 0.105  $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$  (αύξηση περίπου 75 %) στο εύρος των λόγων  $w/b$  που εξετάστηκε. Η εν λόγω αυξητική τάση είναι αναμενόμενη, λόγω της αύξησης του ανοιχτού πορώδους που επιφέρει η αύξηση του λόγου  $w/b$ , όπως παρατηρήθηκε στην προηγούμενη Παράγραφο 4.2.1.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ποσοστιαία αύξηση της απορροφητικότητας (κατά περίπου 75 %) συναρτήσει του λόγου  $w/b$ , στο εξεταζόμενο εύρος, ήταν μικρότερη από την αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση του ανοιχτού πορώδους (κατά περίπου 100 %). Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να εξηγηθεί

βάσει του μεγέθους των πόρων, καθώς πόροι μεγαλύτερης διαμέτρου εκτιμάται ότι δε συνεισφέρουν με τον ίδιο τρόπο στην απορροφητικότητα. Η παράμετρος αυτή δεν ήταν δυνατό να ελεγχθεί λόγω απουσίας κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού.

### Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

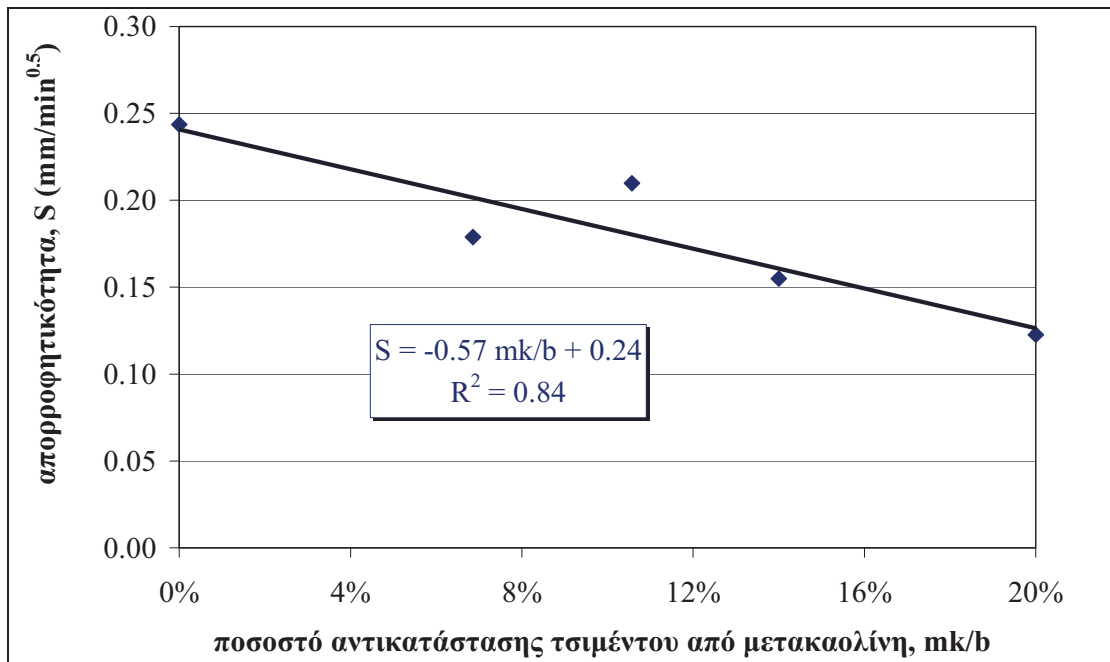
Στο **Σχήμα 288** παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), στις 28 ημέρες, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Β (Πίνακας 38, Κεφ. 2), με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/\{sf+c\}$  ή  $sf/b$ . Παρατηρείται μια εξαιρετικά ήπια και αρκετά ασταθής μείωση της απορροφητικότητας 28 ημερών με την αύξηση του λόγου  $sf/b$ . Η εν λόγω μειωτική τάση είναι αναμενόμενη, λόγω της μείωσης του ανοιχτού πορώδους που επιφέρει η αύξηση του λόγου  $sf/b$ , όπως παρατηρήθηκε στην προηγούμενη Παράγραφο 4.2.1.1. Από την άλλη πλευρά, η μεγάλη διακυμάνση των τιμών εκτιμάται ότι σχετίζεται με τη μη ολοκλήρωση της ποζολανικής δράσης της πυριτικής παιπάλης στην ηλικία ελέγχου και ο έλεγχος σε μεγαλύτερη ηλικία θεωρείται ότι θα οδηγούσε σε πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, στις επόμενες υπο-ομάδες συνθέσεων που παρασκευάστηκαν με χρήση μετακαολίνη, προβλέφθηκε η λήψη επιπλέον δοκιμών για πρόσθετο έλεγχο σε μεγαλύτερη ηλικία (360 ημερών).



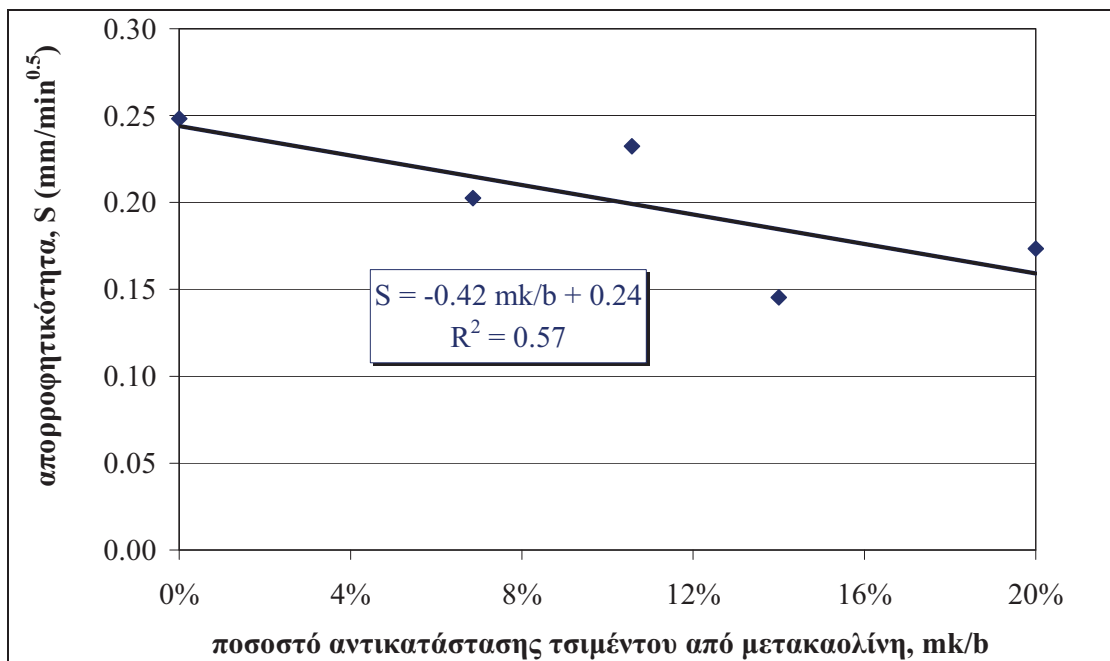
**Σχήμα 288** Απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ )

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Γ (Πίνακας 40, Κεφ. 2) σε δύο ηλικίες, 28 και 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ . Συγκεκριμένα, το **Σχήμα 289** αφορά στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ το **Σχήμα 290** αφορά στην ηλικία των 360 ημερών.



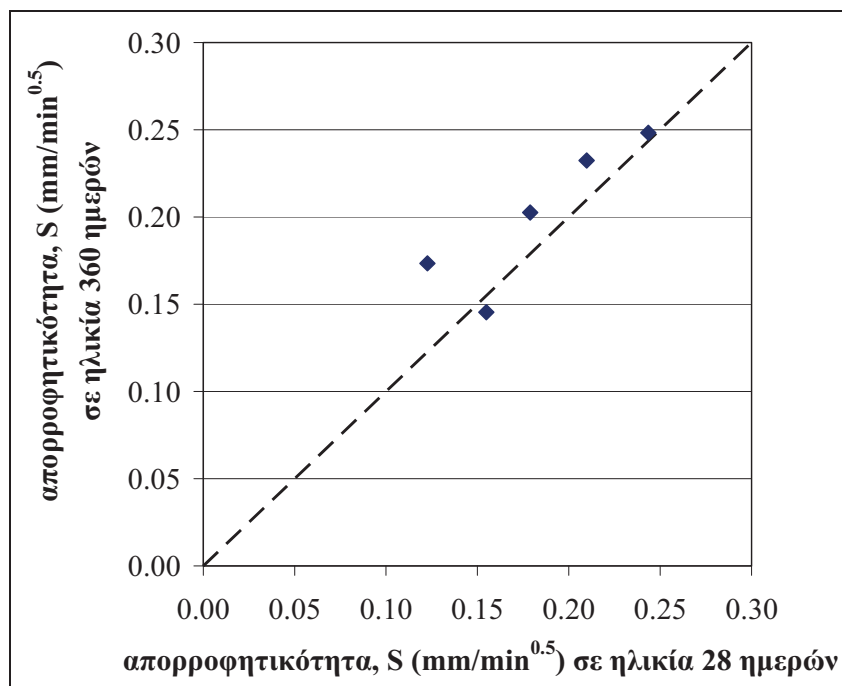
Σχήμα 289 Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 290 Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών

Από τα Σχήματα παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως της ηλικίας ελέγχου, η αύξηση του λόγου  $mk/b$  οδηγεί σε σαφή μείωση της απορροφητικότητας, η οποία είναι ελαφρώς ηπιότερη, αν και περισσότερο ασταθής, στην ηλικία των 360 ημερών. Πάντως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 291, η απορροφητικότητα κάθε σύνθεσης ξεχωριστά μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ίδια μεταξύ των δύο ηλικιών, καθώς τα ζεύγη τιμών συμπίπτουν πρακτικά με τη διαγώνιο. Τυχόν αποκλίσεις αποδίδονται στη διασπορά του υλικού και των δοκιμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μειωτική τάση της απορροφητικότητας είναι αναμενόμενη για την ηλικία των 28 ημερών, λόγω της μείωσης του ανοιχτού πορώδους που επιφέρει η αύξηση του λόγου  $mk/b$ , όπως

παρατηρήθηκε στην προηγούμενη Παράγραφο 4.2.1.1. Αντίθετα, δε φαίνεται να έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που αφορούν στο ανοιχτό πορώδες σε ηλικία 360 ημερών, το οποίο υπενθυμίζεται ότι είναι πρακτικώς σταθερό. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στο μέγεθος των πόρων (με σταθερό συνολικό ανοιχτό πορώδες), που λόγω εργαστηριακών περιορισμών δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν. Πάντως, όπως και στην περίπτωση του λόγου  $w/b$ , αναδεικνύεται η ανάγκη ελέγχου της μορφής του πορώδους σε μελλοντικά πειράματα.

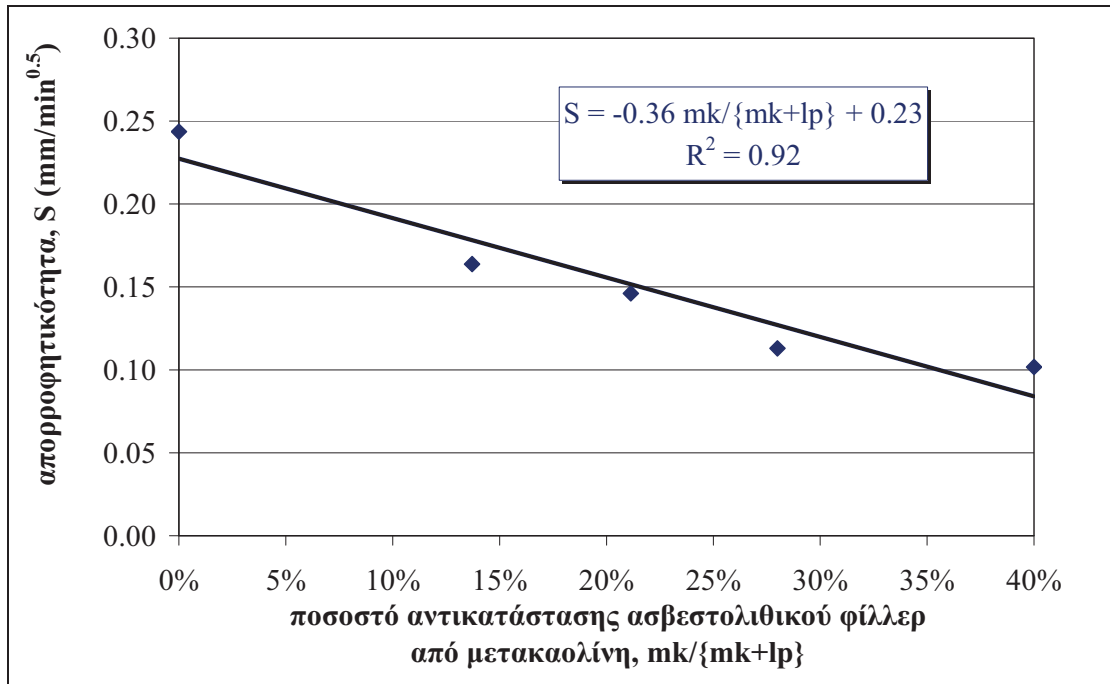


Σχήμα 291 Σύγκριση απορροφητικότητας,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών

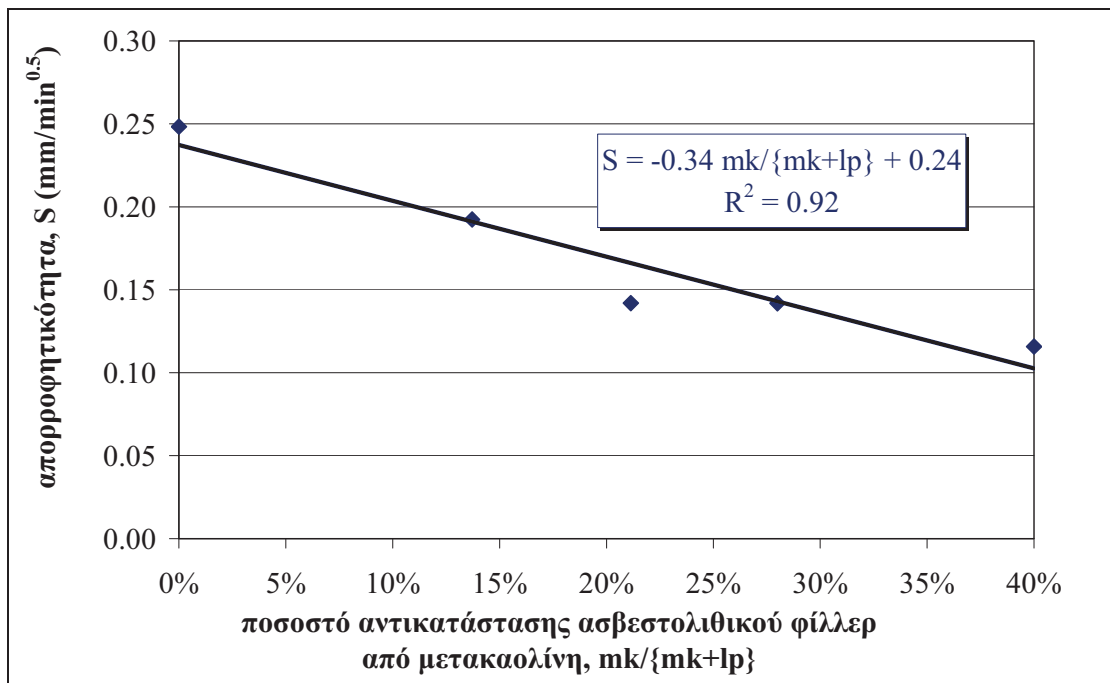
### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Δ (Πίνακας 41, Κεφ. 2) σε δύο ηλικίες, 28 και 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$ . Συγκεκριμένα, το Σχήμα 292 αφορά στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ το Σχήμα 293 αφορά στην ηλικία των 360 ημερών. Από τα Σχήματα παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως της ηλικίας ελέγχου, η αύξηση του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$  οδηγεί σε σαφή μείωση της απορροφητικότητας, η οποία είναι μάλιστα παρεμφερής μεταξύ των δύο ηλικιών. Όπως και στην περίπτωση των συνθέσεων μεταβλητού λόγου  $mk/b$ , έτσι και εδώ, η απορροφητικότητα κάθε σύνθεσης ξεχωριστά μπορεί να θεωρηθεί πρακτικώς ίδια μεταξύ των δύο ηλικιών, καθώς τα ζεύγη τιμών συμπίπτουν πρακτικά με τη διαγώνιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 294. Τυχόν αποκλίσεις αποδίδονται στη διασπορά του υλικού και των δοκιμών. Από τη σύγκριση της απορροφητικότητας μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων αντικατάστασης (τσιμέντου ή ασβεστολιθικού φίλερ) παρατηρείται ότι σε οποιαδήποτε ηλικία (Σχήμα 289 και Σχήμα 292 για τις 28 ημέρες, Σχήμα 290 και Σχήμα 293 για τις 360 ημέρες) η μείωση της απορροφητικότητας είναι ελαφρώς ηπιότερη για την περίπτωση της αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ.

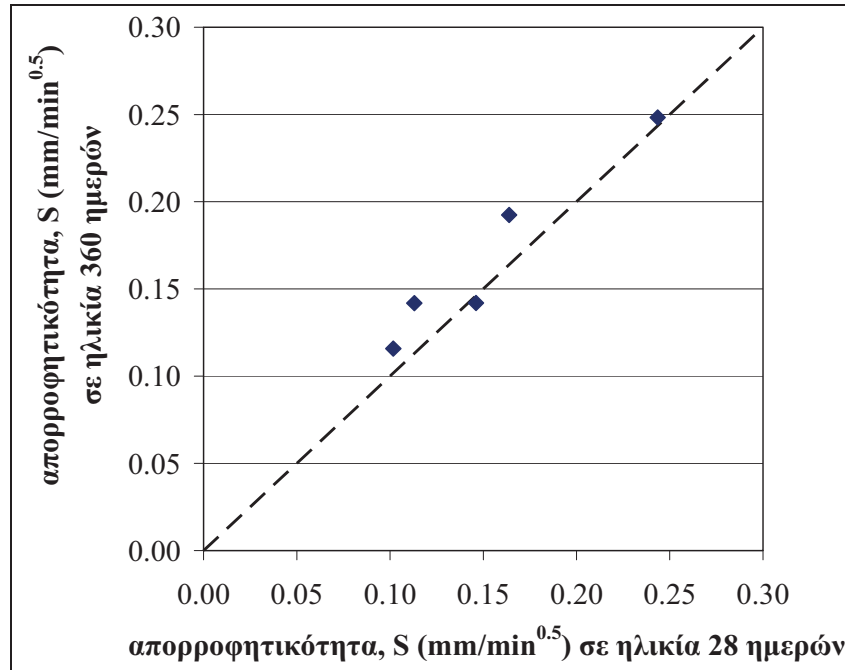




Σχήμα 292 Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 293 Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών

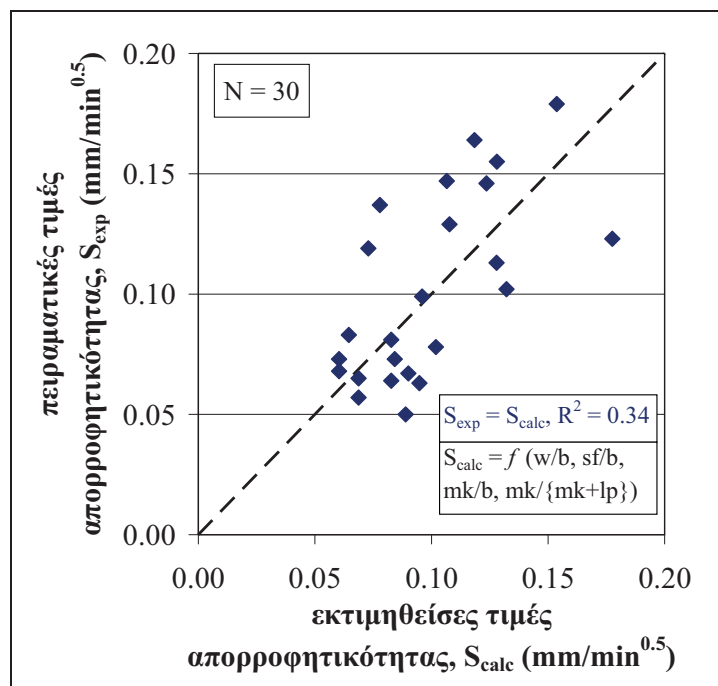


Σχήμα 294 Σύγκριση απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών

### Συσχέτιση με χαρακτηριστικούς λόγους συστατικών

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, για σταθερή σύνθεση των αναμιγμάτων με μία μοναδική μεταβλητή, η απορροφητικότητα βρέθηκε ότι εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή των όλων λόγων που εξετάστηκαν ( $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$ ). Στη συνέχεια, θα αναζητηθεί μία γραμμική εξίσωση της μορφής της **Εξίσωσης (4.11)** που να συνδέει όλες τις παραπάνω μεταβλητές.

$$S_{\text{calc}} = \gamma_1 (w/b) + \gamma_2 (sf/b) + \gamma_3 (mk/b) + \gamma_4 (mk/\{mk+lp\}) + \gamma_5 \quad (4.11)$$



Σχήμα 295 Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών απορροφητικότητας,  $S_{\text{exp}}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $S_{\text{calc}}$

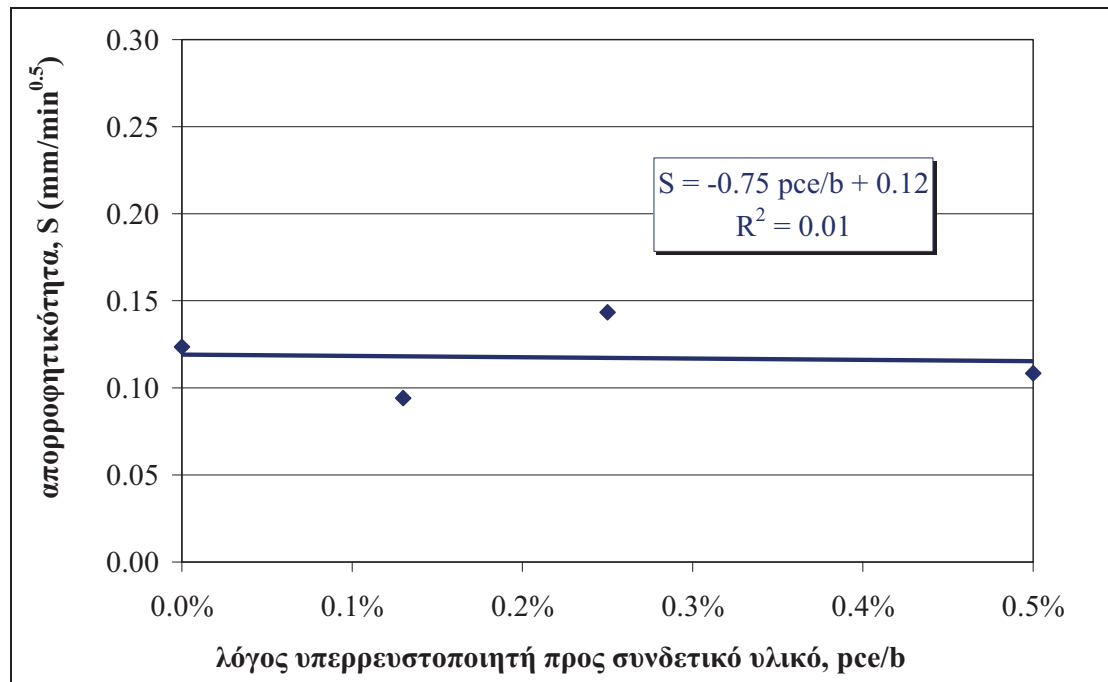
Όπως και στις αναλύσεις που προηγήθηκαν, για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\gamma_k$  ( $k = 1$  έως 5) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\gamma_k$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την απορροφητικότητα 28 ημερών (πλήθος  $N = 30$ ),  $S_{exp}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ). Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 295**, ενώ ο **Πίνακας 110** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\gamma_k$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση.

**Πίνακας 110** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού απορροφητικότητας,  $S_{calc}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

k	1	2	3	4	5
$\gamma_k$	0,1176	-0,2460	0,5487	-0,1356	0,0360

### Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

Στο **Σχήμα 296** παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), στις 28 ημέρες, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια ΣΣ της υπο-ομάδας συνθέσεων E (Πίνακας 25, Κεφ. 2), με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή ως προς το συνδετικό υλικό,  $pce/b$ . Η περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή (για σταθερή περιεκτικότητα συνδετικού υλικού) δε φαίνεται να επηρεάζει την απορροφητικότητα, αν και θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά των τιμών είναι σημαντική.

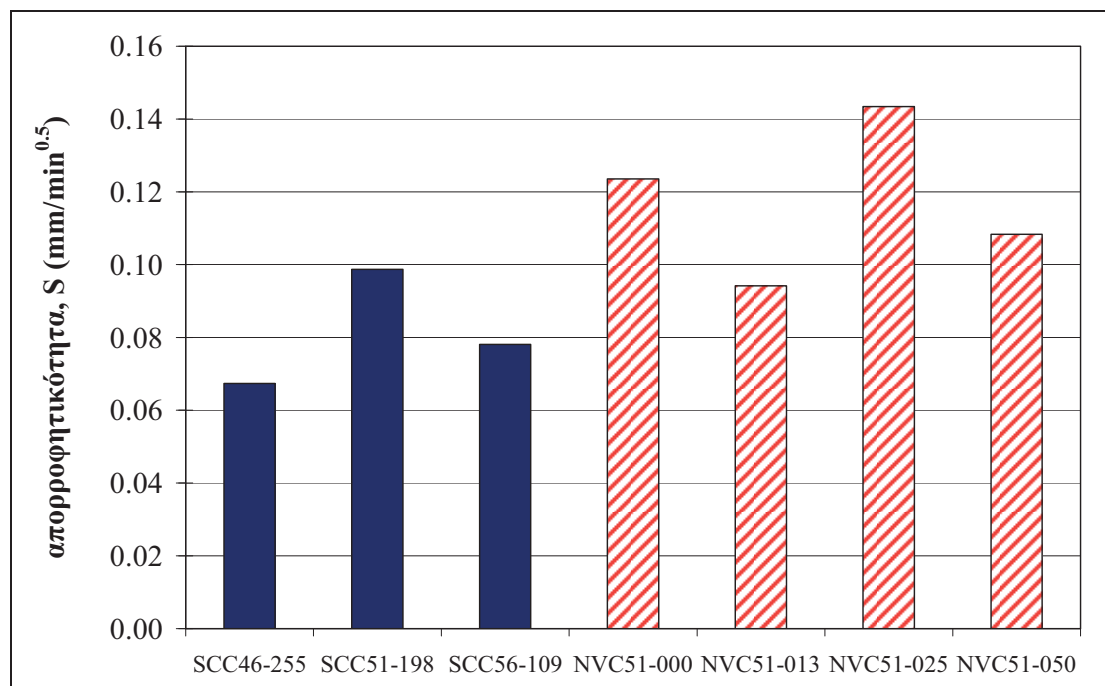


**Σχήμα 296** Απορροφητικότητα,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων E σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή τύπου σκυροδέματος

Στο **Σχήμα 297** παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), στις 28 ημέρες, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Πίνακας 43 και Πίνακας 44, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή. Υπενθυμίζεται ότι η ονοματολογία των συνθέσεων έχει δοθεί ως εξής

{ΤύποςΣκυροδέματος}  $w/b(\%)$ - $pce/b(\%)$ . Παρατηρείται ότι για τον ίδιο λόγο νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b = 0.51$ ), η απορροφητικότητα του ΑΣΣ είναι ίση ή μικρότερη από οποιαδήποτε τιμή απορροφητικότητας μετρήθηκε στο ΣΣ παρεμφερούς κοκκομετρίας (εξαιρουμένων των λεπτόκοκκων υλικών). Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ στο ΑΣΣ, το οποίο δρα φυσικά ως πληρωτικό υλικό και μειώνει το ανοιχτό πορώδες και, συνεπώς, την απορροφητικότητα.



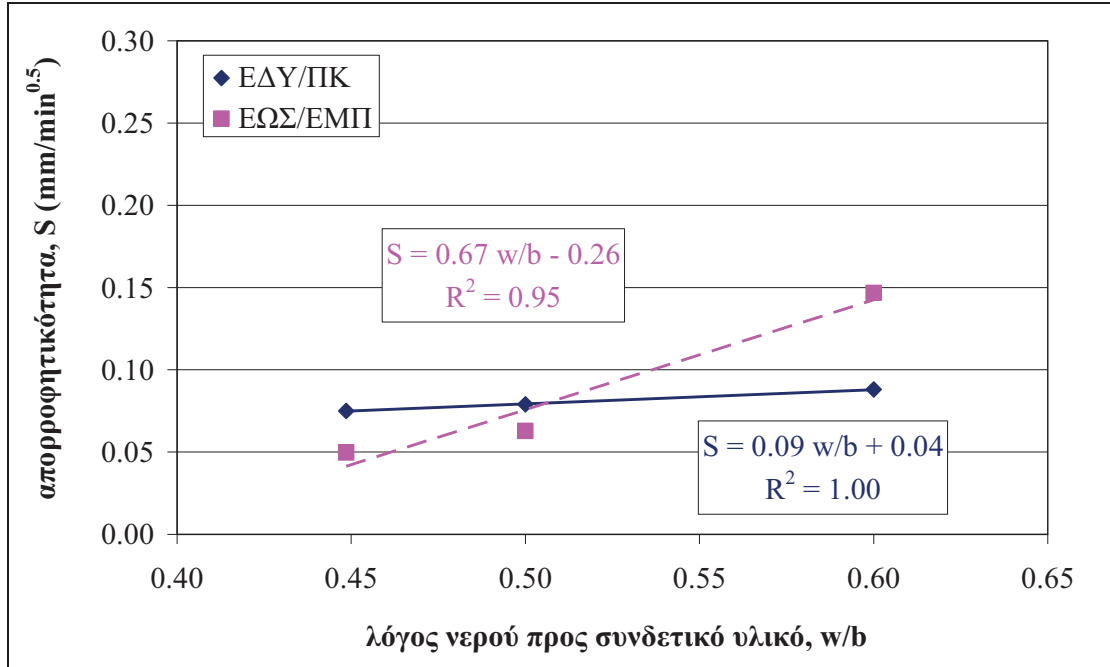
Σχήμα 297 Απορροφητικότητα,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων H σε ηλικία 28 ημερών

### Διεργαστηριακή σύγκριση

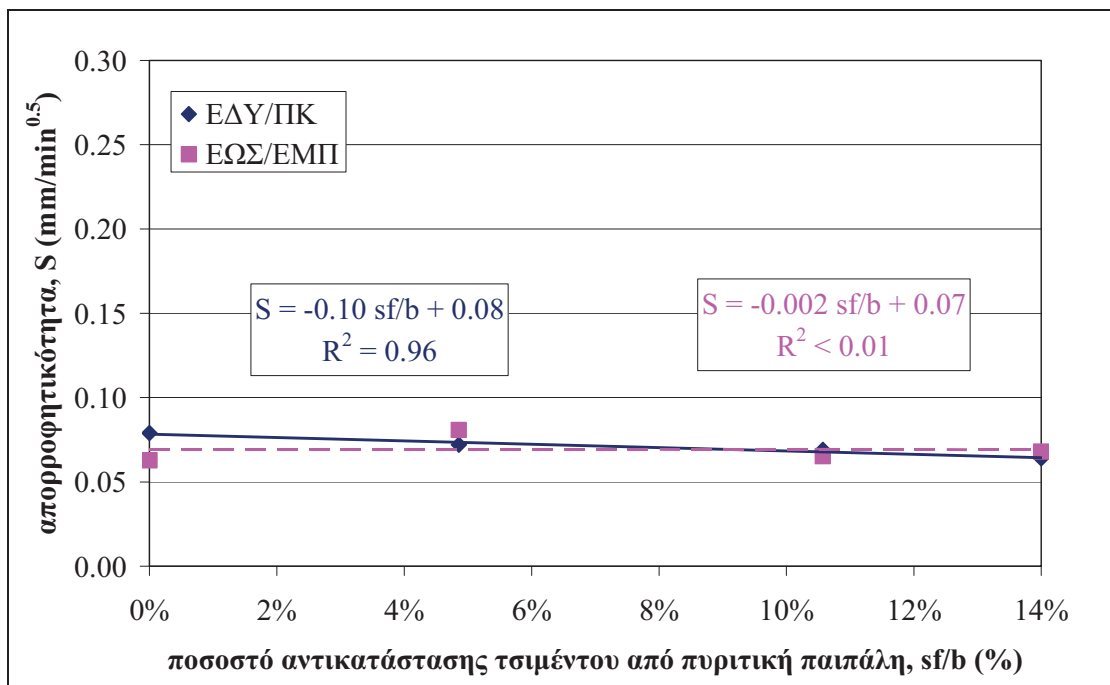
Στο Σχήμα 298 και στο Σχήμα 299 παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας,  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), σε ηλικία 28 ημερών, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων H (Πίνακας 45 και Πίνακας 46, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , και με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sfl$  { $sft+c$ } ή  $sfl/b$ .

Για την περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $w/b$  (Σχήμα 298), παρατηρείται μία σαφής αυξητική τάση της απορροφητικότητας για την περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ, αλλά εξαιρετικά ήπια στην περίπτωση του ΕΔΥ/ΠΚ. Η αυξητική τάση της απορροφητικότητας βρίσκεται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το ανοιχτό πορώδες (Παρ. 4.2.1.1), αν και πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός αύξησης της απορροφητικότητας είναι αναλογικά πολύ μεγαλύτερος στο ΕΩΣ/ΕΜΠ. Καθώς για τα μίγματα της αντίστοιχης υπο-ομάδας A (Σχήμα 287) υπολογίστηκαν παρεμφερείς τιμές για την απορροφητικότητα, εκτιμάται ότι η διαφορά οφείλεται σε πιθανή υποεκτίμηση της απορροφητικότητας για τη σύνθεση SCCWB3 ( $w/b = 0.60$ ) του ΕΔΥ/ΠΚ. Για την περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $sfl/b$  (Σχήμα 299), παρατηρείται μία σαφής, αν και εξαιρετικά ήπια και πρακτικώς αμελητέα, μείωση για την περίπτωση του ΕΔΥ/ΠΚ, ενώ, όπως και στην περίπτωση του ανοιχτού πορώδους, η μεωτική τάση είναι πολύ ηπιότερη και περισσότερο ασταθής για την περίπτωση του

ΕΩΣ/ΕΜΠ. Θα μπορούσε με ασφάλεια να υποθεθεί ότι για το εξεταζόμενο εύρος ποσοστών αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, η μεταβολή στην απορροφητικότητα είναι πρακτικώς αμελητέα και για τα δύο Εργαστήρια. Τα ευρήματα αυτά είναι σύμφωνα με τα αντίστοιχα ευρήματα για την υπο-ομάδα Β (Σχήμα 288).



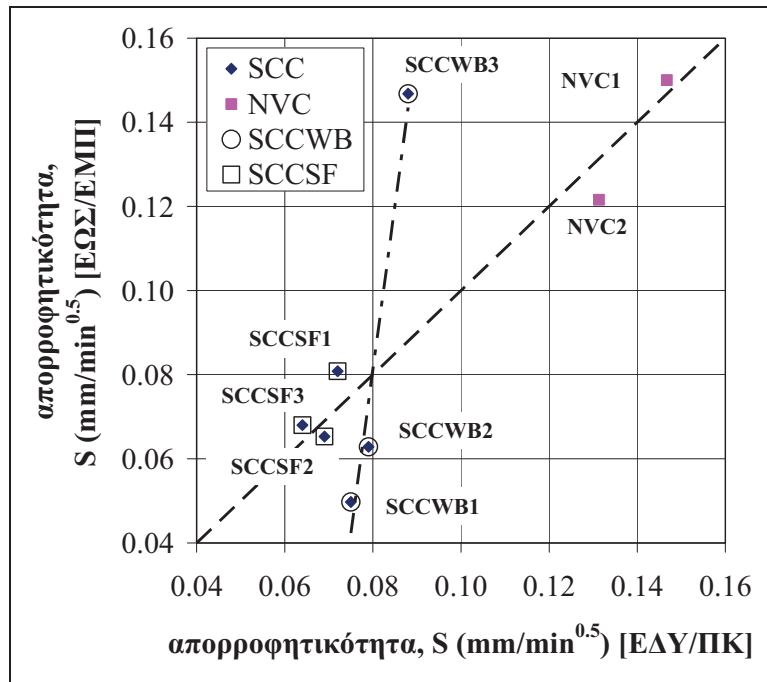
Σχήμα 298 Διεργαστηριακή σύγκριση απορροφητικότητας υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό λόγο νερού προς τσιμέντο σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 299 Διεργαστηριακή σύγκριση απορροφητικότητας υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη σε ηλικία 28 ημερών

Στο Σχήμα 300 παρουσιάζονται τα ζεύγη των τιμών της απορροφητικότητας 28 ημερών μεταξύ των δύο εργαστηρίων, ώστε να εκτιμηθεί η εγγύτητά τους (σύμπτωση

με τη διαγώνιο). Παρατηρείται ότι, για την περίπτωση των συνθέσεων ΑΣΣ με ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης (συνθέσεις SCCSF) και συνθέσεων NVC, οι μετρηθείσες απορροφητικότητες μεταξύ των δύο εργαστηρίων είναι παρεμφερείς. Για την περίπτωση των συνθέσεων με μεταβλητό λόγο  $w/b$  (συνθέσεις SCCWB) παρατηρείται ότι η απορροφητικότητα μεταξύ των δύο εργαστηρίων εμφανίζει σημαντικές διαφορές, με την επιρροή της περιεκτικότητας νερού να είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη στην περίπτωση του ΕΩΣ/ΕΜΠ. Υπενθυμίζεται, πάντως, ότι η τιμή της απορροφητικότητας της σύνθεσης SCCWB3 ( $w/b = 0.60$ ) για την περίπτωση του ΕΔΥ/ΠΚ θεωρείται αρκετά υποεκτιμημένη.



Σχήμα 300 Διεργαστηριακή σύγκριση απορροφητικότητας δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Η1 και Η2) σε ηλικία 28 ημερών

#### 4.2.1.3. Υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη πίεση

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

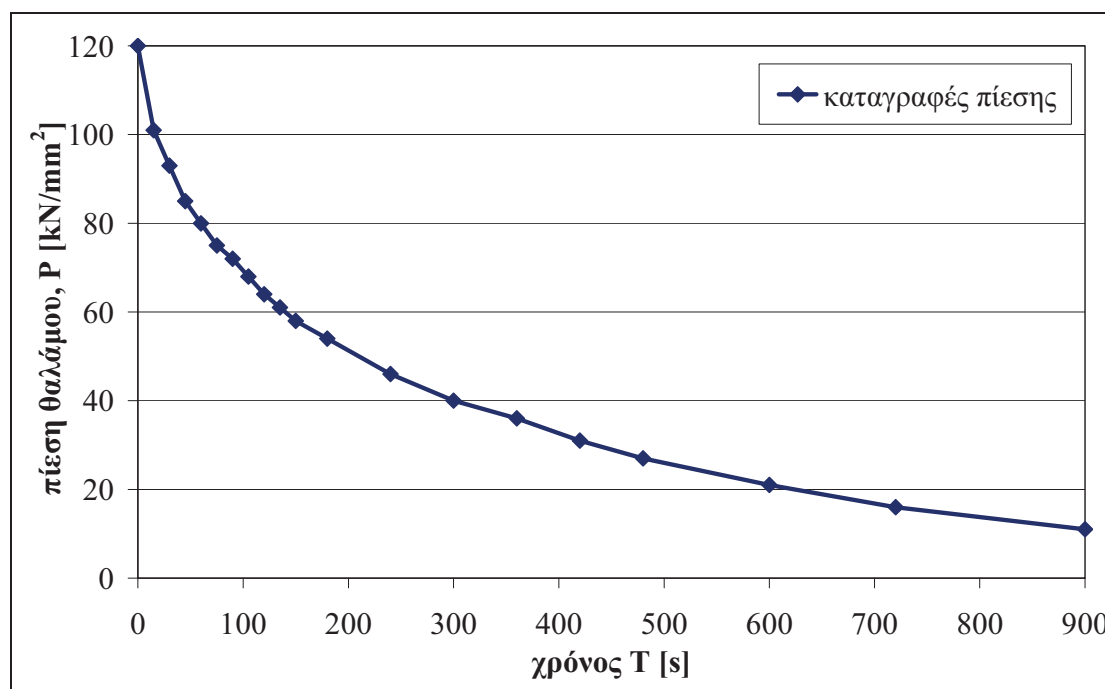
Η εκτίμηση της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε σε πρότυπα κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, μέσω δοκιμών μη σταθερής κατάστασης με χρήση της εργαστηριακής συσκευής GWT-4000 [Germann Instruments (1999), Σχήμα 301].



Σχήμα 301 Συσκευή υδατοαπορροφητικότητας: (α) σκαρίφημα [πηγή: Germann Instruments (1999)] (β) φωτογραφία από έλεγχο δοκιμίου (γ) λεπτομέρεια συσκευής GWT-4000.

Η δοκιμή υδατοπερατότητας αντικατοπτρίζει τη συνδυασμένη επιρροή τριών διαφορετικών παραγόντων: (α) της απορροφητικότητας, (β) του επιφανειακού πορώδους και (γ) της υδατοπερατότητας, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για την αξιολόγηση του «επιδερμικού σκυροδέματος» (skin concrete) [Germann Instruments (1999)]. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της δοκιμής αυτής αποτελεί η ευκολία εφαρμογής της επιτόπου του έργου, αν και θα πρέπει να διασφαλιστεί η προγενέστερη ξήρανση της ελεγχόμενης περιοχής. Επιπροσθέτως, σημαντική παράμετρο αποτελεί και η κατεύθυνση επιβολής της πίεσης (κατακόρυφα ή πλευρικά), καθώς σχετίζεται με τη συνεισφορά ή μη της βαρύτητας.

Σημειώνεται ότι η δοκιμή, όπως εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, δεν συμμορφώνεται με κάποια επίσημη μέθοδο εκτίμησης της υδατοπερατότητας, αν και παρεμφερείς, μη πρότυπες πάντως, μέθοδοι (Clam / Autoclam Permeability Tests) αναφέρονται στη βιβλιογραφία [Ramachandran and Beaudoin (2001), Romer (2005)]. Δεδομένης της παραδεκτής δυσκολίας της συνηθέστερα εφαρμοζόμενης πρότυπης μεθόδου EN 12350-8 (2009), που βασίζεται στην προγενέστερη πρότυπη γερμανική μέθοδο DIN 1048-5 (1991), λόγω της μεγάλης διασποράς που εμφανίζουν τα αποτελέσματά της, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εκτιμηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η ικανότητά της να αξιολογεί το σκυρόδεμα ως προς τη διαπερατότητά του σε νερό. Τα ευρήματα της παρούσας Διατριβής μπορούν να αποτελέσουν το έναυσμα για μια πιο ενδελεχή μελέτη (η οποία πάντως ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας Διατριβής, καθώς πρόκειται για εμπορική διάταξη). Η μεθοδολογία εκτέλεσης της δοκιμής συνοψίζεται ακολούθως.



Σχήμα 302 Τυπικό διάγραμμα πρωτογενών καταγραφών πίεσης κατά τη δοκιμή υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση

Μετά το πέρας της προκαθορισμένης συντήρησης, το υπό έλεγχο δοκίμιο ξηράνθηκε σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του, η οποία επιτυγχάνεται συμβατικά όταν η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου σε δύο διαδοχικές ημερήσιες μετρήσεις υπολογίζεται

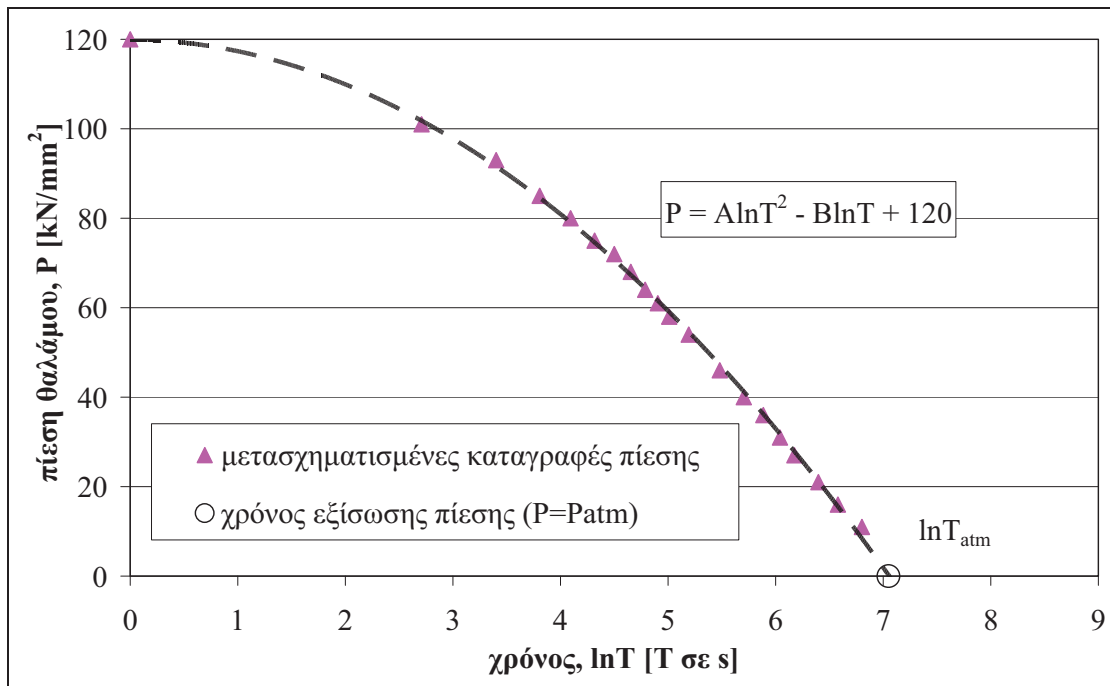
μικρότερη από 0.1 %. Στη συνέχεια, ο πειραματικός θάλαμος πίεσης εφαρμόστηκε ερμητικά σε μία πλευρά του δοκιμίου (κάθετη στη φορά σκυροδέτησης) και πληρώθηκε με απιονισμένο νερό. Μέσω περιστροφής ειδικού δακτυλίου επί της διάταξης εφαρμόστηκε αρχική πίεση νερού, η οποία για τα πειράματα της παρούσας Διατριβής καθορίστηκε σε  $P_{init} = 120 \text{ kN/mm}^2$  (1.2 bar). Στη συνέχεια, μέσω του δικτύου πόρων, αλλά και της παρουσίας επιφανειακών μικρορωγμών, το νερό διείσδυε στο σκυρόδεμα, οδηγώντας σε σταδιακή πτώση της πίεσης με τον χρόνο,  $T$  (s). Η πίεση,  $P$  ( $\text{kN/mm}^2$ ), καταγραφόταν για συνολικά δεκαπέντε λεπτά σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Ένα τυπικό διάγραμμα καταγραφών πίεσης συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 302**.

Η προτεινόμενη μέθοδος από τον κατασκευαστή, που αφορά στη χρήση του μικρομετρητή (βερνιέρου) μεταβολής του όγκου για τη διατήρηση σταθερής πίεσης, εφαρμόστηκε μόνο δοκιμαστικά σε επιλεγμένες περιπτώσεις, καθώς κρίθηκε ως μη ικανοποιητική, λόγω: (α) του μεγάλου απαιτούμενου χρόνου επαναφοράς της πίεσης στην αρχική τιμή (μέσω περιστροφής του μικρομετρητή) και (β) της δυσκολίας ανάγνωσης της ένδειξης, που περιορίζει τη δυνατότητα γρήγορων διαδοχικών μετρήσεων κατά τα πρώτα (κρίσιμα) δευτερόλεπτα.

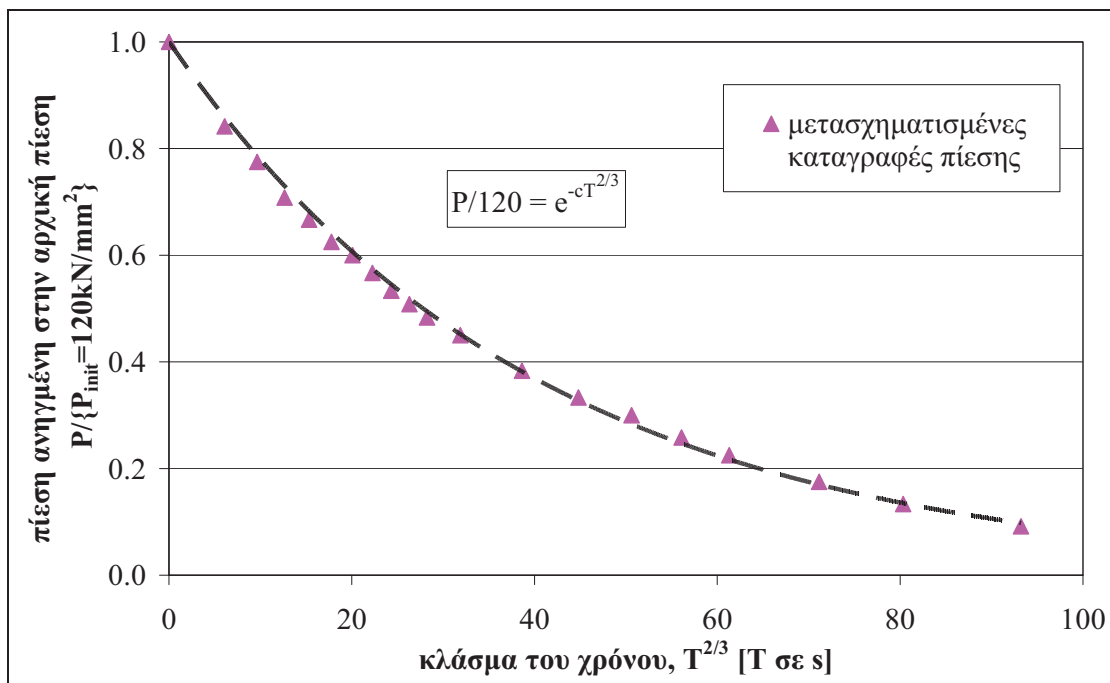
Οι πρωτογενείς καταγραφές από τις δοκιμές υδατοπερατότητας αξιολογήθηκαν με δύο διαφορετικές μεθόδους, όπως αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής:

- **μέσω του χρόνου εξίσωσης πίεσης  $\ln T_{atm}$ :** Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 303**, η καμπύλη πίεσης συναρτήσει του χρόνου (**Σχήμα 302**) μπορεί να μετασχηματιστεί, ώστε ο οριζόντιος άξονας (χρόνος) να εκφράζεται ως ο φυσικός λογάριθμος του χρόνου,  $\ln T$  ( $T$  σε s). Στη συνέχεια, προσαρμόζεται, μέσω παλινδρόμησης, η δευτέρας τάξης πολυωνυμική καμπύλη, μέσω της οποίας υπολογίζεται η χρονική στιγμή εξίσωσης της πίεσης  $P$  με την ατμοσφαιρική πίεση  $P_{atm}$ ,  $\ln T_{P=P_{atm}}$  ( $T$  σε s), ή, εν συντομία,  $\ln T_{atm}$ . Ο υπολογιζόμενος χρόνος  $\ln T_{atm}$  ορίζεται, για το σκοπό της παρούσας Διατριβής, ως «χρόνος εξίσωσης πίεσης» (με την ατμοσφαιρική). Υψηλότεροι χρόνοι εξίσωσης πίεσης συνεπάγονται λιγότερο διαπερατό σε νερό σκυρόδεμα.
- **μέσω του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας  $c$ :** Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 304**, η πίεση,  $P$  ( $\text{kN/mm}^2$ ), κανονικοποιείται στην αρχικώς επιβληθείσα πίεση,  $P_{init} = 120 \text{ kN/mm}^2$ , ενώ ο οριζόντιος άξονας (χρόνος) μετασχηματίζεται σε κλάσμα του χρόνου,  $T^{2/3}$  ( $T$  in s). Στη συνέχεια, προσαρμόζεται, μέσω παλινδρόμησης, εκθετική καμπύλη, στην οποία επιβάλλεται οριακή συνθήκη να διέρχεται από τη μονάδα κατά την έναρξη της δοκιμής ( $P = P_{init}$  για  $T^{2/3} = 0$  s). Ο υπολογιζόμενος εκθετικός συντελεστής,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), αποτελεί ένα μέτρο της απώλειας πίεσης με τον χρόνο και, για το σκοπό της παρούσας Διατριβής, ορίζεται ως «εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας». Χαμηλές τιμές του συντελεστή συνεπάγονται λιγότερο διαπερατό σκυρόδεμα (αδιαπέρατο σκυρόδεμα για  $c = 0$ ).





Σχήμα 303 Ορισμός χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T$  σε  $s$ ), με την ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 304 Ορισμός εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας  $c$

### Γενική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 111 περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των συνθέσεων που ελέγχθηκαν ως προς την υδαταπορροφητικότητα τους υπό μεταβαλλόμενη πίεση, μέσω των εκτιμητριών του χρόνου εξίσωσης πίεσης και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας, όπως ορίστηκαν παραπάνω. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 261 μετρήσεις σε 43 συνθέσεις (31 συνθέσεις ΑΣΣ και 12 συνθέσεις ΣΣ).

Η συντήρηση όλων των δοκιμών είχε πραγματοποιηθεί, κατά περίπτωση, σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) ή/ και σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) μέχρι τον έλεγχό τους. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, σε ηλικία 7, 28, 56 ή 360 ημερών. Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν συνολικά είκοσι μετρήσεις σε διάστημα δεκαπέντε λεπτών.

**Πίνακας 111** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την υδαταπορροφητικότητά τους μέσω της μεθόδου διείσδυσης ύδατος υπό πίεση (GWT-4000).

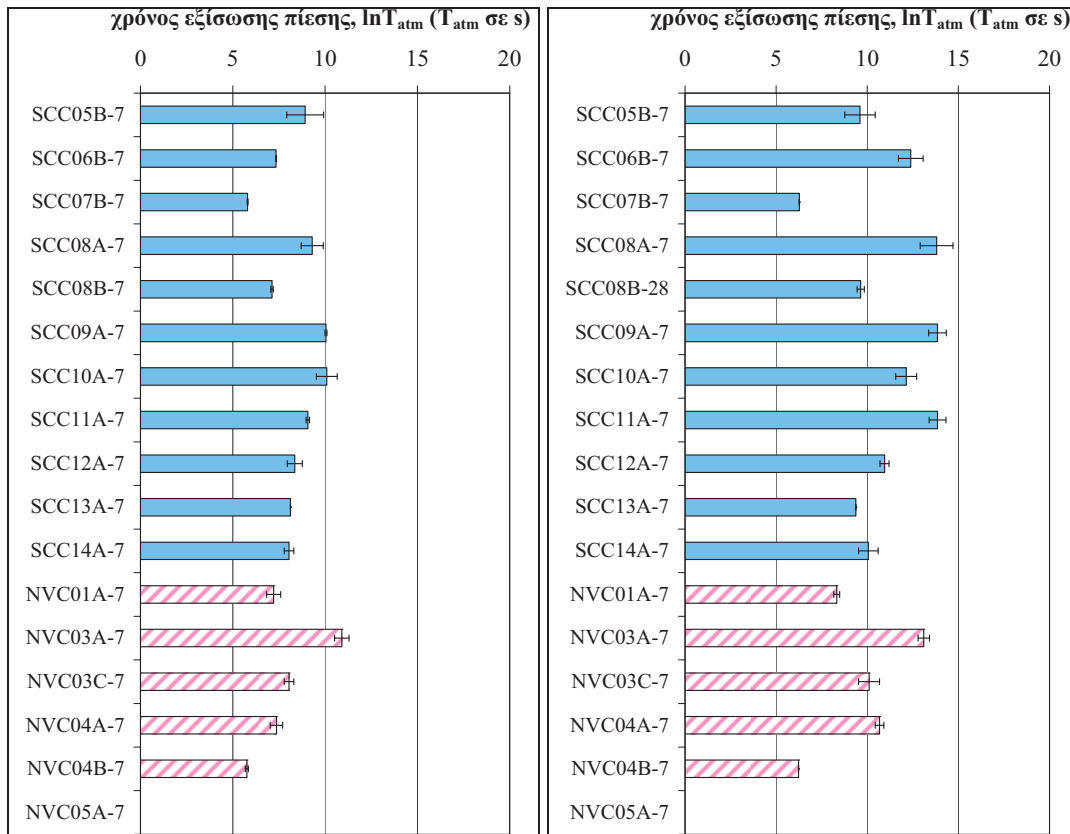
Τύπος Σκυροδέματος Συντήρηση	Μίγματα SCC			Μίγματα NVC		
	ΠΕ + ΔΝ	ΔΝ		ΠΕ + ΔΝ	ΔΝ	
Κωδικοί	SCC05(3) <sup>6+6</sup>	SCC26(1) <sup>1</sup>	SCC45(2) <sup>4</sup>	NVC01(3) <sup>6+6</sup>	NVC11(1) <sup>1</sup>	
Συνθέσεων	SCC06(3) <sup>6+6</sup>	SCC27(1) <sup>1</sup>	SCC47(2) <sup>7</sup>	2xNVC03(3) <sup>12+12</sup>	NVC12(1) <sup>1</sup>	
	SCC07(3) <sup>6+3</sup>	SCC28(1) <sup>1</sup>	SCC48(2) <sup>5</sup>	2xNVC04(3) <sup>12+9</sup>	NVC13(1) <sup>1</sup>	
	2xSCC08(3) <sup>12+12</sup>	SCC29(1) <sup>1</sup>	SCC49(2) <sup>5</sup>	NVC05(2) <sup>3+3</sup>	NVC14(1) <sup>1</sup>	
	SCC09(3) <sup>6+6</sup>	SCC30(1) <sup>1</sup>	SCC50(2) <sup>6</sup>		NVC15(2) <sup>6</sup>	
	SCC10(3) <sup>6+6</sup>	SCC31(1) <sup>1</sup>	SCC51(2) <sup>5</sup>		NVC16(2) <sup>5</sup>	
	SCC11(3) <sup>6+6</sup>	SCC32(1) <sup>1</sup>	SCC52(2) <sup>5</sup>			
	SCC12(3) <sup>6+6</sup>	SCC33(1) <sup>1</sup>	SCC53(2) <sup>6</sup>			
	SCC13(3) <sup>3+3</sup>	SCC34(1) <sup>1</sup>	SCC54(2) <sup>6</sup>			
	SCC14(3) <sup>6+6</sup>	SCC35(1) <sup>1</sup>				
		SCC36(1) <sup>1</sup>				
	<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	11	20	6	6	<b>43</b>
		(63+60 μετρ.)	(60 μετρ.)	(33+30 μετρ.)	(15 μετρ.)	<b>(261 μετρ.)</b>

\*σε παρένθεση αναγράφεται το πλήθος των ελεγχόμενων ηλικιών (7, 28, 56, 90 ή/ και 360 ημέρες) και σε δύναμη το πλήθος των επιμέρους μετρήσεων

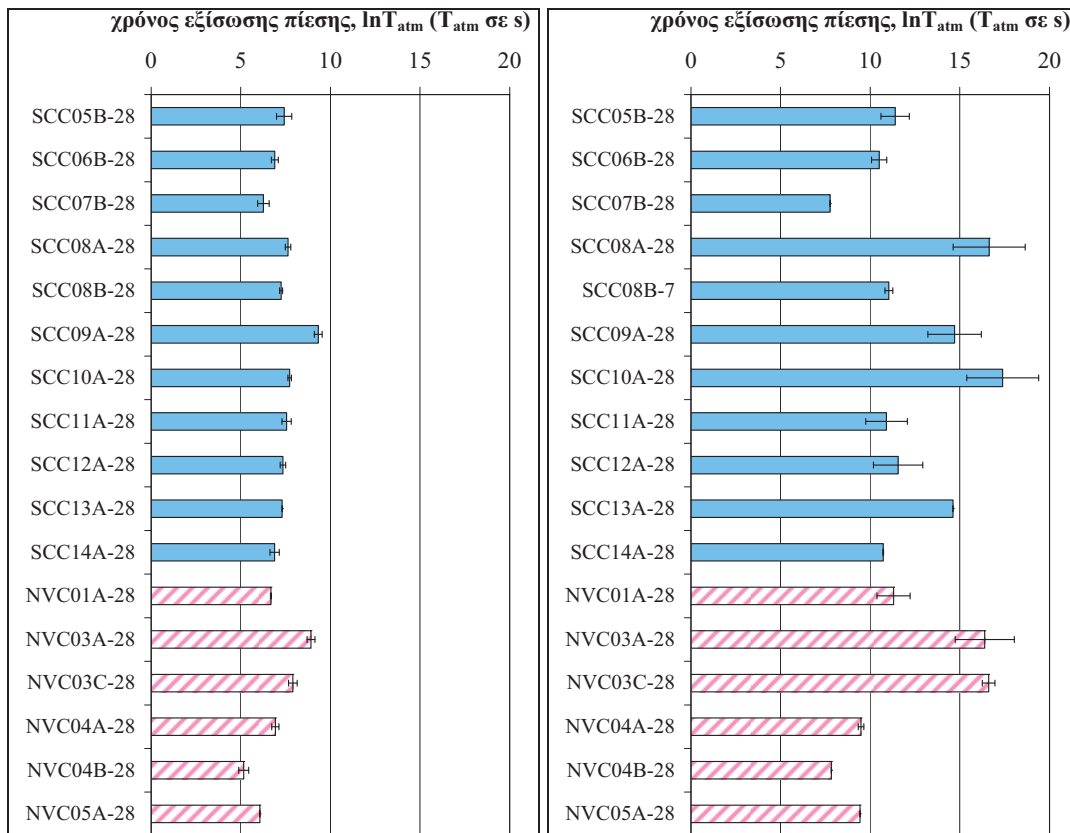
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T$  σε s), καθώς και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), αναλόγως της μεθόδου συντήρησης, για τις διάφορες ηλικίες ελέγχου. Στα Σχήματα περιλαμβάνονται, επιπλέον, και τα εύρη των τιμών από τις διαδοχικές μετρήσεις στις διάφορες πλευρές του δοκιμίου.

Συγκεκριμένα, από το Σχήμα 305 έως το Σχήμα 307 παρουσιάζονται οι τιμές  $\ln T_{atm}$ , συγκριτικά για τις δύο μεθόδους συντήρησης, στις ηλικίες 7, 28 και 56 ημερών, αντίστοιχα, ενώ στο Σχήμα 308 παρουσιάζονται οι τιμές  $\ln T_{atm}$  για τις συνθέσεις που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν στις 28 και τις 360 ημέρες.

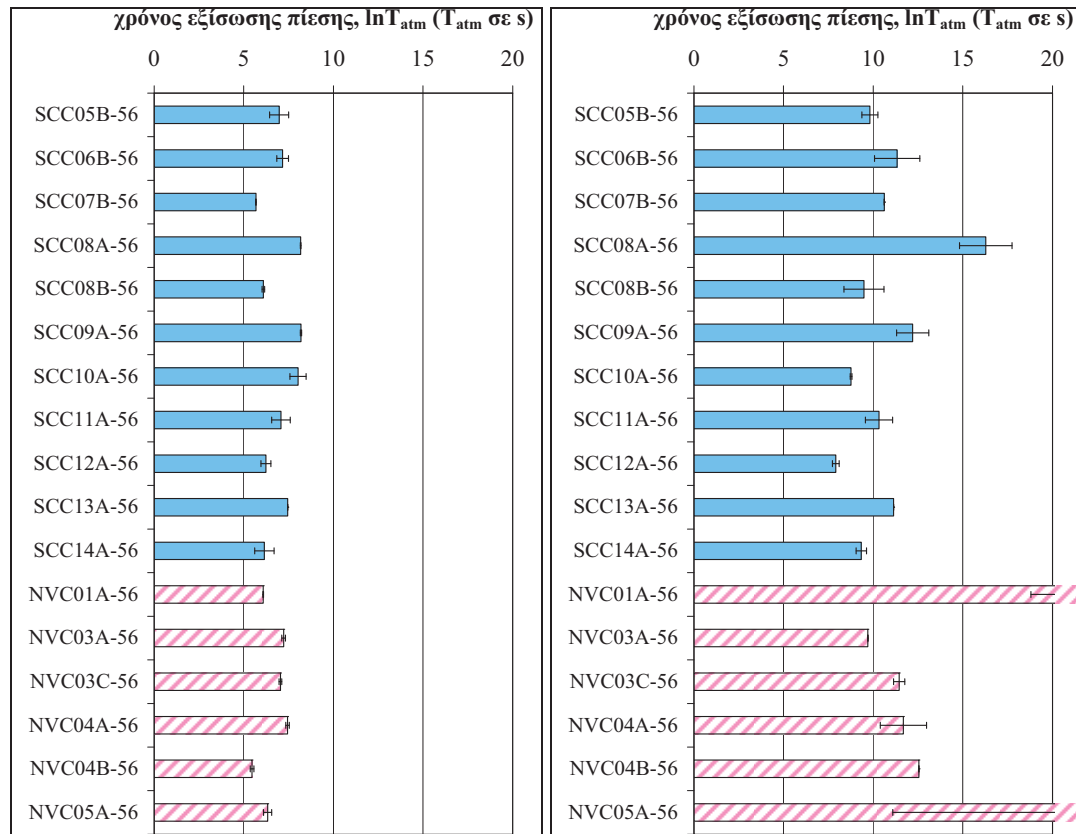
Αντίστοιχα, οι τιμές του συντελεστή  $c$  για τις διάφορες συνθέσεις παρουσιάζονται από το Σχήμα 309 έως το Σχήμα 311 συγκριτικά για τις δύο μεθόδους συντήρησης, στις ηλικίες 7, 28 και 56 ημερών, ενώ στο Σχήμα 312 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή  $c$  για τις συνθέσεις που συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν στις 28 και τις 360 ημέρες.



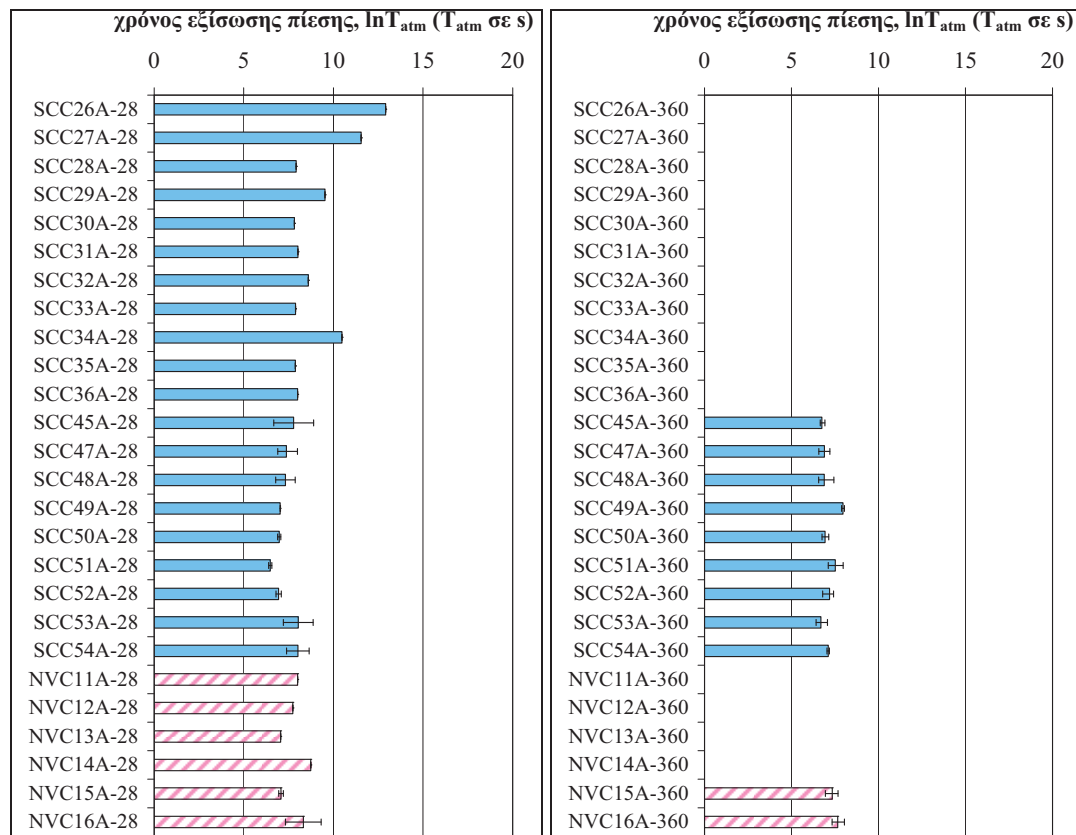
Σχήμα 305 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 7 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



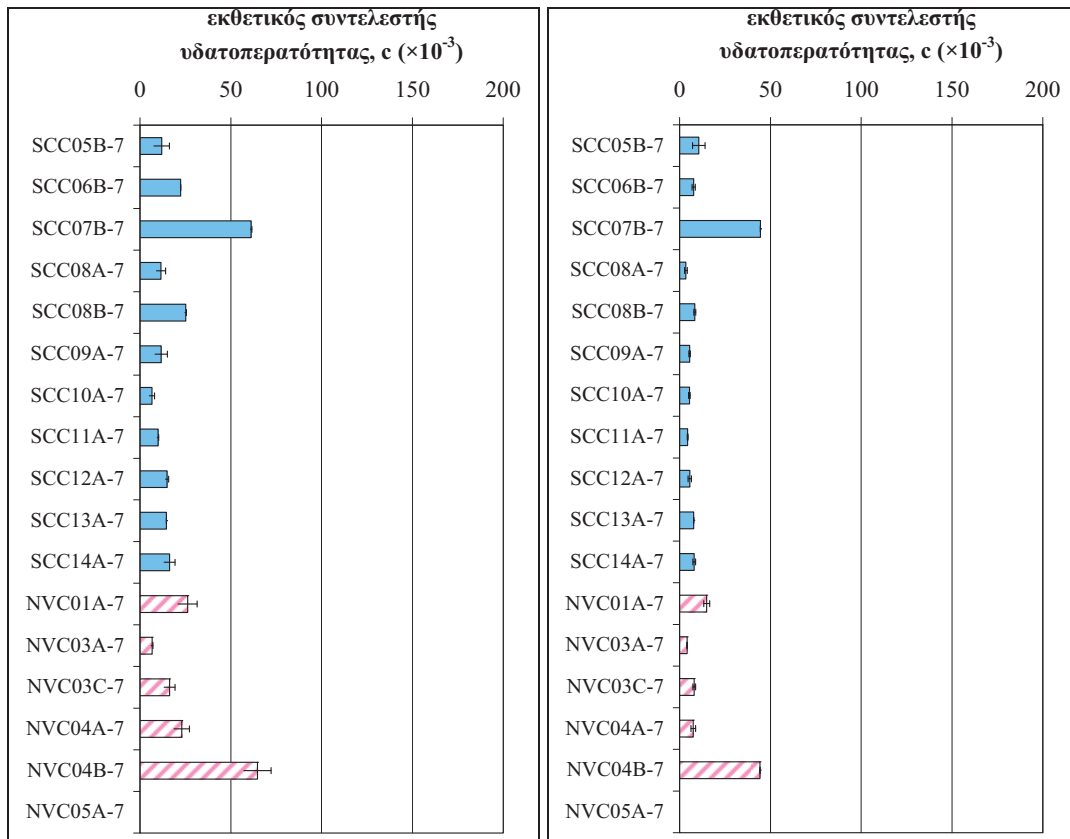
Σχήμα 306 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



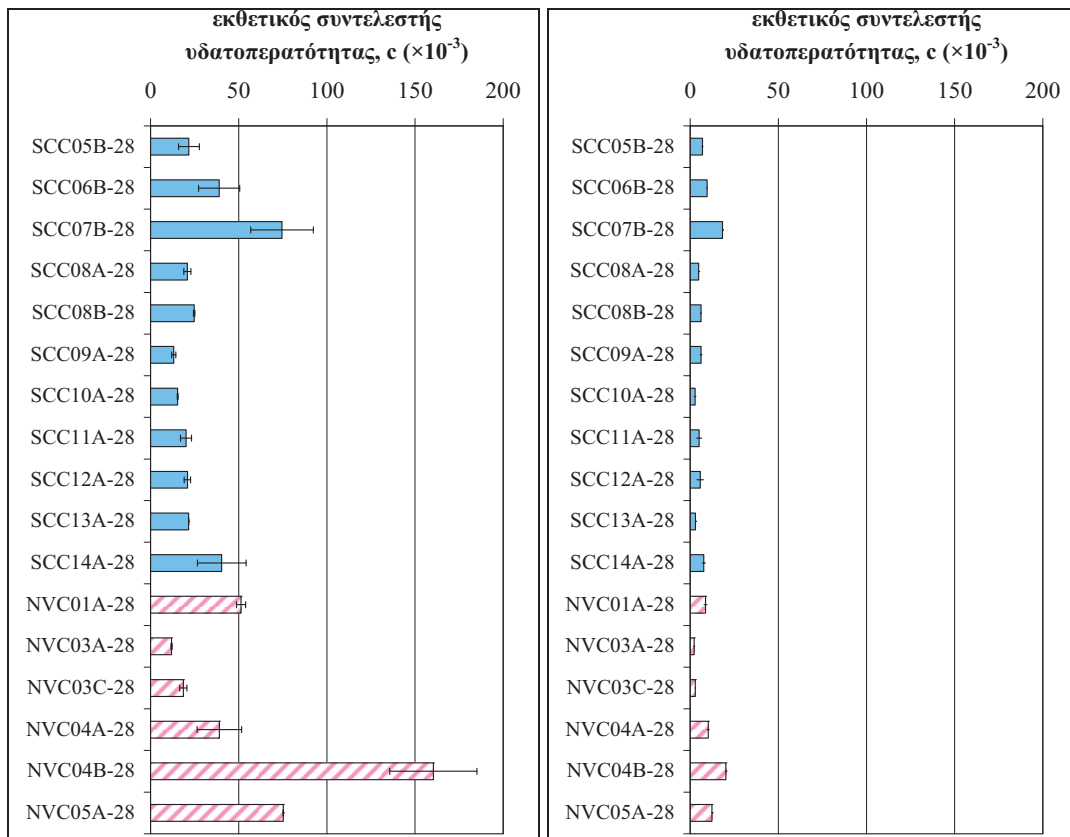
**Σχήμα 307** Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 56 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



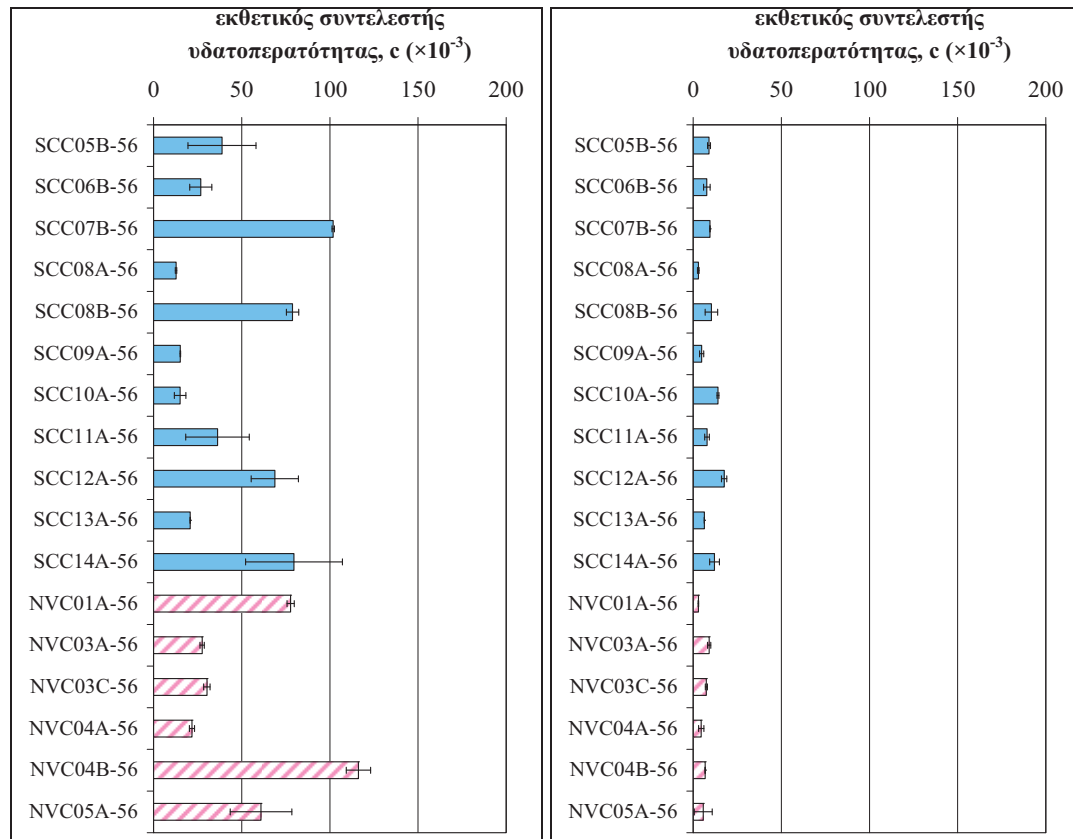
**Σχήμα 308** Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών



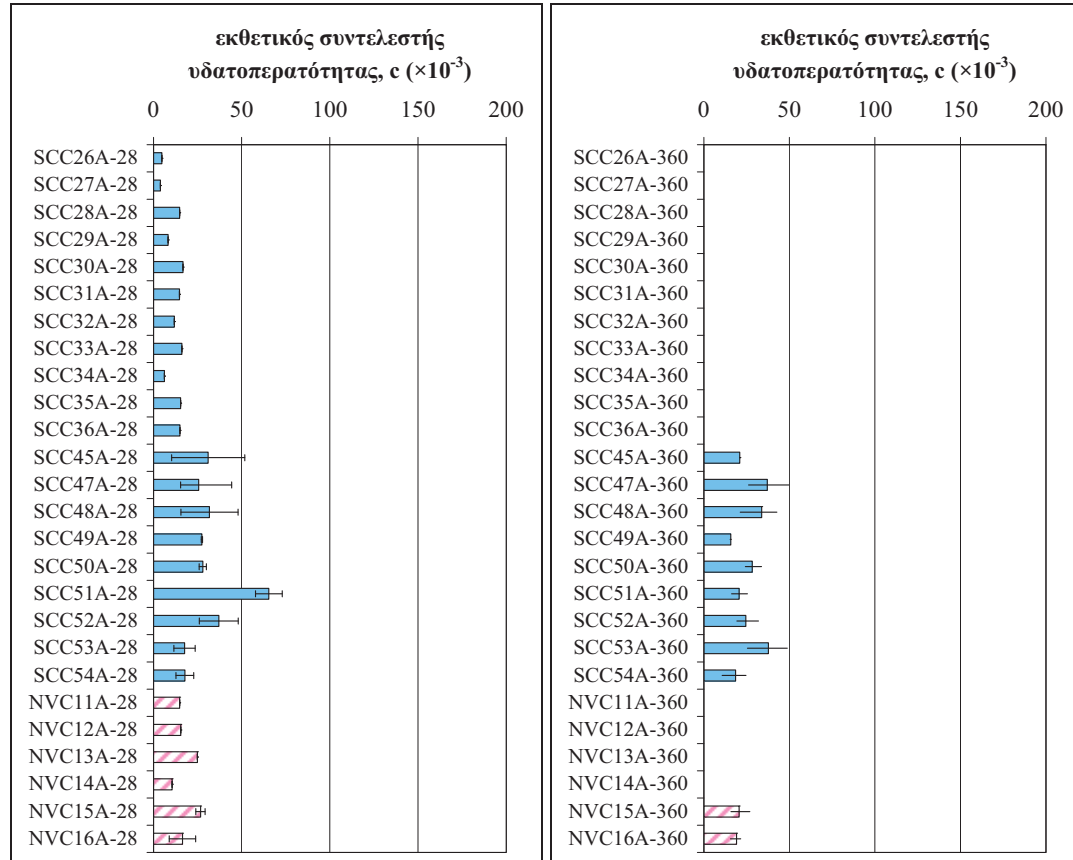
**Σχήμα 309** Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας  $c$  δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 7 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



**Σχήμα 310** Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας  $c$  δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



**Σχήμα 311** Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας  $c$  δοκιμών συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 56 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



**Σχήμα 312** Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας  $c$  δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία (α) 28 ημερών και (β) 360 ημερών

### Συσχέτιση με χαρακτηριστικά σύνθεσης

Τόσο ο χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), όσο και ο εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), συσχετίστηκαν με διάφορα χαρακτηριστικά των συνθέσεων και, συγκεκριμένα, με: **(i)** τον λόγο άμμου προς τα συνολικά αδρανή,  $s/a$ , **(ii)** τον λόγο χονδρόκοκκων αδρανών προς τα συνολικά αδρανή,  $g/a$ , **(iii)** τον λόγο πάστας προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $p/w_{\text{tot}}$ , **(iv)** τον λόγο κονιάματος προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $m/w_{\text{tot}}$ , **(v)** τον λόγο τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$ , **(vi)** τον λόγο τσιμέντου προς λεπτόκοκκα,  $c/f$ , **(vii)** τον λόγο λεπτόκοκκων προς το συνολικό βάρος,  $f/w_{\text{tot}}$ , **(viii)** τον λόγο συνδετικού υλικού προς το συνολικό βάρος,  $b/w_{\text{tot}}$ , **(ix)** τον λόγο νερού προς τσιμέντο,  $w/c$ , και **(x)** τη μέση θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  ( $\text{N/mm}^2$ ). Δεν παρατηρήθηκε καμία αξιολογή συσχέτιση μεταξύ των παραπάνω μεγεθών στο σύνολο των μιγμάτων.

Κατ' αντιστοιχία με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά την αξιολόγηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στο ανοιχτό πορώδες και στην απορροφητικότητα, θα αναζητηθούν ακολούθως γραμμικές εξισώσεις της μορφής των **Εξισώσεων (4.12)** και **(4.13)** που να συνδέουν το χρόνο εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$ , και τον εκθετικό συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$ , αφενός με όλες τις παραπάνω μεταβλητές, πλην της αντοχής, και αφετέρου με όλες τις επιμέρους ποσότητες των συστατικών των μιγμάτων.

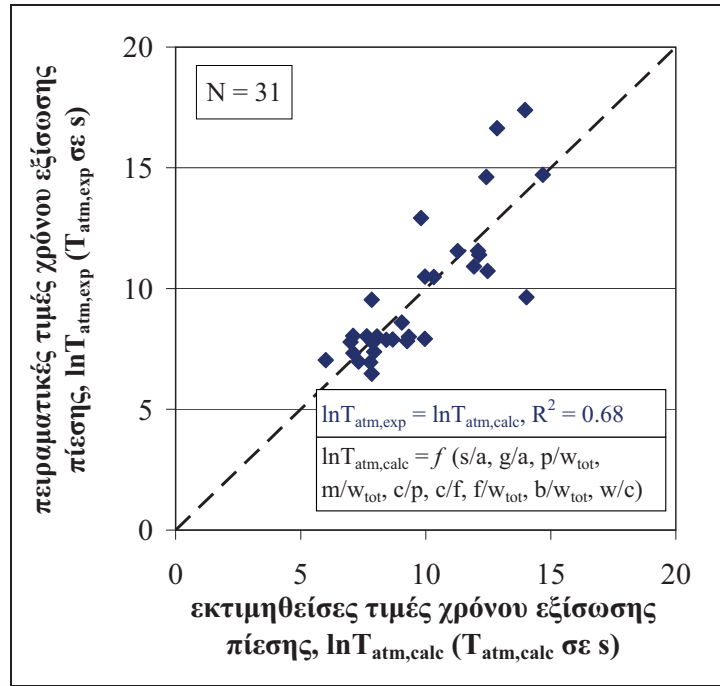
$$\begin{aligned} \ln T_{\text{atm,calc}} \text{ ή } c_{\text{calc}} = & \alpha_1 (s/a) + \alpha_2 (g/a) + \alpha_3 (p/w_{\text{tot}}) + \alpha_4 (m/w_{\text{tot}}) + \alpha_5 (c/p) + \\ & + \alpha_6 (c/f) + \alpha_7 (f/w_{\text{tot}}) + \alpha_8 (b/w_{\text{tot}}) + \alpha_9 (w/c) + \alpha_{10} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\ln T_{\text{atm,calc}} \text{ ή } c_{\text{calc}} = \beta_1 c + \beta_2 lp + \beta_3 sf + \beta_4 mk + \beta_5 s + \beta_6 g1 + \beta_7 g2 + \beta_8 w + \beta_9 pce + \beta_{10} \quad (4.13)$$

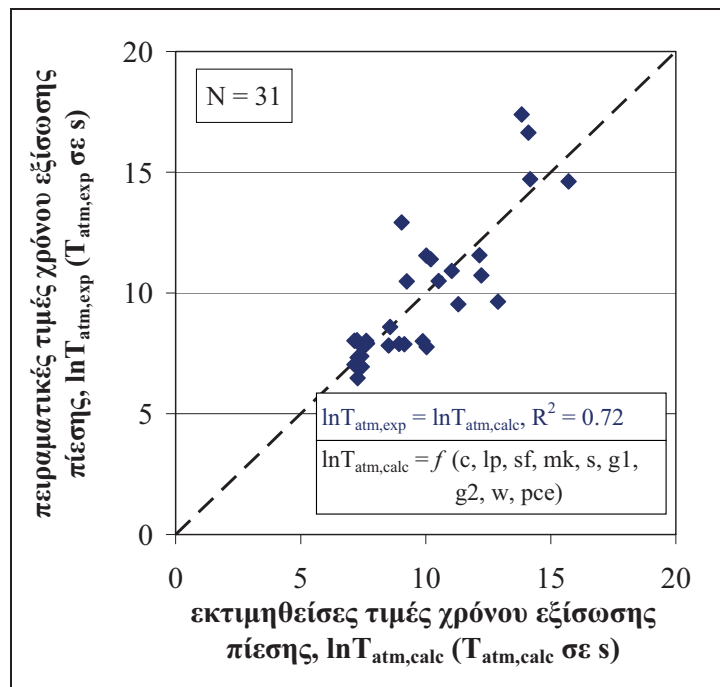
Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha_i$  και  $\beta_j$  ( $i, j = 1$  έως  $10$ ) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\alpha_i$  και  $\beta_j$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για το χρόνο εξίσωσης πίεσης ή τον συντελεστή υδατοπερατότητας 28 ημερών (πλήθος  $N = 31$ ),  $\ln T_{\text{atm,exp}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s) ή  $c_{\text{exp}}$  ( $\times 10^{-3}$ ), αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης για το χρόνο εξίσωσης πίεσης φαίνονται στο **Σχήμα 313** για την περίπτωση συσχέτισης με τους χαρακτηριστικούς λόγους των συστατικών της σύνθεσης και στο **Σχήμα 314** για την περίπτωση εκτίμησης του χρόνου εξίσωσης πίεσης μέσω των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον εκθετικό συντελεστή υδατοπερατότητας φαίνονται στο **Σχήμα 315** και στο **Σχήμα 316**. Ο **Πίνακας 112** και ο **Πίνακας 113** περιλαμβάνουν τις τιμές των συντελεστών  $\alpha_i$  και  $\beta_j$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση για την περίπτωση του χρόνου εξίσωσης πίεσης και του συντελεστή υδατοπερατότητας, αντίστοιχα.



**Σχήμα 313** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm,calc}$  ( $T_{atm}$  σε s), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεϊ των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $\ln T_{atm,exp}$

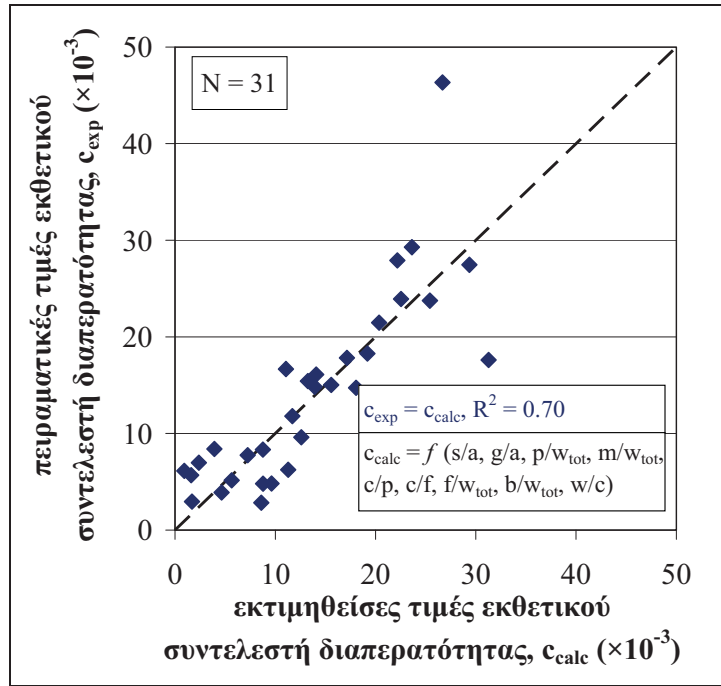


**Σχήμα 314** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm,calc}$  ( $T_{atm}$  σε s), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεϊ των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές,  $\ln T_{atm,exp}$

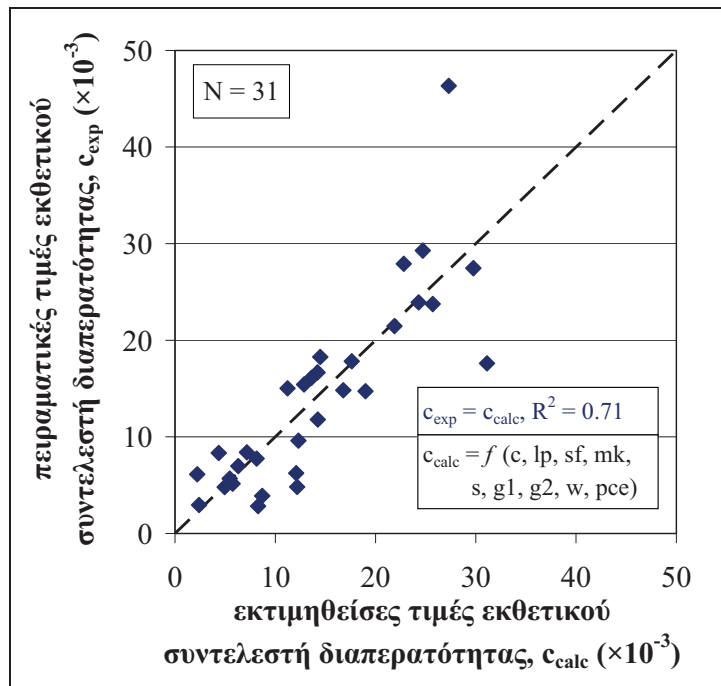
**Πίνακας 112** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm,calc}$  ( $T_{atm}$  σε s), συναρτήσεϊ των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$  και  $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$  και  $\beta_j^*$ )

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_i$	14.16	125.50	246.89	109.78	25.75	-46.17	-354.77	-85.84	-41.28	-63.53
$\beta_j$	0.046	0.046	0.050	0.032	0.029	0.058	0.077	-0.018	0.341	-80.262





Σχήμα 315 Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c_{calc}$  ( $\times 10^{-3}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $c_{exp}$



Σχήμα 316 Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c_{calc}$  ( $\times 10^{-3}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές,  $c_{exp}$

Πίνακας 113 Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού του συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c_{calc}$  ( $\times 10^{-3}$ ), συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$  και  $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$  και  $\beta_j^*$ )

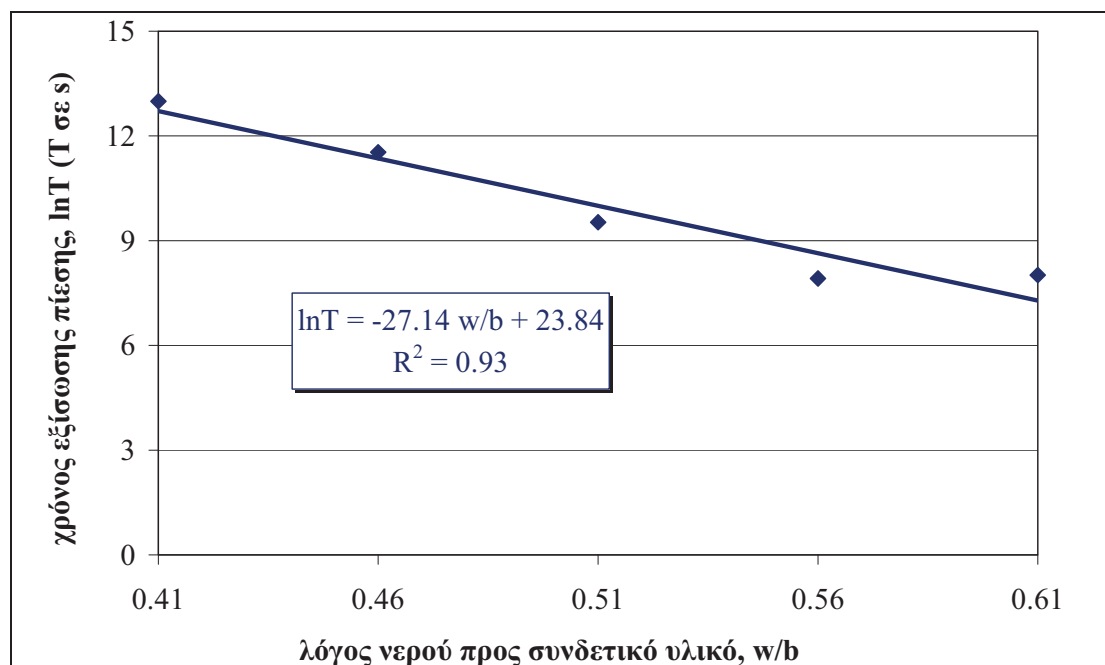
i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_i$	686,18	-96,11	18,04	-871,91	49,29	-19,98	793,20	-85,77	92,41	66,86
$\beta_i$	-0,073	-0,096	-0,057	0,120	-0,041	-0,133	-0,203	0,098	-0,914	177,715

Από τα Σχήματα που προηγήθηκαν είναι σαφές ότι τόσο ο πειραματικός χρόνος εξίσωσης πίεσης όσο και ο πειραματικός συντελεστής υδατοπερατότητας μπορούν να εκτιμηθούν υπολογιστικά με αρκετά υψηλούς συντελεστές συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών ( $0.68 < R^2 < 0.72$ ), από τους χαρακτηριστικούς λόγους των συστατικών (Σχήμα 313, Σχήμα 315) ή τις περιεκτικότητές τους (Σχήμα 314, Σχήμα 316).

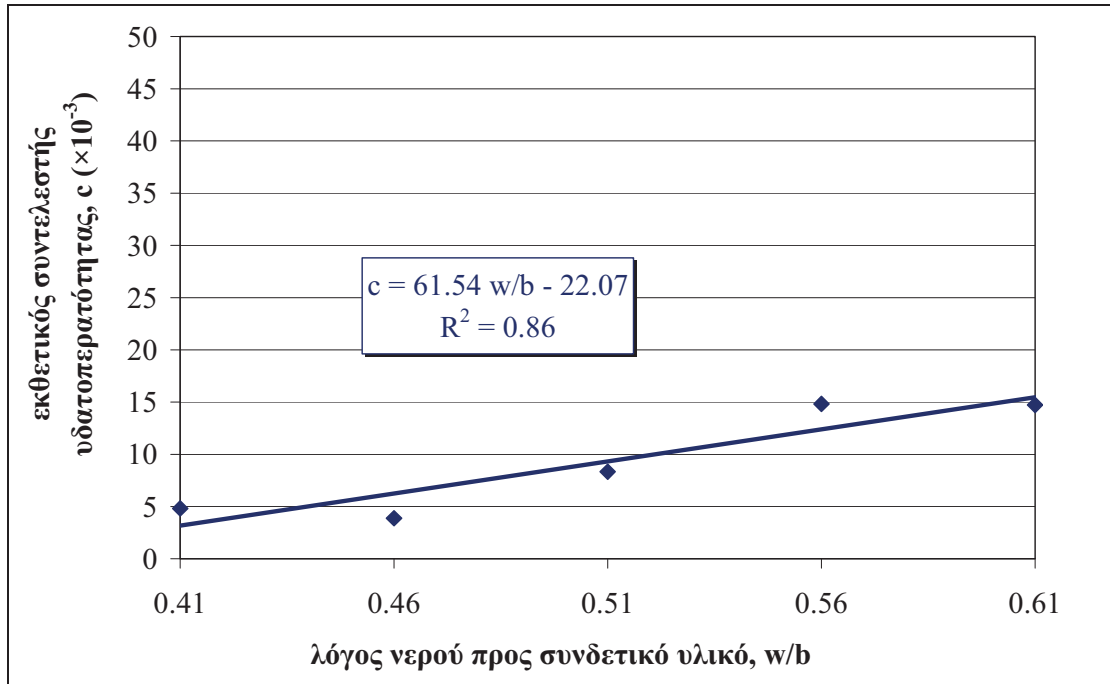
Στη συνέχεια, εξετάζονται οι παράμετροι που διερευνήθηκαν σε κάθε υπο-ομάδα συνθέσεων ξεχωριστά, ήτοι: **(α)** ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , **(β)** ο λόγος πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , **(γ)** ο λόγος μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/b$ , **(δ)** ο λόγος μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk/lp\}$ , σε μίγματα ΑΣΣ και **(ε)** ο λόγος υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε μίγματα ΣΣ. Επιπλέον, **(στ)** εξετάζονται συγκριτικά τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b = 0.51$  και παρεμφερή θλιπτική αντοχή,  $f_{cc} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ .

### Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

Στο Σχήμα 317 και στο Σχήμα 318 παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), αντίστοιχα, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Α (Πίνακας 37, Κεφ. 2), με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ . Παρατηρείται ότι, για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ , ο χρόνος  $\ln T_{\text{atm}}$  μειώνεται (Σχήμα 317,  $R^2 = 0.86$ ), ενώ ο συντελεστής  $c$  αυξάνεται (Σχήμα 318,  $R^2 = 0.93$ ), γεγονός που μεταφράζεται σε αύξηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε νερό. Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι σύμφωνα με τα αντίστοιχα ευρήματα για το ανοιχτό πορώδες (Παρ. 4.2.1.1) και την απορροφητικότητα (Παρ. 4.2.1.2).



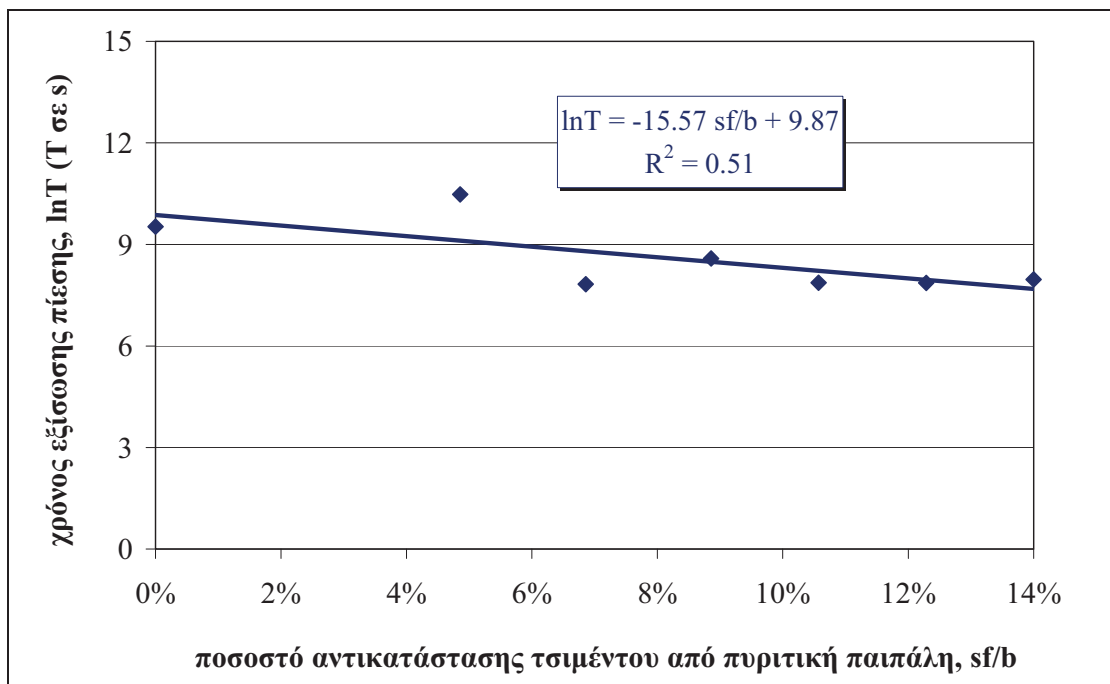
Σχήμα 317 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), δοκίμιων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών



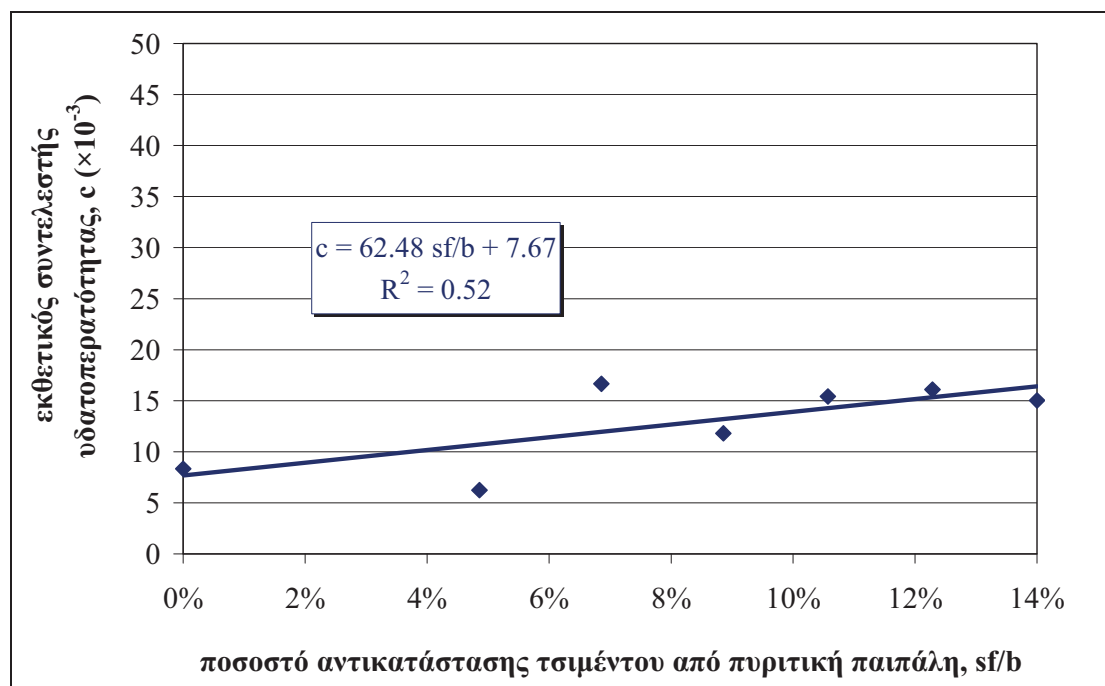
Σχήμα 318 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών

#### Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

Στο Σχήμα 319 και στο Σχήμα 320 παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), αντίστοιχα, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Β1 (Πίνακας 38, Κεφ. 2), με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/\{sf+c\}$  ή  $sf/b$ .



Σχήμα 319 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 320 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων B σε ηλικία 28 ημερών

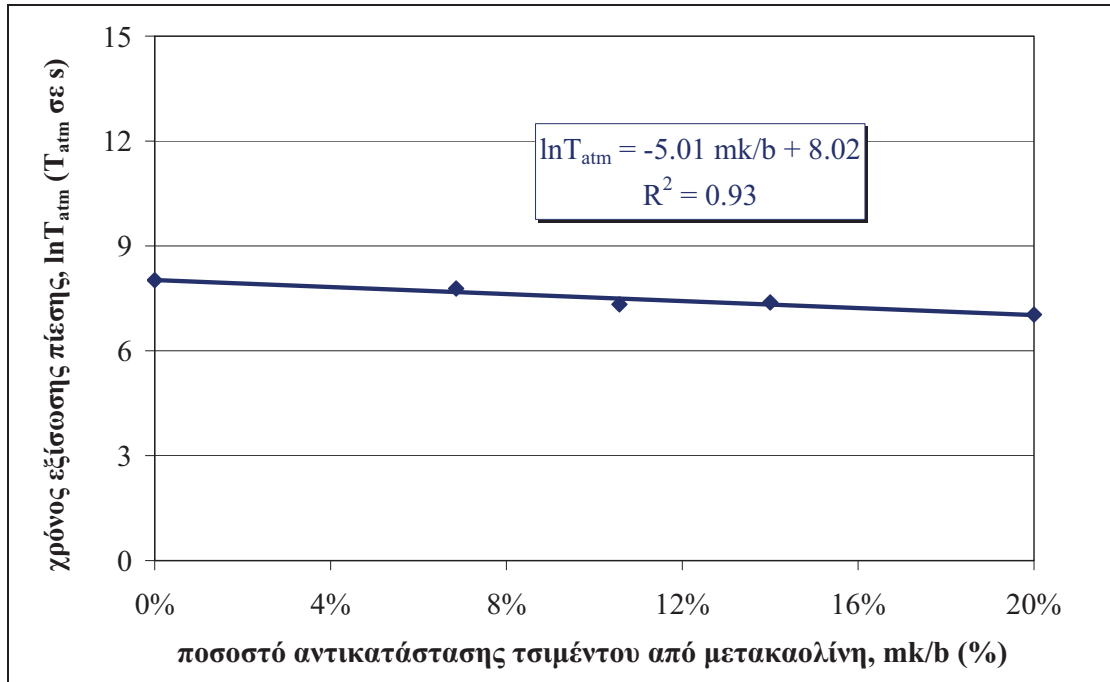
Παρατηρείται (Σχήμα 319) ότι ο χρόνος εξίσωσης πίεσης συσχετίζεται αρκετά καλά με το λόγο  $sf/b$ . Συγκεκριμένα, ο χρόνος  $\ln T_{atm}$  μειώνεται για μεγαλύτερους λόγους  $sf/b$ , γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη υδατοπερατότητα του σκυροδέματος. Αντίστοιχα, η αύξηση του λόγου  $sf/b$  οδηγεί σε σαφή αύξηση του συντελεστή  $c$  (Σχήμα 320), που μεταφράζεται και πάλι σε αύξηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε νερό. Ο συντελεστής συσχέτισης,  $R^2$ , ανέρχεται και στις δύο περιπτώσεις λίγο πάνω από 0.50.

Είναι προφανές ότι τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ανοιχτού πορώδους και της απορροφητικότητας (Παρ. 4.2.1.1 και Παρ. 4.2.1.2, αντίστοιχα), σύμφωνα με τα οποία η αύξηση του λόγου  $sf/b$  μειώνει το ανοιχτό πορώδες και καθιστά το σκυρόδεμα λιγότερο διαπερατό. Αντίθετα, στην περίπτωση της εκτίμησης της υδατοπερατότητας μέσω του χρόνου εξίσωσης πίεσης και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας, μεγαλύτεροι λόγοι  $sf/b$  φαίνεται να αυξάνουν την διαπερατότητα του σκυροδέματος σε νερό. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στη διαφορετική φύση των δοκιμών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διάταξη της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση αφορά το επιδερμικό σκυρόδεμα και τους μεγαλύτερους πόρους του σκυροδέματος, ενώ οι υπόλοιπες δοκιμές αφορούν στη συμπεριφορά του συνόλου των πόρων, περιλαμβανομένων και των πολύ λεπτών πόρων (μικρότερων από 100 nm), οι οποίοι είναι εκείνοι που επηρεάζονται περισσότερο από την προσθήκη ποζολανικών πρόσμικτων (τύπου II) και, ειδικότερα για την περίπτωση αυτή, από την προσθήκη πυριτικής παιπάλης.

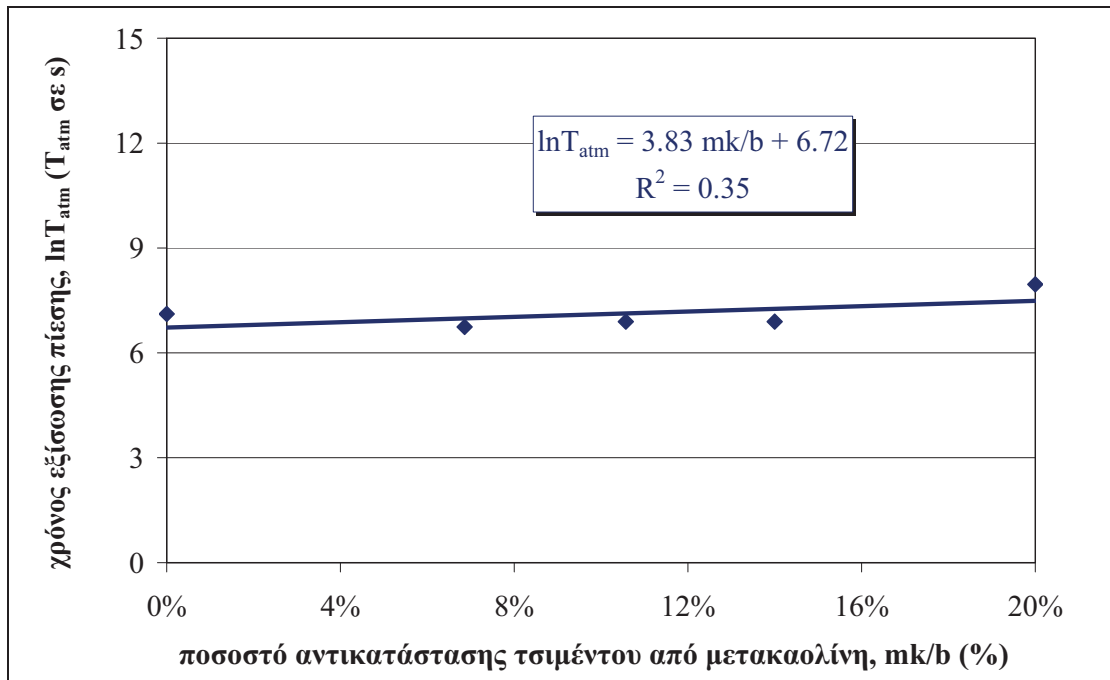
#### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ )

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Δ (Πίνακας 41, Κεφ.

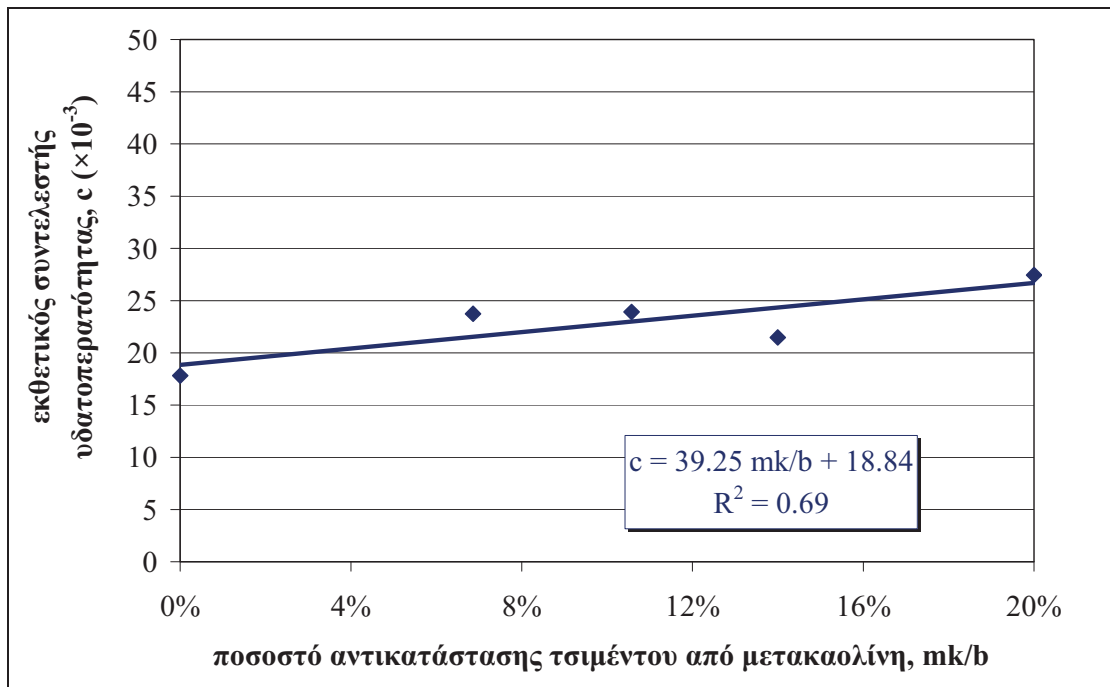
2) σε δύο ηλικίες, 28 και 360 ημερών (**Σχήμα 321** και **Σχήμα 322** για τον χρόνο  $\ln T_{\text{atm}}$  σε ηλικία 28 και 360 ημερών, αντίστοιχα, και **Σχήμα 323** και **Σχήμα 324** για το συντελεστή  $c$  σε ηλικία 28 και 360 ημερών, αντίστοιχα) με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ .



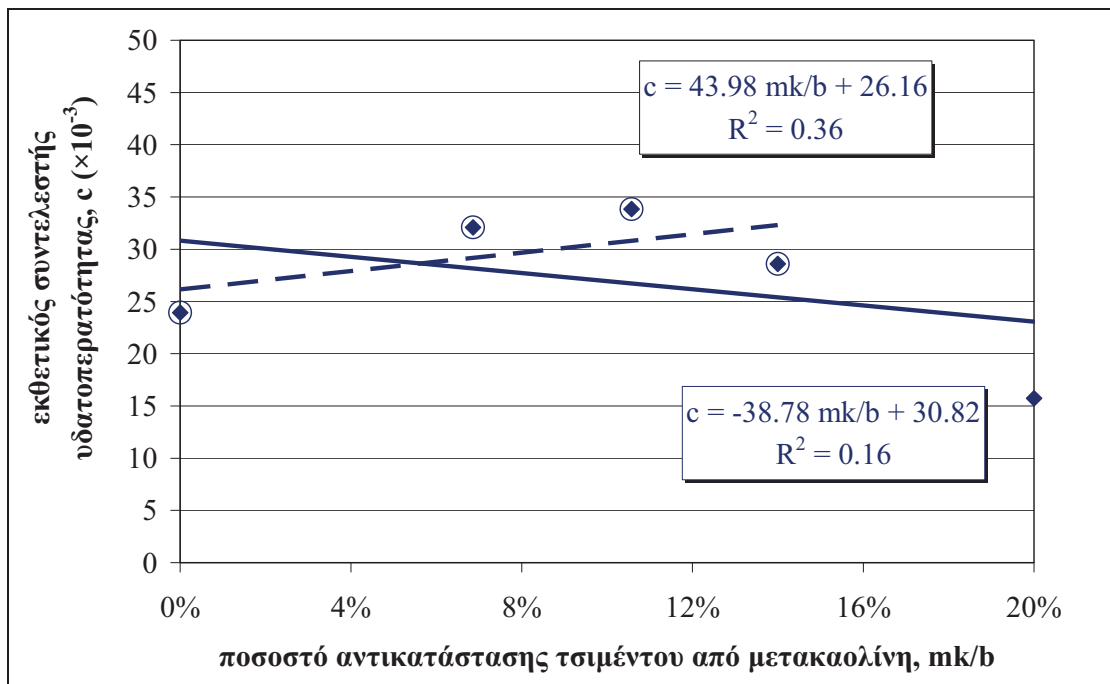
**Σχήμα 321** Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών



**Σχήμα 322** Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών



Σχήμα 323 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών

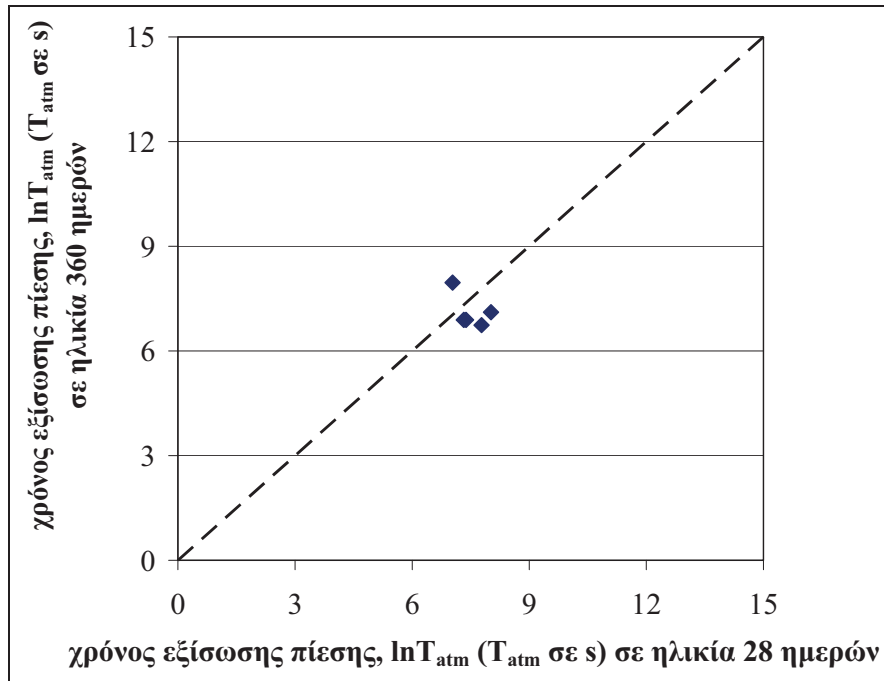


Σχήμα 324 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών

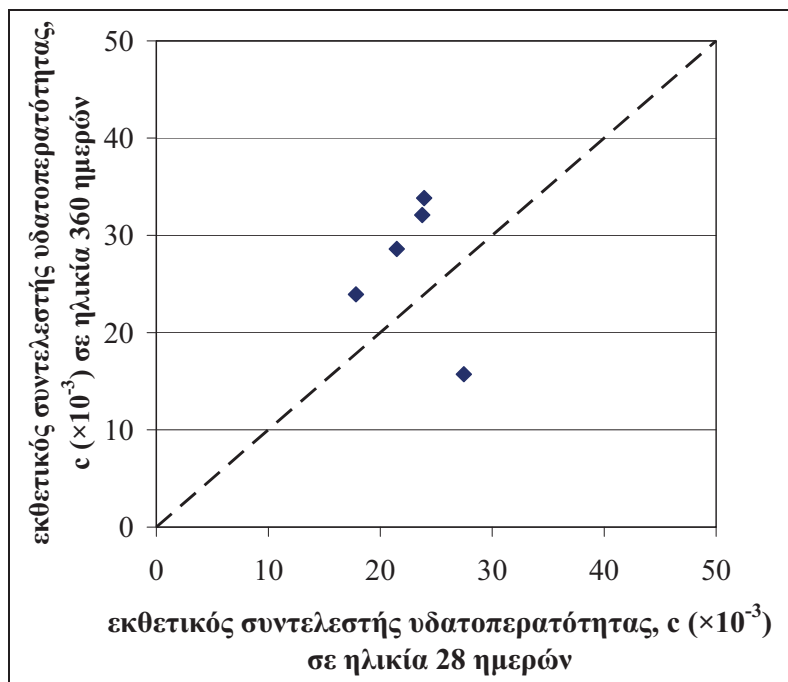
Παρατηρείται ότι, όπως και στην περίπτωση της πυριτικής παιπάλης, μεγαλύτεροι λόγοι  $mk/b$  οδηγούν σε ήπια μείωση του χρόνου εξίσωσης πίεσης  $\ln T_{atm}$  σε ηλικία 28 ημερών (Σχήμα 321), ενώ σε ηλικία 360 ημερών (Σχήμα 322) μεγαλύτεροι λόγοι  $mk/b$  οδηγούν σε ήπια αύξηση του χρόνου εξίσωσης πίεσης  $\ln T_{atm}$ . Θα μπορούσε να υποτεθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις οι χρόνοι  $\ln T_{atm}$  παραμένουν πρακτικώς σταθεροί συναρτήσει της μεταβολής του λόγου  $mk/b$ , υπόθεση που συμφωνεί με την

επιρροή του λόγου  $mk/b$  στο ανοιχτό πορώδες (πρακτικά αμετάβλητο) σε οποιαδήποτε ηλικία.

Στο **Σχήμα 325** και στο **Σχήμα 326** συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο ηλικιών για τους χρόνους  $\ln T_{\text{atm}}$  και τους συντελεστές  $c$ , αντίστοιχα.



**Σχήμα 325** Σύγκριση χρόνων εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών



**Σχήμα 326** Σύγκριση εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Δ, μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών

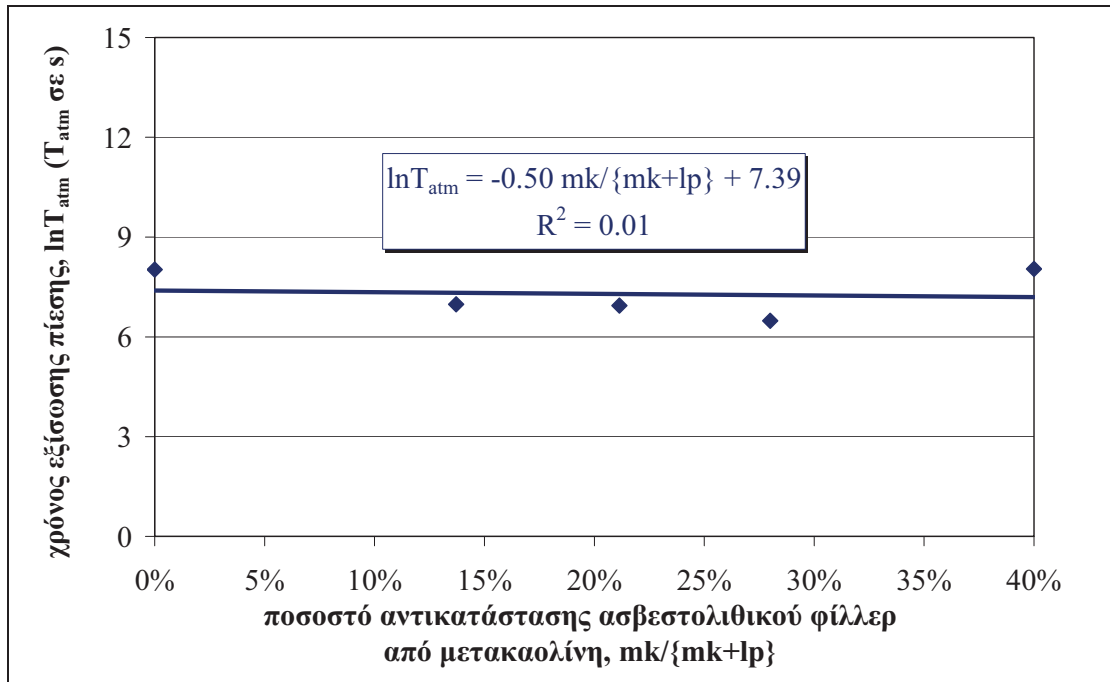
Όσο αφορά στον συντελεστή  $c$ , παρατηρείται ότι σε ηλικία 28 ημερών (Σχήμα 323) αυξάνεται με την αύξηση του λόγου  $mk/b$ , ενώ παρουσιάζει ασαφείς διακυμάνσεις σε ηλικία 360 ημερών (Σχήμα 324). Σύμφωνα με τα παραπάνω, λόγω της ασήμαντης επιρροής του λόγου  $mk/b$  στο ανοιχτό πορώδες σε οποιαδήποτε ηλικία, θα αναμενόταν και πάλι πρακτικά σταθερή τιμή του συντελεστή  $c$ , αντίστοιχα με το χρόνο εξίσωσης πίεσης. Αντίθετα, παρατηρείται μια αυξητική τάση του συντελεστή για αύξηση του λόγου  $mk/b$ , η οποία είναι σαφέστερη σε ηλικία 28 ημερών. Στις 360 ημέρες, η τιμή του συντελεστή  $c$  του μίγματος με ποσοστό αντικατάστασης 20 % θεωρείται υποεκτιμημένη, λόγω κάποιου αφανούς προβλήματος στο δοκίμιο που ελέγχθηκε. Εξαιρουμένης της τιμής αυτής, η τάση του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας είναι και πάλι αυξητική συναρτήσει του λόγου  $mk/b$ . Συγκρίνοντας τους χρόνους μεταξύ των δύο ηλικιών (Σχήμα 325), παρατηρείται ότι χαμηλότεροι χρόνοι  $\ln T_{\text{atm}}$  υπολογίζονται, κατά κανόνα, σε ηλικία 360 ημερών. Αντίστοιχα, συγκρίνοντας τους εκθετικούς συντελεστές διαπερατότητας μεταξύ των δύο ηλικιών (Σχήμα 326), παρατηρείται ότι χαμηλότεροι συντελεστές  $c$  υπολογίζονται, κατά κανόνα, σε ηλικία 28 ημερών.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν στο ανοιχτό πορώδες και την απορροφητικότητα (Παρ. 4.2.1.1 και Παρ. 4.2.1.2, αντίστοιχα), παρατηρείται ότι η μεταβολή του λόγου  $mk/b$  οδηγεί σε παρεμφερείς μεταβολές, αν και αντίθετης ερμηνείας, στο ανοιχτό πορώδες και στον χρόνο εξίσωσης πίεσης. Συγκεκριμένα, σε ηλικία 28 ημερών έχουμε μία ήπια μείωση των δύο μεγεθών, ενώ σε ηλικία 360 ημερών τα δύο μεγέθη παραμένουν πρακτικώς σταθερά. Εκτιμάται ότι οι τιμές είναι πρακτικώς σταθερές και δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή του λόγου  $mk/b$ . Αντίθετα, μεγαλύτεροι λόγοι  $mk/b$  φαίνεται να μειώνουν την απορροφητικότητα και να αυξάνουν τον εκθετικό συντελεστή υδατοπερατότητας, ανεξαρτήτως της ηλικίας ελέγχου. Η μείωση της απορροφητικότητας οφείλεται στη συνδυασμένη φυσική (λόγω της μικρότερης κοκκομετρίας του εν σχέσει προς το τσιμέντο) και ποζολανική δράση του μετακαολίνη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διάταξη της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση αφορά το επιδερμικό σκυρόδεμα και τους μεγαλύτερους πόρους του σκυροδέματος, ενώ οι υπόλοιπες δοκιμές αφορούν στη συμπεριφορά του συνόλου των πόρων, περιλαμβανομένων και των πολύ λεπτών πόρων (μικρότερων από 100 nm), οι οποίοι είναι εκείνοι που επηρεάζονται περισσότερο από την προσθήκη ποζολανικών πρόσμικτων (τύπου II) και, ειδικότερα για την περίπτωση αυτή, από την προσθήκη μετακαολίνη.

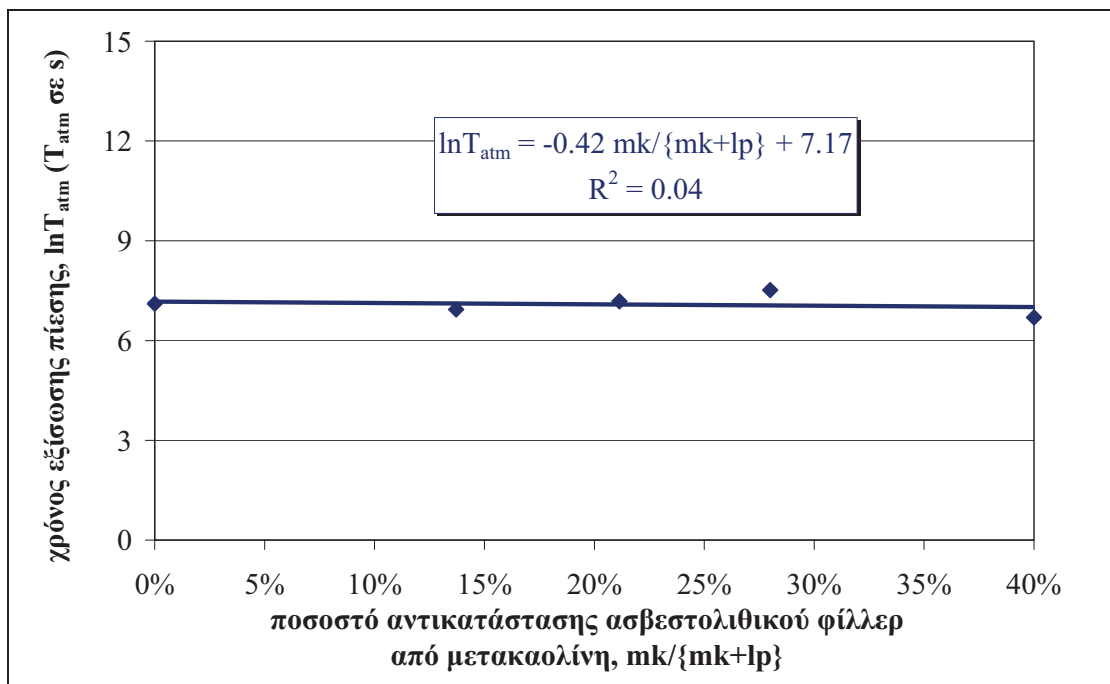
### **Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )**

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Δ (Πίνακας 41, Κεφ. 2) σε δύο ηλικίες, 28 και 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$ . Συγκεκριμένα, το **Σχήμα 327** και το **Σχήμα 328** αφορούν στον χρόνο  $\ln T_{\text{atm}}$  σε ηλικία των 28 και 360 ημερών, αντίστοιχα, ενώ το **Σχήμα 329** και το **Σχήμα 330** αφορούν στον συντελεστή  $c$  σε ηλικία των 28 και 360 ημερών, αντίστοιχα. Η σύγκριση αφενός των χρόνων εξίσωσης πίεσης και αφετέρου των συντελεστών υδατοπερατότητας μεταξύ των δύο ηλικιών παρουσιάζεται στο **Σχήμα 331** και στο **Σχήμα 332**, αντίστοιχα.

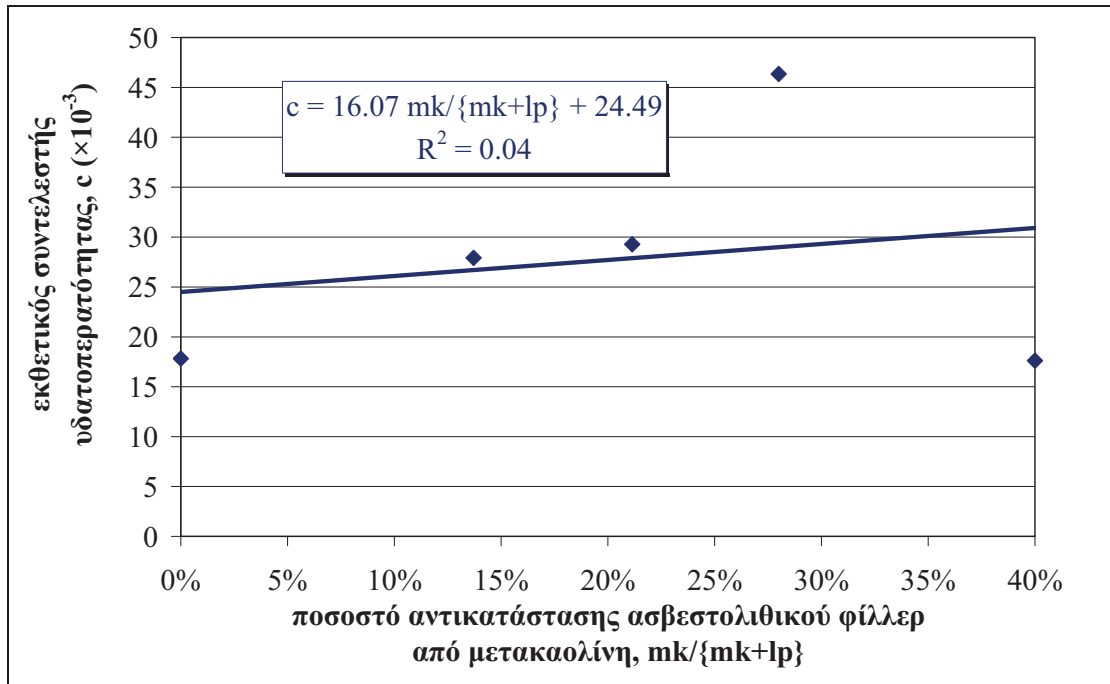




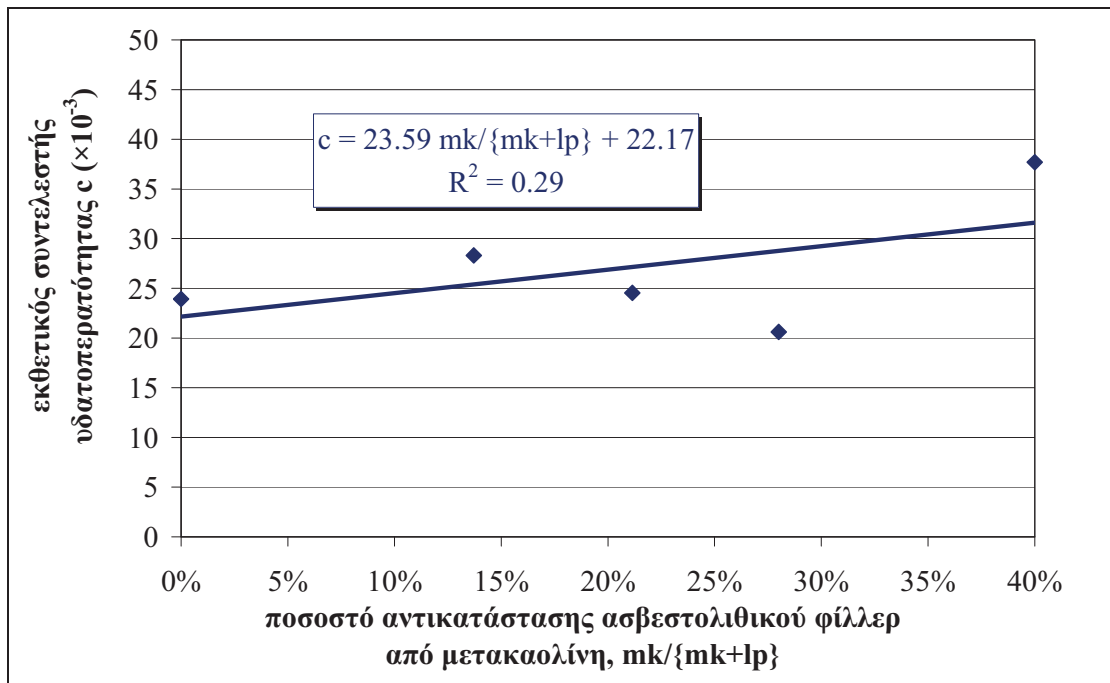
Σχήμα 327 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών



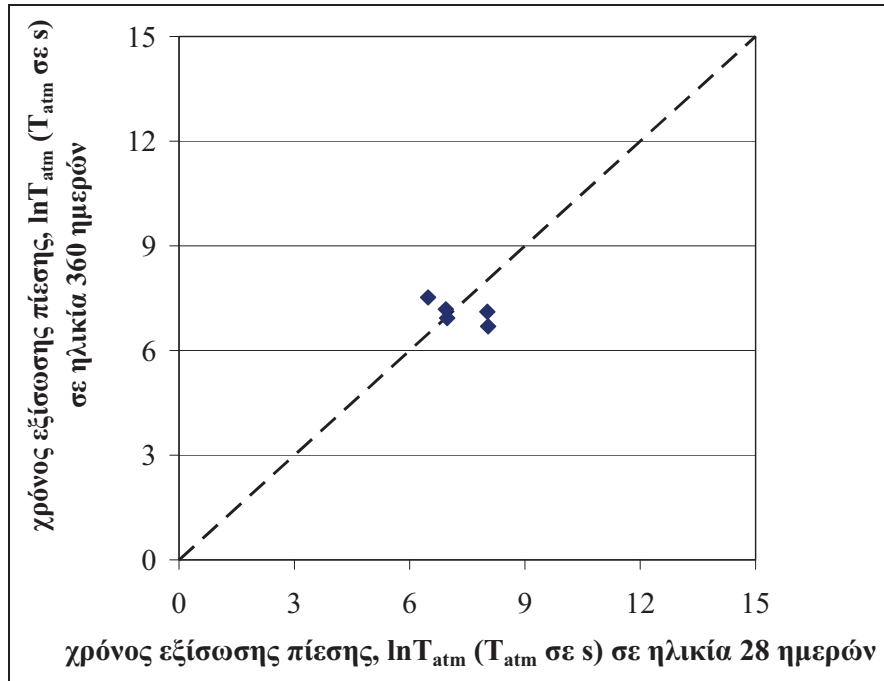
Σχήμα 328 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών



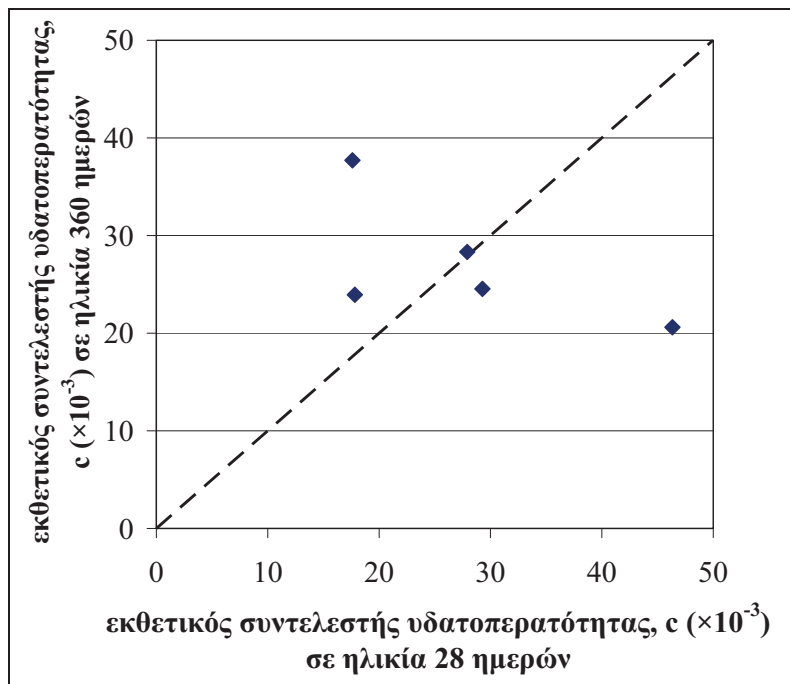
Σχήμα 329 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 330 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών



Σχήμα 331 Σύγκριση χρόνων εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Δ μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών



Σχήμα 332 Σύγκριση εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων E, μεταξύ των ηλικιών 28 και 360 ημερών

Παρατηρείται ότι, όπως και στην περίπτωση αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη, ο χρόνος εξίσωσης πίεσης  $\ln T_{\text{atm}}$  παραμένει πρακτικώς αμετάβλητος συναρτήσει της μεταβολής του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$ , ανεξαρτήτως της ηλικίας ελέγχου στις 28 ή 360 ημέρες (Σχήμα 327 και Σχήμα 328, αντίστοιχα). Αν ο χρόνος  $\ln T_{\text{atm}}$  θεωρηθεί πρακτικώς σταθερός, τότε η μέση τιμή του (μέσος όρος πέντε τιμών) είναι κατά περίπου 3 % υψηλότερη σε ηλικία 28 ημερών εν σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή σε ηλικία 360 ημερών, διαφορά που μπορεί να θεωρηθεί πρακτικώς αμελητέα. Όσο αφορά τον εκθετικό συντελεστή υδατοπερατότητας  $c$ , παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως της ηλικίας (Σχήμα 329 και Σχήμα 330, για τις 28 ή 360 ημέρες αντίστοιχα), παρουσιάζει μια αύξηση συναρτήσει του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$ , με τις επιμέρους τιμές να παρουσιάζουν, πάντως, έντονες διακυμάνσεις. Οι εν λόγω διακυμάνσεις είναι εντονότερες σε ηλικία 28 ημερών (Σχήμα 329).

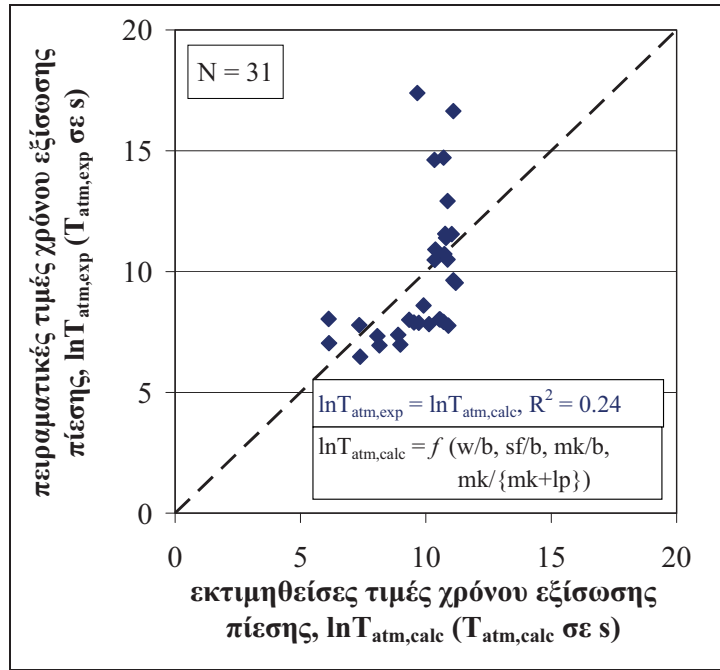
Συγκρίνοντας τους χρόνους μεταξύ των δύο ηλικιών (Σχήμα 331), παρατηρείται ότι χρόνοι  $\ln T_{\text{atm}}$  δεν παρουσιάζουν μία σαφή εικόνα και τυχόν αποκλίσεις από τη διαγώνιο αποδίδονται σε διασπορές του υλικού και της δοκιμής. Συγκρίνοντας τους εκθετικούς συντελεστές διαπερατότητας μεταξύ των δύο ηλικιών (Σχήμα 332), παρατηρείται ότι, κατ' αντιστοιχία με τους χρόνους εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$ , οι συντελεστές  $c$  δεν παρουσιάζουν μία σαφή εικόνα και τυχόν αποκλίσεις από τη διαγώνιο αποδίδονται σε διασπορές του υλικού και της δοκιμής.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν στο ανοιχτό πορώδες και την απορροφητικότητα (Παρ. 4.2.1.1 και Παρ. 4.2.1.2, αντίστοιχα), παρατηρείται ότι ο χρόνος εξίσωσης πίεσης παραμένει πρακτικώς αμετάβλητος με τη μεταβολή του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$ , όπως συνέβη και στην περίπτωση του ανοιχτού πορώδους. Η ταύτιση των παραπάνω αποτελεσμάτων θα μπορούσε να αποδοθεί στην κοινή κοκκομετρία μεταξύ του ασβεστολιθικού φίλερ και του μετακαολίνη, υπόθεση που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δύο αυτές δοκιμές δεν επηρεάζονται από την ποζολανικότητα του μετακαολίνη. Από την άλλη πλευρά, μεγαλύτεροι λόγοι  $mk/\{mk+lp\}$  φαίνεται να μειώνουν την απορροφητικότητα και να οδηγούν σε ασαφείς διακυμάνσεις, αν και με μια αυξητική εν γένει τάση, του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας. Η μείωση της απορροφητικότητας μπορεί να αποδοθεί στην ποζολανική δράση του μετακαολίνη, ενώ οι διακυμάνσεις του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας δεν μπορούν να οδηγήσουν σε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Θα μπορούσε, πάντως, να υποθεθεί ότι οι μεταβολές αυτές είναι τυχαίες και ο συντελεστής υδατοπερατότητας είναι πρακτικώς σταθερός.

### Συσχέτιση με χαρακτηριστικούς λόγους συστατικών

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, για σταθερή σύνθεση των αναμιγμάτων με μία μοναδική μεταβλητή, η υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη πίεση (χρόνος εξίσωσης πίεσης και εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας) βρέθηκε ότι εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή των λόγων  $w/b$ ,  $sf/b$  και  $mk/b$ , ενώ δε φαίνεται να συσχετίζεται με το λόγο  $mk/\{mk+lp\}$ . Στη συνέχεια, θα αναζητηθεί μία γραμμική εξίσωση της μορφής της **Εξίσωσης (4.14)** που να συνδέει όλες τις παραπάνω μεταβλητές, για καθένα από τα δύο μεγέθη που εξετάστηκαν.

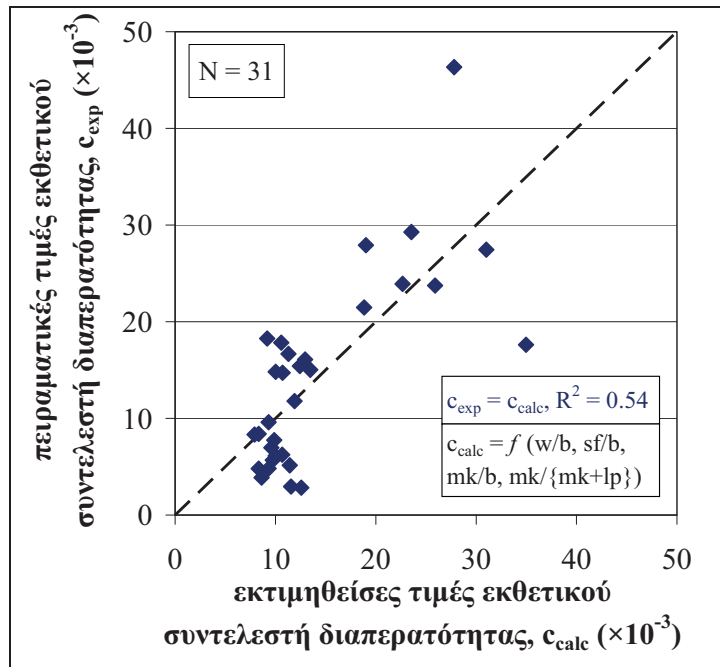
$$\ln T_{\text{atm,calc}} \text{ ή } c_{\text{calc}} = \gamma_1 (w/b) + \gamma_2 (sf/b) + \gamma_3 (mk/b) + \gamma_4 (mk/\{mk+lp\}) + \gamma_5 \quad (4.14)$$



**Σχήμα 333** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm,calc}$  ( $T_{atm}$  σε s), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $\ln T_{atm,exp}$

**Πίνακας 114** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm,calc}$  ( $T_{atm}$  σε s), συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

k	1	2	3	4	5
$\gamma_k$	-3,27	11,18	-12,62	-6,67	12,54



**Σχήμα 334** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c_{calc}$  ( $\times 10^{-3}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $c_{exp}$

**Πίνακας 115** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c_{calc}$  ( $\times 10^{-3}$ ), συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

k	1	2	3	4	5
$\gamma_k$	14,01	30,67	24,75	54,15	2,17

Όπως και στις αναλύσεις που προηγήθηκαν, για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\gamma_k$  ( $k = 1$  έως 5) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\gamma_k$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για τα μεγέθη εκτίμησης της υδατοπερατότητας 28 ημερών (πλήθος  $N = 31$ ),  $\ln T_{\text{atm,exp}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s) ή  $c_{\text{exp}} (\times 10^{-3})$ . Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης για το χρόνο εξίσωσης πίεσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 333**, ενώ ο **Πίνακας 114** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\gamma_k$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση. Κατ' αντιστοιχία, Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης για το συντελεστή υδατοπερατότητας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 334**, ενώ ο **Πίνακας 115** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\gamma_k$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση. Παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές δεν μπορούν να εκτιμηθούν με μεγάλη ακρίβεια. Οι συντελεστές συσχέτισης για το σύνολο των δεδομένων είναι αρκετά χαμηλοί ( $R^2 = 0.24$  και  $0.54$  για τον χρόνο εξίσωσης πίεσης και το συντελεστή διαπερατότητας, αντίστοιχα).

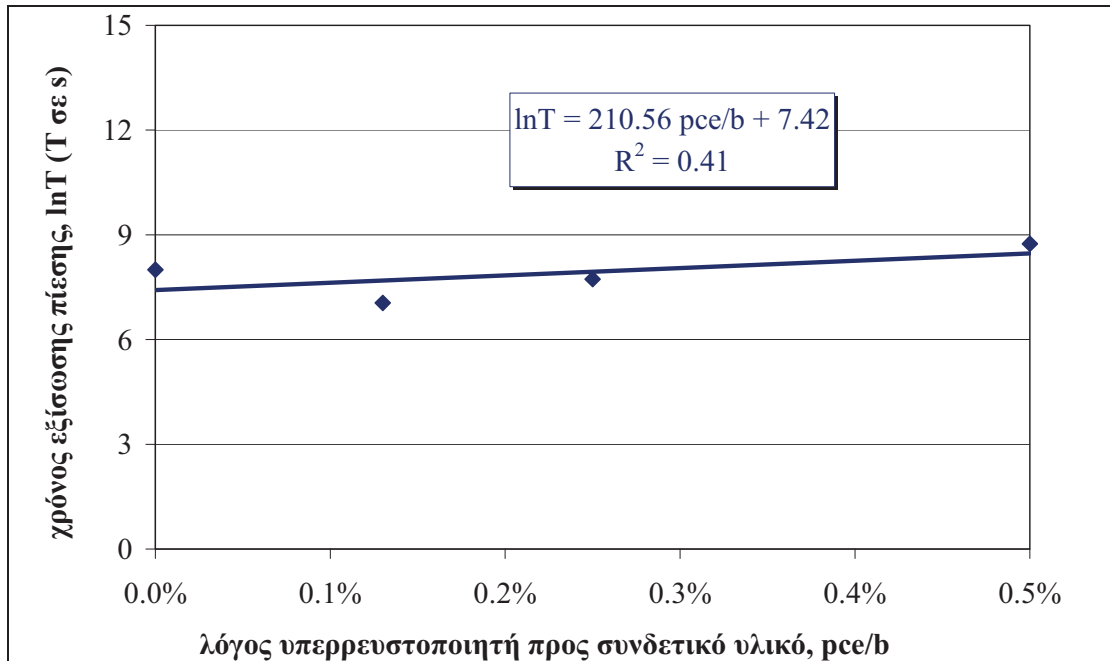
### Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

Στο **Σχήμα 335** και στο **Σχήμα 336** παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c (\times 10^{-3})$ , αντίστοιχα, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων E (Πίνακας 42, Κεφ. 2), με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή ως προς το συνδετικό υλικό,  $pce/b$ . Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $pce/b$  φαίνεται να οδηγεί σε μία ήπια αύξηση του χρόνου εξίσωσης πίεσης και μια λίγο εντονότερη μείωση του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας.

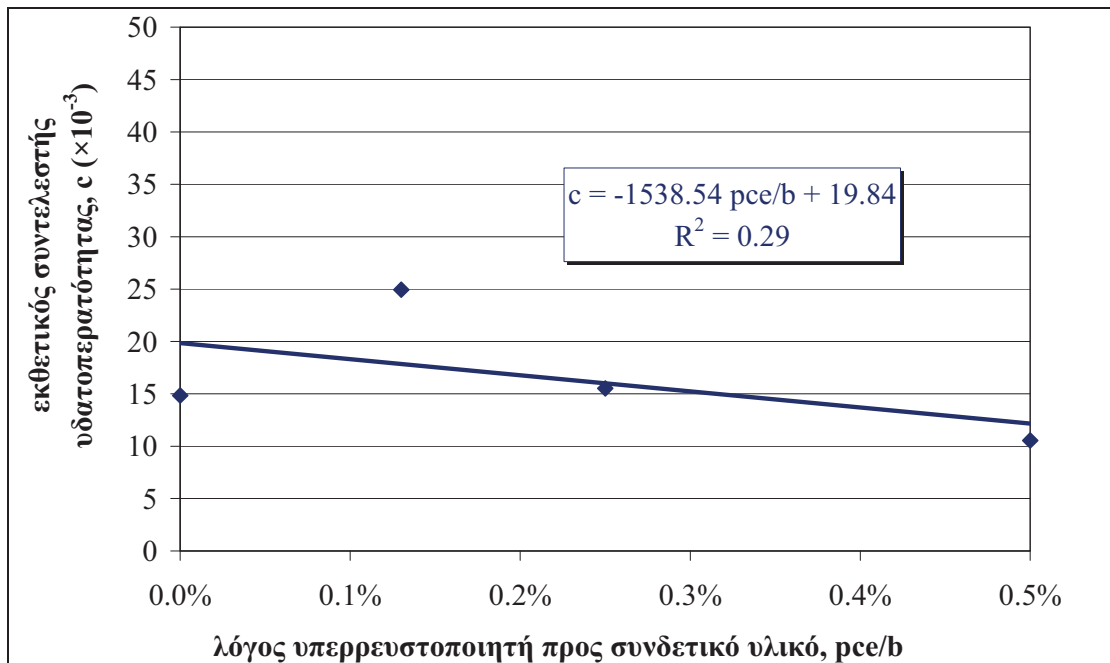
### Επιρροή τύπου σκυροδέματος

Στο **Σχήμα 337** και στο **Σχήμα 338** παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c (\times 10^{-3})$ , αντίστοιχα, όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Πίνακας 43 και Πίνακας 44, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ παρεμφερούς κοκκομετρίας και διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή,  $pce/b$ . Υπενθυμίζεται ότι η ονοματολογία των συνθέσεων έχει δοθεί ως εξής {ΤύποςΣκυροδέματος} $w/b(\%)-pce/b(\%)$ .

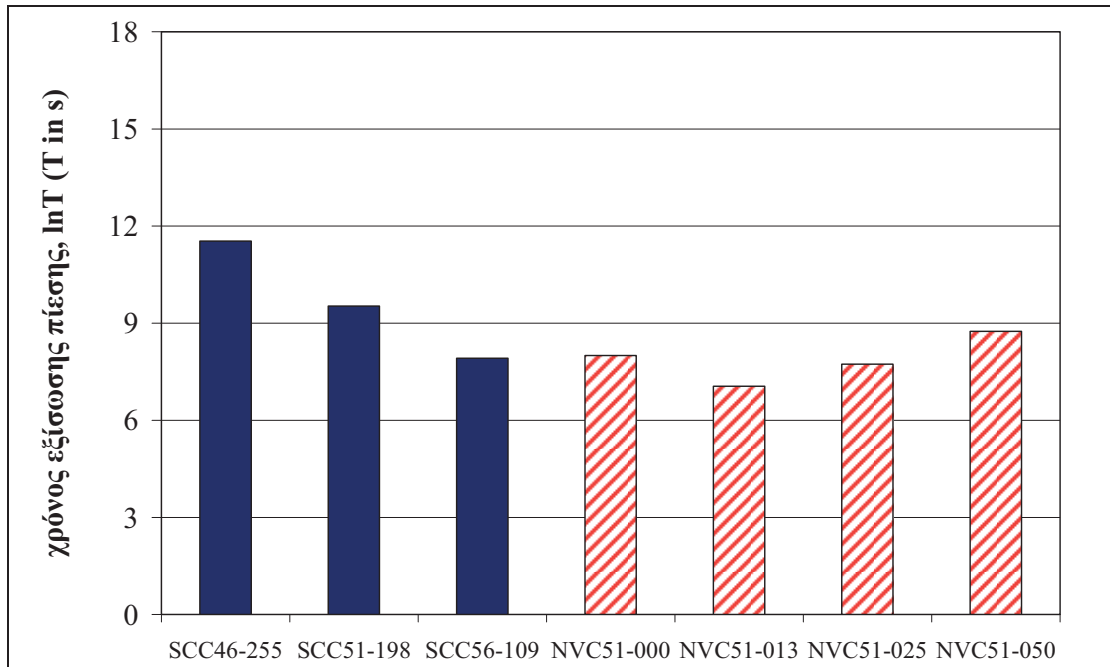
Παρατηρείται ότι για τον ίδιο λόγο  $w/b$  (0.51) η υδατοπερατότητα, όπως αυτή εκτιμάται μέσω του χρόνου εξίσωσης πίεσης  $\ln T_{\text{atm}}$  (**Σχήμα 337**) ή του συντελεστή  $c$  (**Σχήμα 338**), είναι μικρότερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς οποιαδήποτε σύνθεση ΣΣ. Δεδομένου ότι, όπως παρατηρήθηκε παραπάνω, η μεταβολή της υδατοπερατότητας στο ΑΣΣ είναι γραμμική συναρτήσει του λόγου  $w/b$  παρατηρείται ότι, κατά κανόνα, παρεμφερής υδατοπερατότητα με τις συνθέσεις ΣΣ ( $w/b = 0.51$ ) επιτυγχάνεται στις συνθέσεις ΑΣΣ για μεγαλύτερο λόγο  $w/b = 0.56$ . Το γεγονός αυτό αποδίδεται αφενός στη φυσική δράση του ενσωματωμένου στο ΑΣΣ ασβεστολιθικού φίλερ, αλλά και στην μεγαλύτερη ποσότητα ρευστοποιητή, που συνεισφέρουν στη δημιουργία μιας πιο πυκνής μικροδομής, με λιγότερους ανοιχτούς πόρους.



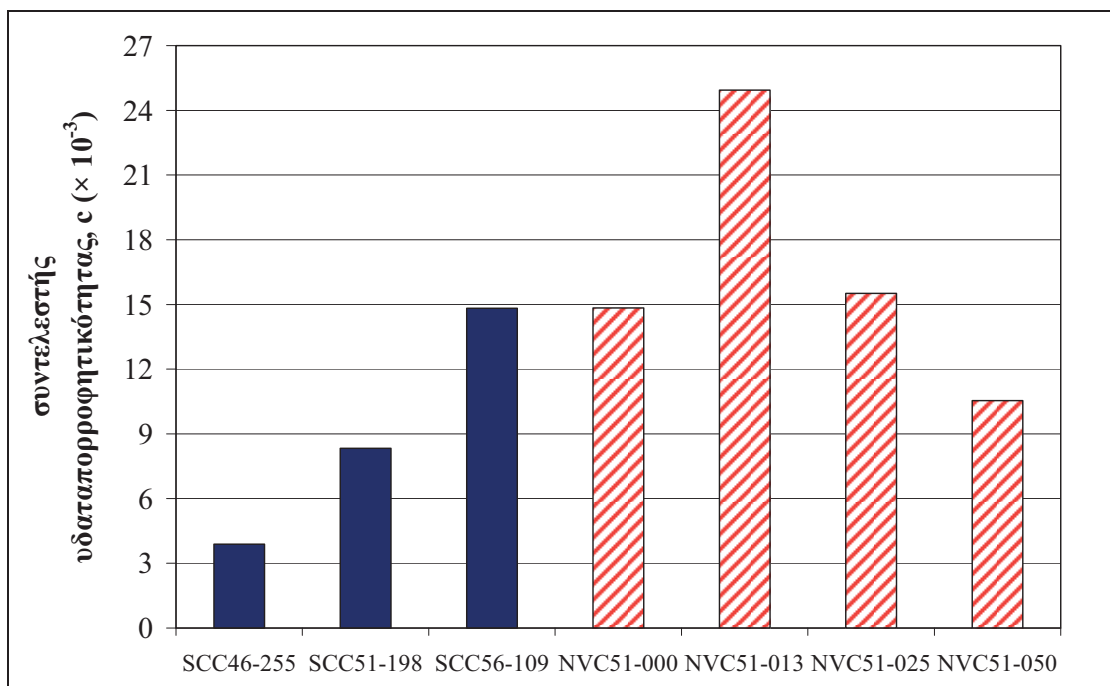
Σχήμα 335 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$  ( $T_{\text{atm}}$  σε s), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων E σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 336 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων E σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 337 Χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{atm}$  ( $T_{atm}$  σε s), υπο-ομάδας συνθέσεων Z σε ηλικία 28 ημερών



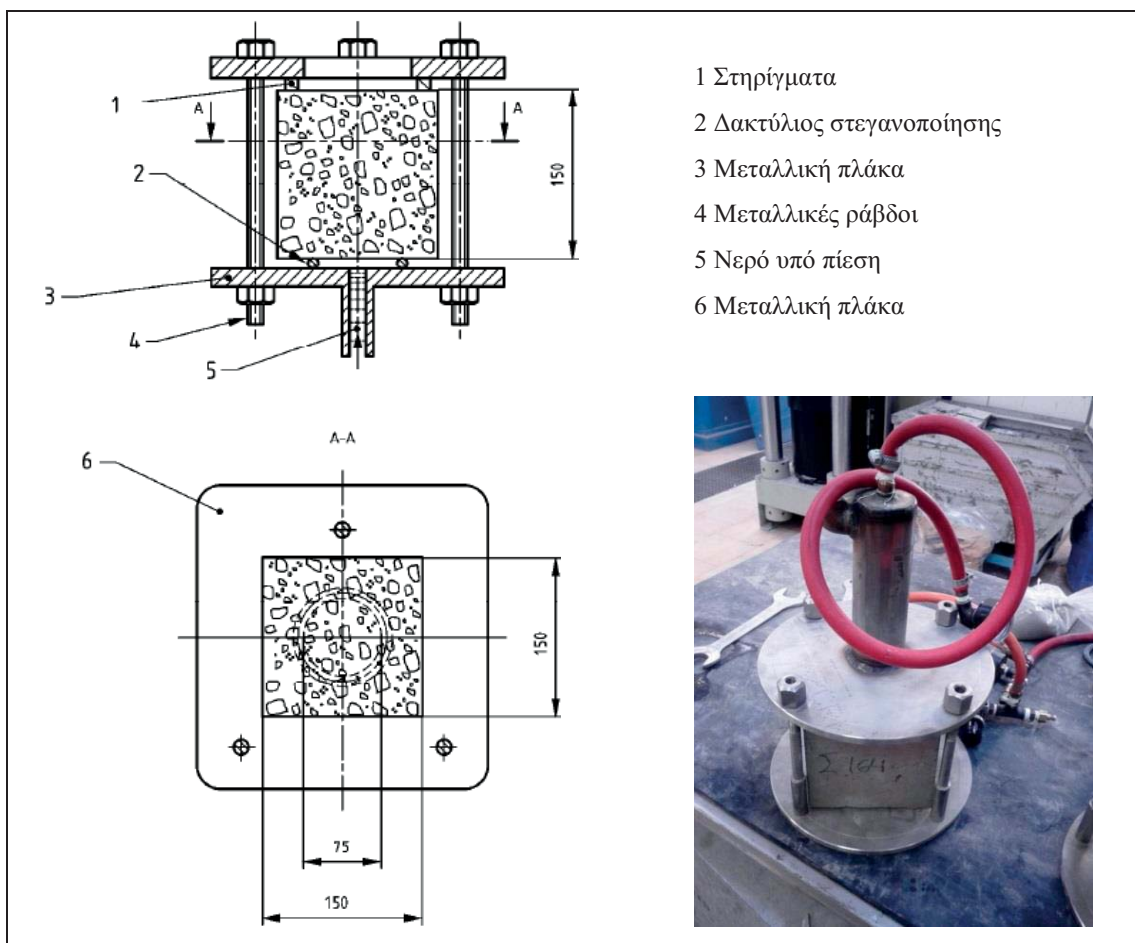
Σχήμα 338 Εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Z σε ηλικία 28 ημερών



#### 4.2.1.4. Υδατοπερατότητα υπό σταθερή πίεση

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

Σε μέρος των μιγμάτων και σε πρότυπα κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, ως συμπληρωματική μέθοδος προσδιορισμού της υδατοπερατότητας, εφαρμόστηκε η πρότυπη μέθοδος EN 12390-8 (2009), η οποία βασίζεται στο παλαιότερο γερμανικό πρότυπο DIN 1048-5 (1991). Κατόπιν της προκαθορισμένης περιόδου συντήρησης σε δεξαμενή νερού, το κορεσμένο δοκίμιο υποβλήθηκε μέσω κατάλληλης πειραματικής διάταξης (Σχήμα 339) σε σταθερή πίεση νερού  $500 \pm 50$  kPa ( $5.0 \pm 0.5$  bar) για  $72 \pm 2$  ώρες και, αμέσως μετά το πέρας της δοκιμής, υποβλήθηκε σε διάρρηξη και καταγράφηκε το βάθος διείσδυσης,  $d$  (mm), του νερού στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 339 Πειραματική διάταξη δοκιμής υδατοπερατότητας υπό σταθερή πίεση  
[πηγές: EN 12390-8 (2009), Βούκια (2013)]

Σημειώνεται ότι στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνεται η εξαιρετική δυσκολία μέτρησης του εν λόγω βάθους, λόγω του συχνά μη διακριτού ορίου μεταξύ της νωπής και υγρής επιφάνειας. Τυχόν καθυστέρηση στη διάρρηξη ή/ και την καταγραφή των βαθών διείσδυσης επί του διαρρηγμένου δοκιμίου μπορεί να οδηγήσει σε εξάτμιση του νερού και, επομένως, σε εσφαλμένες μετρήσεις. Ειδικά για σκυροδέματα με μικρή ικανότητα διείσδυσης νερού, όπως για παράδειγμα σκυροδέματα με πρόσμικτα τύπου II (πυριτική παιπάλη, μετακαολίνης, κ.λπ.) συντηρημένα σε νερό για μεγάλο διάστημα, η μετρήσεις του βάθους μπορεί να είναι

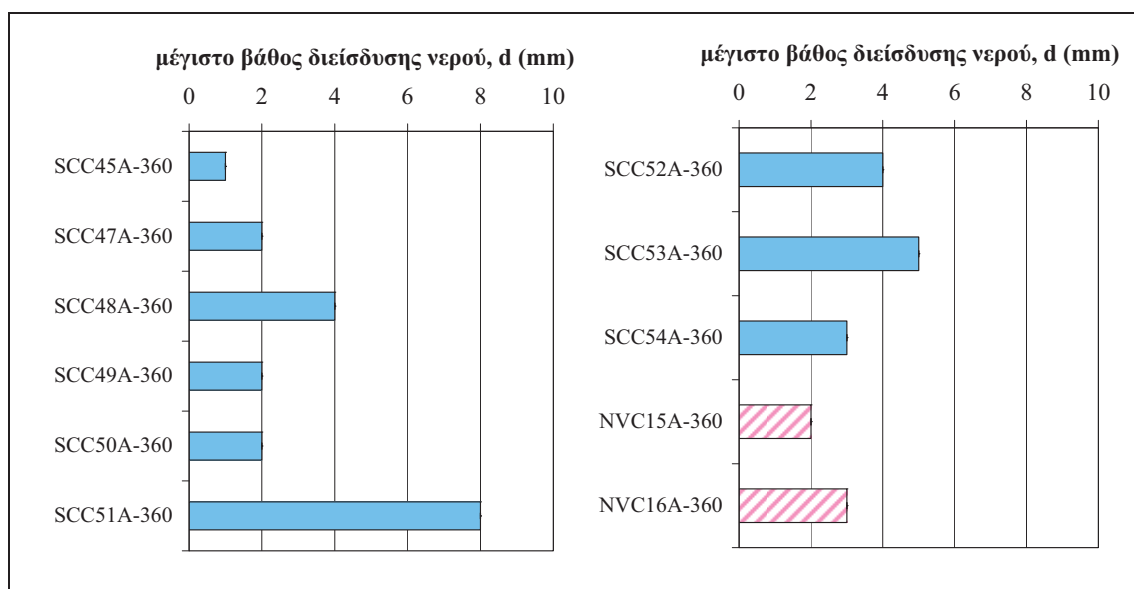
ακόμα δυσχερέστερες. Λόγω απουσίας κατάλληλου εξοπλισμού στο ΕΩΣ/ΕΜΠ, οι εν λόγω δοκιμές υδατοπερατότητας πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με το Εργαστήριο των Τσιμέντων Τιτάν σε πολύ μικρό πλήθος μιγμάτων.

### Γενική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 116 περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των συνθέσεων που ελέγχθηκαν ως προς την υδατοποροφητικότητα τους υπό σταθερή πίεση, μέσω του μέγιστου βάθους διείσδυσης νερού. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν έντεκα δοκιμές σε ισάριθμες συνθέσεις (9 συνθέσεις ΑΣΣ και 2 συνθέσεις ΣΣ), τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 340.

**Πίνακας 116** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την υδατοπερατότητά τους υπό σταθερή πίεση [EN 12390-8 (2009)].

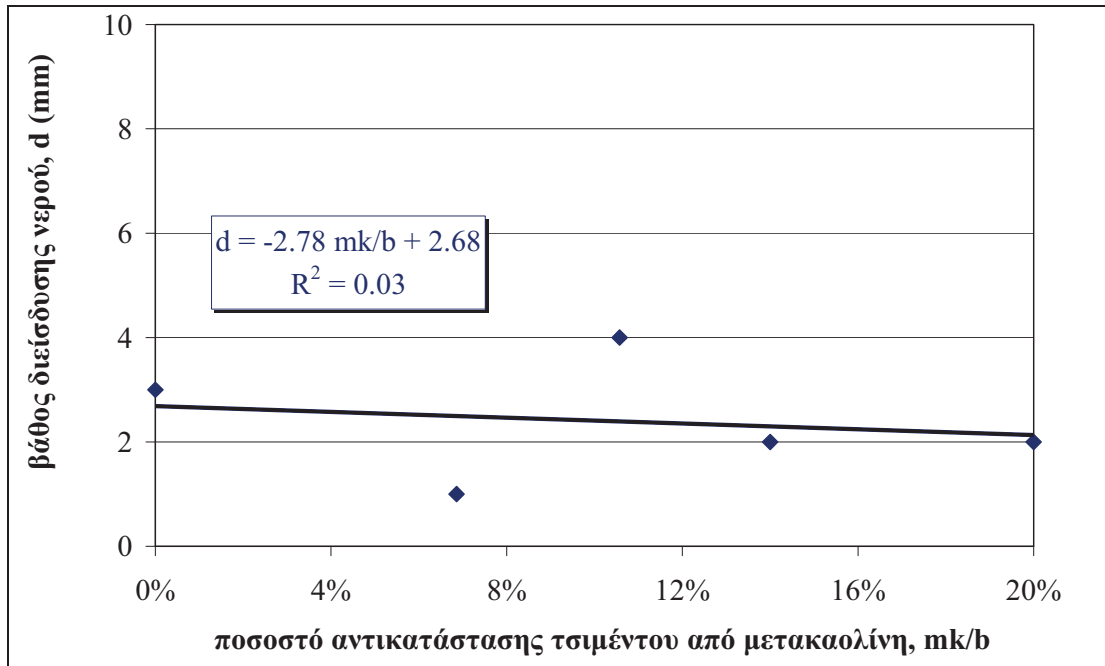
Τύπος Σκυροδέματος Συντήρηση	Μίγματα ΑΣΣ ΔΝ			Μίγματα ΣΣ ΔΝ
Κωδικοί Συνθέσεων	SCC45	SCC49	SCC52	NVC15
	SCC47	SCC50	SCC53	NVC16
	SCC48	SCC51	SCC54	
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	9 (9 μετρ.)			<b>2 (2 μετρ.)</b>
				<b>11 (11 μετρ.)</b>



**Σχήμα 340** Μέγιστο βάθος διείσδυσης δοκιμίων συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 360 ημερών

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ )

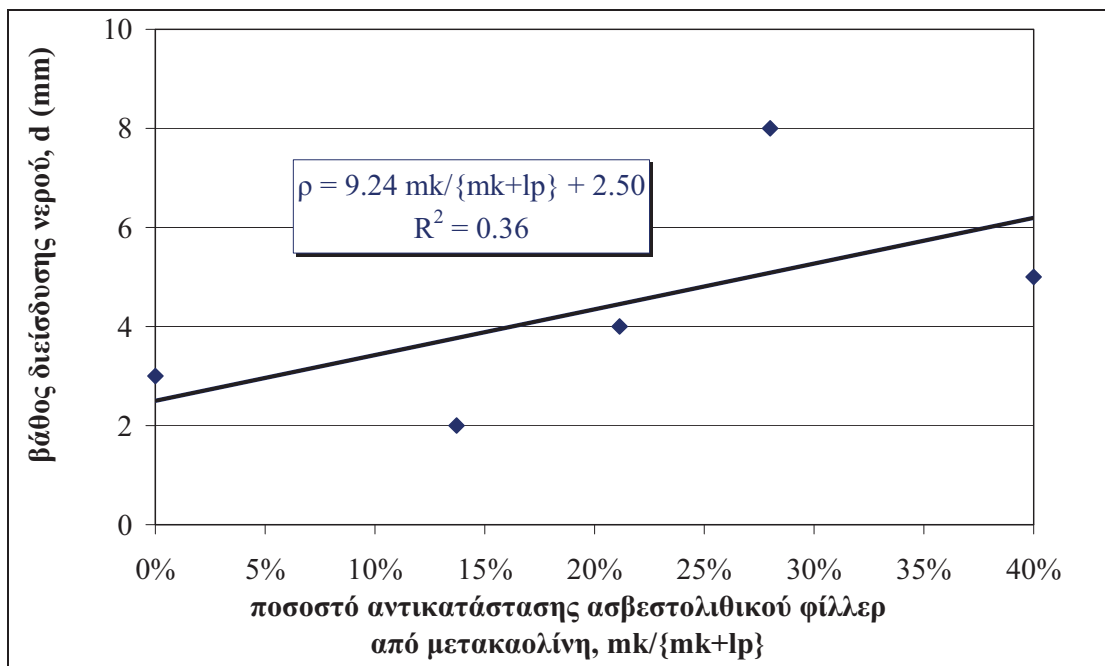
Στο Σχήμα 341 παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης νερού,  $d$  (mm), όπως αυτό υπολογίστηκε για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Γ (Πίνακας 40, Κεφ. 2) σε ηλικία 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ . Η μεταβολή του μέσου βάθους διείσδυσης συναρτήσε του λόγου  $mk/b$  δεν είναι σαφής, αν και παρουσιάζει μια ήπια μείωση. Θα μπορούσε πάντως να υποτεθεί ότι το μέσο βάθος διείσδυσης παραμένει πρακτικώς σταθερό. Σε κάθε περίπτωση, η μεγάλη διασπορά των τιμών δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.



Σχήμα 341 Βάθος διείσδυσης νερού υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 360 ημερών

#### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Στο Σχήμα 342 παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης νερού,  $d$  (mm), όπως αυτό υπολογίστηκε για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Δ (Πίνακας 41, Κεφ. 2) σε ηλικία 360 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$ . Η μεταβολή του μέσου βάθους διείσδυσης συναρτήσκει του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$  παρουσιάζει μια απότομη αύξηση. Όπως και στην περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $mk/b$ , η μεγάλη διασπορά των τιμών δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.



Σχήμα 342 Βάθος διείσδυσης νερού υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 360 ημερών

#### 4.2.2. Διαπερατότητα σε χλωριόντα<sup>2</sup>

Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν πολλές διαφορετικές δοκιμές που μπορούν να εκτιμήσουν τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Ο Πίνακας 117 περιλαμβάνει μία σύνοψη των κυριότερων δοκιμών (διάρκεια, μετρούμενο μέγεθος, διαστάσεις δοκιμίου) κατά τους Stanish et al. (1997).

Πίνακας 117 Συνοπτική παρουσίαση δοκιμών αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων κατά Stanish (1997)

Δοκιμή	Διάρκεια	Μετρούμενο Μέγεθος	Δοκίμιο
Salt Ponding Test [AASHTO T 259 (1980), ASTM C 1543 (2002)]	90 d	συγκεντρωση χλωριοντων	h = 75 mm A = 300 mm <sup>2</sup>
Bulk Diffusion Test [NT Build 443 (1995)]	40-120 d	συγκεντρωση χλωριοντων	h = 60 mm
Migration Cell Experiment [NT Build 355 (1997)]	7-10 d	πτωση δυναμικου, βαθος διεισδυσης χλωριοντων	h = 50 mm d = 100 mm
Rapid Chloride Permeability Test (RCTP) [AASHTO T 277 (2007), ASTM C 1202 (2009)]	6 h	συνολικο διερχομενο ρευμα	h = 50 mm d = 100 mm
Electrical Migration	μεταβλ.	συγκεντρωση χλωριοντων	d = 100 mm h = 10-50 mm
Rapid Migration Test (CTH)	μεταβλ.	βαθος διεισδυσης χλωριοντων	h = 50 mm d = 100 mm
NordTest Build 492 (1999)	24 h	βαθος διεισδυσης χλωριοντων	h = 50 mm d = 100 mm
Resistivity Techniques	30 min	ταση, ρευμα	
Pressure Penetration Techniques	μεταβλ.	βαθος διεισδυσης χλωριοντων	

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, για την εκτίμηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε χλωριόντα εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι. Ο τρόπος εκτέλεσης των αντίστοιχων δοκιμών, καθώς και η μεθοδολογία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων τους περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

- Προσδιορισμός συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient),  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), σύμφωνα με την πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδο NordTest Build 492 (1999), η οποία εφαρμόστηκε σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες πειράματος (Παρ. 4.2.2.1), αλλά και με κατάλληλη παραλλαγή τους, ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες πειράματος της πρότυπης αμερικάνικης μεθόδου ASTM C 1202 (2009), στο πλαίσιο της διερεύνησης της διεργαστηριακής αναπαραγωγιμότητας (reproducibility).
- Έμμεσος προσδιορισμός της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, μέσω του προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης (specific resistance),  $\rho$  (kΩ-cm) (Παρ.

<sup>2</sup> Τμήματα του υποκεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί:

- στα πρακτικά του 7<sup>ου</sup> Συνέδριου για το ΑΣΣ (SCC2013): 7<sup>th</sup> RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 2-4 Σεπτεμβρίου 2013, Παρίσι, Γαλλία [Sfikas et al. (2013a)]
- στα πρακτικά του Συμπόσιου fib: Concrete Structures for Sustainable Community, Royal Institute of Technology (KTH), 11-14 Ιουνίου 2012, Στοκχόλμη, Σουηδία [Sfikas et al. (2012)]

Επιπλέον, αντλήθηκαν στοιχεία και αποτελέσματα από τις ακόλουθες διπλωματικές / μεταπτυχιακές εργασίες, όπου ο γράφων συμμετείχε στις πειραματικές διεργασίες και αναλύσεις: Μπαγλατζή (2010), Παύλου (2010), Μακρής και Σμαργιανάκη (2012), Βούκια (2013).

4.2.2.2). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε κατά τη χρονική στιγμή της αρχικής επιβολής σταθερής τάσης εκατέρωθεν των πλευρών του δοκιμίου, παράλληλα με την εκτέλεση της πρότυπης επιταχυνόμενης μεθόδου [NordTest Build 492 \(1999\)](#).

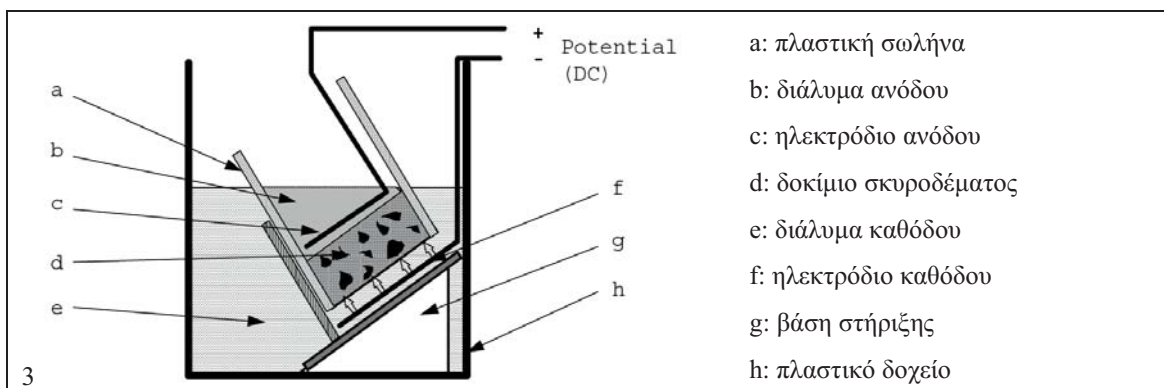
- Προσδιορισμός διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου (electric charge),  $Q$  (C), σύμφωνα με την πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδο (Παρ. 4.2.2.4), όπως περιγράφεται από το αμερικάνικο πρότυπο [ASTM C 1202 \(1999\)](#), η οποία εφαρμόστηκε στο συνεργαζόμενο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ), στο πλαίσιο της διεργαστηριακής σύγκρισης ιδιοτήτων μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ. Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ), ο υπολογισμός του ηλεκτρικού φορτίου στο ΕΩΣ/ΕΜΠ πραγματοποιήθηκε μέσω παραλλαγής της μεθόδου [NordTest Build 492 \(1999\)](#) (Παρ. 4.2.2.3), ώστε τα πειράματα να πραγματοποιηθούν υπό τις ίδιες συνθήκες (περιεκτικότητες διαλυμάτων, εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση και διάρκεια).

Σημειώνεται ότι, δεδομένου ότι η μέθοδος του ηλεκτρικού φορτίου [[ASTM C 1202 \(2009\)](#)], γνωστή και ως μέθοδος RCTP (Rapid Chloride Permeability Test), η οποία εφαρμόστηκε στο ΕΔΥ/ΠΚ δεν περιλαμβάνει τον υπολογισμό ενός συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, όπως στην περίπτωση της μεθόδου [NordTest Build 492 \(1999\)](#), η διεργαστηριακή σύγκριση των συνθέσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ποιοτικά, μέσω της τελικής κατάταξης των μιγμάτων ως προς την ανθεκτικότητά τους σε χλωριόντα, είτε ποσοτικά, μέσω του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί και στις δύο περιπτώσεις.

#### 4.2.2.1. Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων (πρότυπη μέθοδος)

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

Για την εκτίμηση της ικανότητας του σκυροδέματος να ανθίσταται στα χλωριόντα επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη δοκιμή [NordTest Build 492 \(1999\)](#), η οποία βασίζεται σε μέθοδο που είχαν αναπτύξει προγενέστερα οι [Tang and Nilsson \(1991\)](#). Παρά το γεγονός ότι η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό πεδίο για την επιτάχυνση της διείσδυσης χλωριόντων, το οποίο δεν υφίσταται σε πραγματικές κατασκευές, έχει αναφερθεί ότι τα αποτελέσματά της συσχετίζονται πολύ καλά με άλλες μεθόδους (π.χ. Salt Ponding Test, Bulk Diffusion Test), που προσομοιώνουν πιο ρεαλιστικές συνθήκες [[Audenaert \(2005\)](#), [Audenaert \(2007\)](#)].

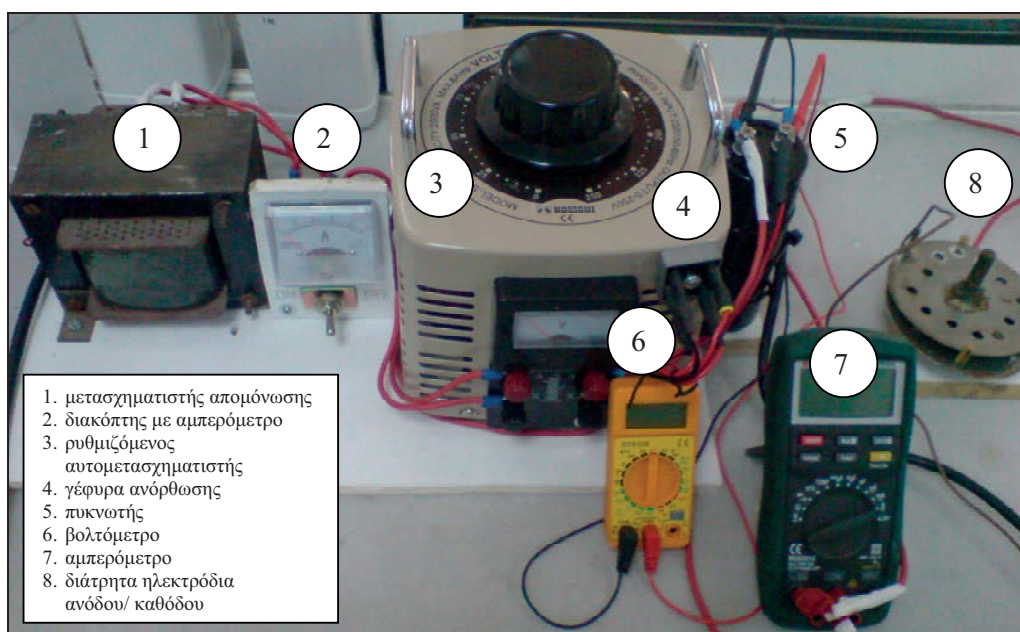


Σχήμα 343 Περιγραφή πειραματικής διάταξης [NordTest Build 492 \(1999\)](#)

Η επιταχυνόμενη δοκιμή NordTest Build 492 (1999) είναι μια ποσοτική δοκιμή που συνίσταται στον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς των χλωριόντων (chloride migration coefficient) στο σκυρόδεμα, μέσω πειραμάτων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state). Η μεταφορά των χλωριόντων επιτυγχάνεται μέσω εξαναγκασμένης επιταχυνόμενης κίνησης των χλωριόντων διαμέσου κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος, μέσω κατάλληλης διάταξης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 343.

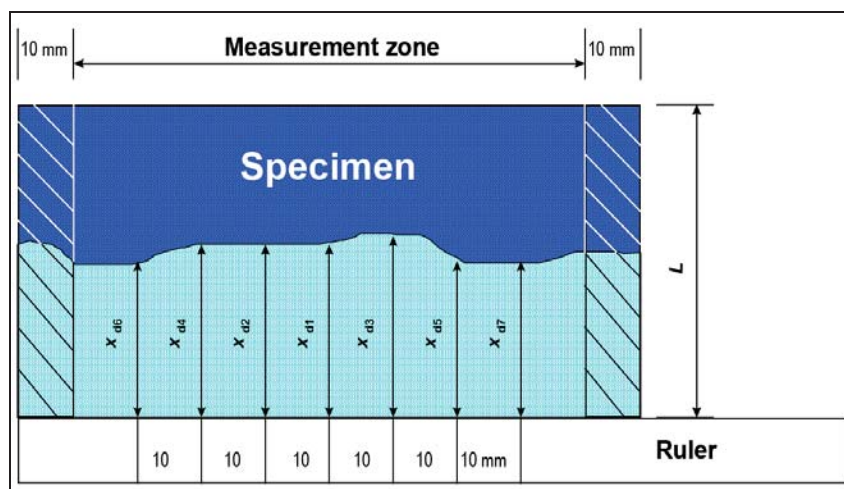
Πίνακας 118 Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]

Αρχικό ρεύμα υπό σταθερή διαφορά δυναμικού 30 V dc mA	Επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (κατόπιν ρύθμισης) V	Πιθανό νέο ρεύμα $I_0$ mA	Διάρκεια δοκιμής $t$ h
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$360 \leq I_0$	10	$120 \leq I_0$	6



Σχήμα 344 Πειραματική διάταξη δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα κατά NordTest Build 492 (1999) [πηγές: Παύλου (1010), προσωπικό φωτογραφικό αρχείο]

Ένα τμήμα κυλινδρικού δοκιμίου ( $D = 100 \text{ mm}$ ,  $L = 50 \text{ mm}$ ), εξαγόμενο από τη μεσαία ζώνη πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου ( $D = 100 \text{ mm}$ ,  $L = 200 \text{ mm}$ ) παραμένει, μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 έως 60 V dc (συνηθέστερα μεταξύ 10 και 30 V dc), για μία περίοδο μεταξύ 6 έως 96 ωρών (συνηθέστερα 24 ωρών). Η επιλογή της διαφοράς δυναμικού και της διάρκειας της δοκιμής γίνεται με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα για δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V dc (**Πίνακας 118**). Το διάλυμα καθόδου αποτελείται από 10 % κ.β. χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ ), ενώ το διάλυμα ανόδου αποτελείται από 0.3 N υδροξείδιο του νατρίου ( $\text{NaOH}$ ). Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μεθόδου, κατά την έναρξη και τη λήξη της δοκιμής καταγράφονται το διερχόμενο ρεύμα, η θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου και η ηλεκτρική αντίσταση του δοκιμίου. Η πειραματική διάταξη, η οποία κατασκευάστηκε στο ΕΩΣ/ΕΜΠ<sup>3</sup> στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 344**.



**Σχήμα 345** Μεθοδολογία καταγραφής βάθους διείσδυσης χλωριόντων από προφίλ δοκιμίου κατόπιν ψεκασμού με νιτρικό άργυρο [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]



**Σχήμα 346** Τυπικό προφίλ δοκιμίου σκυροδέματος κατόπιν δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα, σύμφωνα με το πρότυπο NordTest Build 492 (1999) και ψεκασμού με νιτρικό άργυρο

Για τον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης χλωριόντων εφαρμόζεται μία χρωματογραφική μέθοδος, ο μηχανισμός της οποίας μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία [Kim et al. (2007), Stanish et al. (1997), Otsuki et al. (1993)]. Συγκεκριμένα, μετά τη λήξη της δοκιμής, το δοκίμιο διαχωρίζεται αξονικά σε δύο τεμάχια (μέσω διάρρηξης) και μία εκ των δύο θραυσμένων επιφανειών ψεκάζεται με

<sup>3</sup> Ουσιαστική συμβολή στην κατασκευή της διάταξης είχαν οι συνάδελφοι Δ. Παύλου, ΠΜ, και Ι. Μανωλάς, ΗΜ.

διάλυμα 0.1 M νιτρικού αργύρου ( $AgNO_3$ ). Το βάθος διείσδυσης χλωριόντων προσδιορίζεται από τη χρωματική μεταβολή στην περιοχή, όπου η παρουσία χλωριόντων οδηγεί μέσω χημικών αντιδράσεων σε σχηματισμό χλωριούχου αργύρου ( $AgCl$ ). Στο **Σχήμα 345** και το **Σχήμα 346** παρουσιάζονται, αντιστοίχως, ο τρόπος μέτρησης του βάθους διείσδυσης και ένα τυπικό δοκίμιο, μετά τον ψεκασμό.

Η μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων,  $x_d$  (mm), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), ο οποίος αποτελεί μέτρο της ικανότητας του υλικού να ανθίσταται στη μεταφορά χλωριόντων. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι **Εξισώσεις (4.15)** έως **(4.17)** που ακολουθούν:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \quad (4.15)$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (4.16)$$

$$a = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right) \quad (4.17)$$

όπου:

- $D_{nssm}$  : συντελεστής διάχυσης χλωριόντων (m<sup>2</sup>/s)
- $z$  : απόλυτη τιμή του σθένους ιόντων, για χλωριόντα ( $z = 1$ )
- $F$  : σταθερά του Faraday ( $9.648 \times 10^4$  J/(V·mol))
- $U$  : απόλυτη τιμή την εφαρμοσμένης τάσης (V)
- $R$  : σταθερά αερίου ( $8.314$  J/(K·mol))
- $T$  : μέση τιμή αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου (K)
- $L$  : πάχος δοκιμίου (m)
- $x_d$  : μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (m)
- $t$  : διάρκεια του πειράματος (s)
- $c_d$  : συγκέντρωση χλωριόντων, για την οποία μεταβάλλεται το χρώμα (0.07 N)
- $c_0$  : συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου (2 N)

Σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο και γνωρίζοντας ότι η συνάρτηση σφάλματος για τις δεδομένες συγκεντρώσεις χλωριόντων είναι ίση με  $\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - (2 \cdot 0.07)/2\right) = 1.28$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη απλουστευμένη **Εξίσωση (4.18)**, η οποία προκύπτει αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (4.16) και (4.17) στην Εξίσωση (4.15):

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (4.18)$$

όπου:

- $D_{nssm}$  : συντελεστής διάχυσης χλωριόντων ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s)
- $U$  : απόλυτη τιμή την εφαρμοσμένης τάσης (V)
- $T$  : μέση τιμή αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου (°C)
- $L$  : πάχος δοκιμίου (mm)
- $x_d$  : μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm)
- $t$  : διάρκεια του πειράματος (h)



Ο Πίνακας 119 περιλαμβάνει την ταξινόμηση του σκυροδέματος ανάλογα με τον εκτιμηθέντα συντελεστή διάχυσης  $D_{nssm}$  σε ηλικία 28 ημερών, σύμφωνα τον Tang (1996). Άλλες παρεμφερείς ταξινομήσεις μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία (Nilsson et al. 1998 κατά τον GjØrn 2009, Πίνακας 120). Στους Πίνακες αναφέρονται συμπληρωματικώς και οι πρωτότυποι αγγλικοί περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των διαφόρων κατηγοριών σκυροδέματος.

**Πίνακας 119** Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων για διάφορους τύπου σκυροδέματος βάσει της διάχυσης χλωριόντων 28 ημερών [Tang (1996)]

Διάχυση χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων	
>16	Ακατάλληλο για επιθετικό περιβάλλον	Not suitable for aggressive environment
8-16	Μέτρια	Moderate
2-8	Καλή	Good
<2	Πολύ καλή	Very good

**Πίνακας 120** Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων για διάφορους τύπου σκυροδέματος βάσει της διάχυσης χλωριόντων 28 ημερών [Nilsson et al. (1998)]

Διάχυση χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων	
>15	Χαμηλή	Low
10-15	Μέτρια	Moderate
5-10	Υψηλή	High
2.5-5	Πολύ υψηλή	Very high
<2.5	Εξαιρετικά υψηλή	Extremely high

### Γενική παρουσίαση αποτελεσμάτων

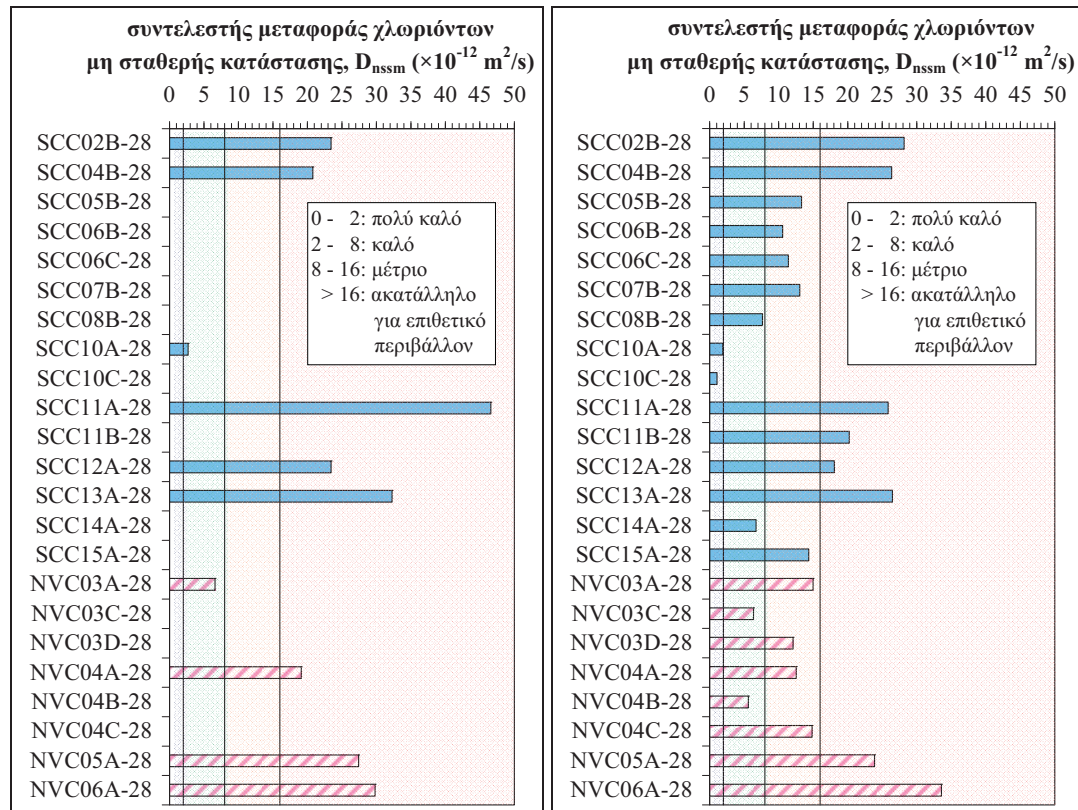
Στα πειράματα της παρούσας Διατριβής και λόγω εξοπλιστικών αδυναμιών τα δοκίμια αφενός δεν συντηρήθηκαν σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου (ασβεστόνερο, limewater),  $Ca(OH)_2$ , και αφετέρου δεν συντηρήθηκαν σε αντλία κενού (vacuum treatment) πριν τον έλεγχο τους. Όπως αναφέρουν οι Stanish et al. (2007) η συντήρηση σε ασβεστόνερο συνεισφέρει στην αποφυγή του φαινομένου αρχικής απορρόφησης κατά την εισαγωγή του διαλύματος χλωριόντων. Ομοίως, όπως αναφέρεται από τον Nawy (1996), η συντήρηση σε αντλία κενού αυξάνει την αντίσταση των επιφανειών σκυροδέματος σε ταχεία ροή υγρών. Ως συνέπεια των ανωτέρω, προκύπτει ότι η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, όπως υπολογίζεται στο πειραματικό πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, αναμένεται ελαφρώς μειωμένη. Πάντως, σημειώνεται ότι όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο τρόπο και, επομένως, τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Ο Πίνακας 121 περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των συνθέσεων που ελέγχθηκαν ως προς την αντίσταση σε μεταφορά χλωριόντων μέσω της επιταχυνόμενης μεθόδου NordTest Build 492 (1999). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες ηλικίες (28, 90 και 180 ημέρες) σε δοκίμια ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που είχαν συντηρηθεί με διαφορετικές μεθόδους (ΠΕ: περιβάλλον εργαστηρίου ή ΔΝ: δεξαμενή νερού). Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος συντήρησης σε περιβάλλον εργαστηρίου εφαρμόστηκε, κυρίως, δοκιμαστικά και στη συνέχεια εγκαταλείφθηκε, καθώς τα αποτελέσματα των ελέγχων παρουσίαζαν σημαντικές διασπορές. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 152 δοκιμές σε 64 συνθέσεις (46 συνθέσεις ΑΣΣ και 18 συνθέσεις ΣΣ).

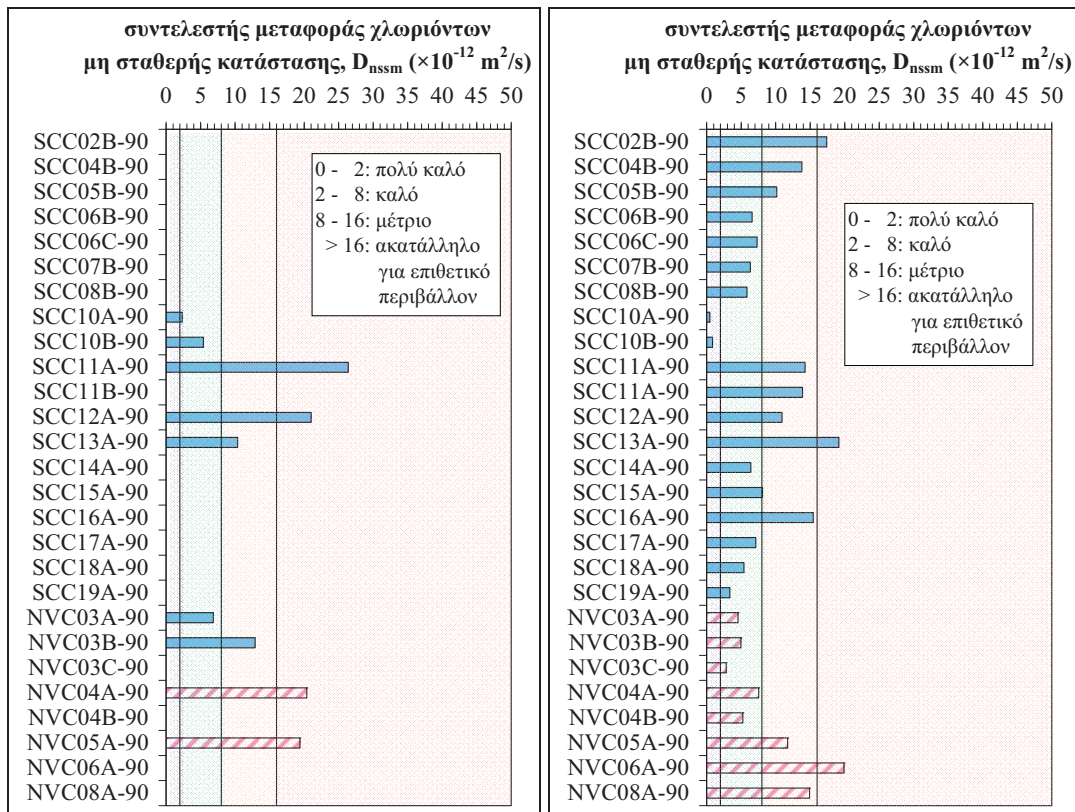
**Πίνακας 121** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν ως προς την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων μέσω της επιταχυνόμενης μεθόδου NordTest Build 492 (1999).

Τύπος Σκυροδέ- ματος Συντή- ρηση	Μίγματα ΑΣΣ		Μίγματα ΣΣ			
	ΠΕ+ΔΝ	ΔΝ	ΠΕ+ΔΝ	ΔΝ		
Κωδικοί Συνθέσεων	SCC02(1+3) <sup>1+3</sup>	2xSCC06(3) <sup>6</sup>	SCC29(1) <sup>1</sup>	4xNVC03(3+3) <sup>5+9</sup>	NVC08(3) <sup>3</sup>	
	SCC04(1+3) <sup>1+3</sup>	SCC07(3) <sup>3</sup>	SCC30(1) <sup>1</sup>	3xNVC04(3+3) <sup>3+8</sup>	NVC09(2) <sup>1**</sup>	
	SCC05(1+3) <sup>1+3</sup>	SCC08(3) <sup>3</sup>	SCC31(1) <sup>1</sup>	NVC05(2+2) <sup>2+2</sup>	NVC10(2) <sup>1**</sup>	
	3xSCC10(2+3) <sup>5+7</sup>	SCC14(3) <sup>3</sup>	SCC32(1) <sup>1</sup>	NVC06(1+3) <sup>1+3</sup>	NVC11(1) <sup>1</sup>	
	2xSCC11(2+3) <sup>2+6</sup>	SCC15(3) <sup>3</sup>	SCC33(1) <sup>1</sup>		NVC12(1) <sup>1</sup>	
	SCC12(2+3) <sup>3+3</sup>	SCC16(3) <sup>3</sup>	SCC34(1) <sup>1</sup>		NVC13(1) <sup>1</sup>	
	SCC13(2+3) <sup>3+3</sup>	SCC17(3) <sup>3</sup>	SCC35(1) <sup>1</sup>		NVC14(1) <sup>1</sup>	
		SCC18(3) <sup>3</sup>	SCC36(1) <sup>1</sup>		NVC15(1) <sup>1</sup>	
		SCC19(3) <sup>3</sup>	SCC45(1) <sup>1</sup>		NVC16(1) <sup>1</sup>	
		SCC20(2) <sup>1**</sup>	SCC47(1) <sup>1</sup>			
		SCC21(2) <sup>1**</sup>	SCC48(1) <sup>1</sup>			
		SCC22(2) <sup>1**</sup>	SCC49(1) <sup>1</sup>			
		SCC23(2) <sup>1**</sup>	SCC50(1) <sup>1</sup>			
		SCC24(2) <sup>1**</sup>	SCC51(1) <sup>1</sup>			
		SCC25(2) <sup>1**</sup>	SCC52(1) <sup>1</sup>			
		SCC26(1) <sup>1</sup>	SCC53(1) <sup>1</sup>			
		SCC27(1) <sup>1</sup>	SCC54(1) <sup>1</sup>			
		SCC28(1) <sup>1</sup>				
	<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>10</b>	<b>36</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>64</b>
		<b>(44 μετρ.)</b>	<b>(62 μετρ.)</b>	<b>(33 μετρ.)</b>	<b>(13 μετρ.)</b>	<b>(152 μετρ.)</b>

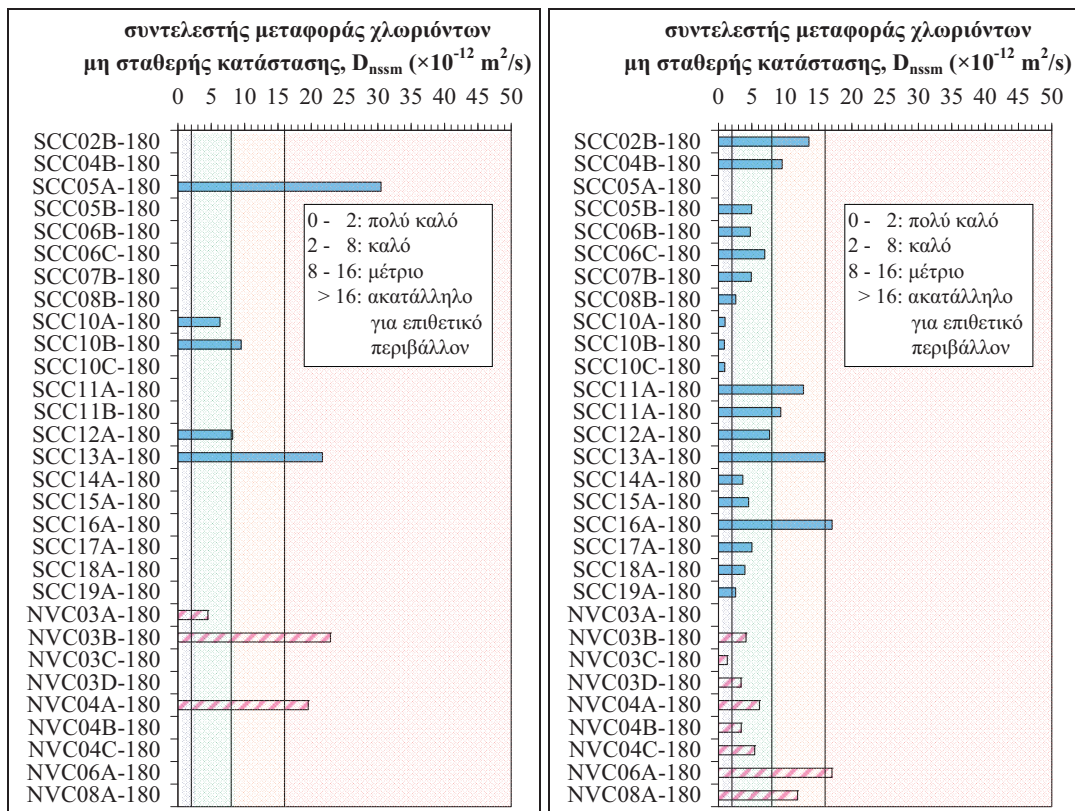
\*σε παρένθεση αναγράφεται το πλήθος των ελεγχόμενων ηλικιών (7, 28, 56, 90 ή/ και 360 ημέρες) και σε δύναμη το πλήθος των επιμέρους μετρήσεων \*\*οι συνθέσεις αυτές ελέγχθηκαν και με διαφορετικές συνθήκες ελέγχου (U=60V, T=6h).



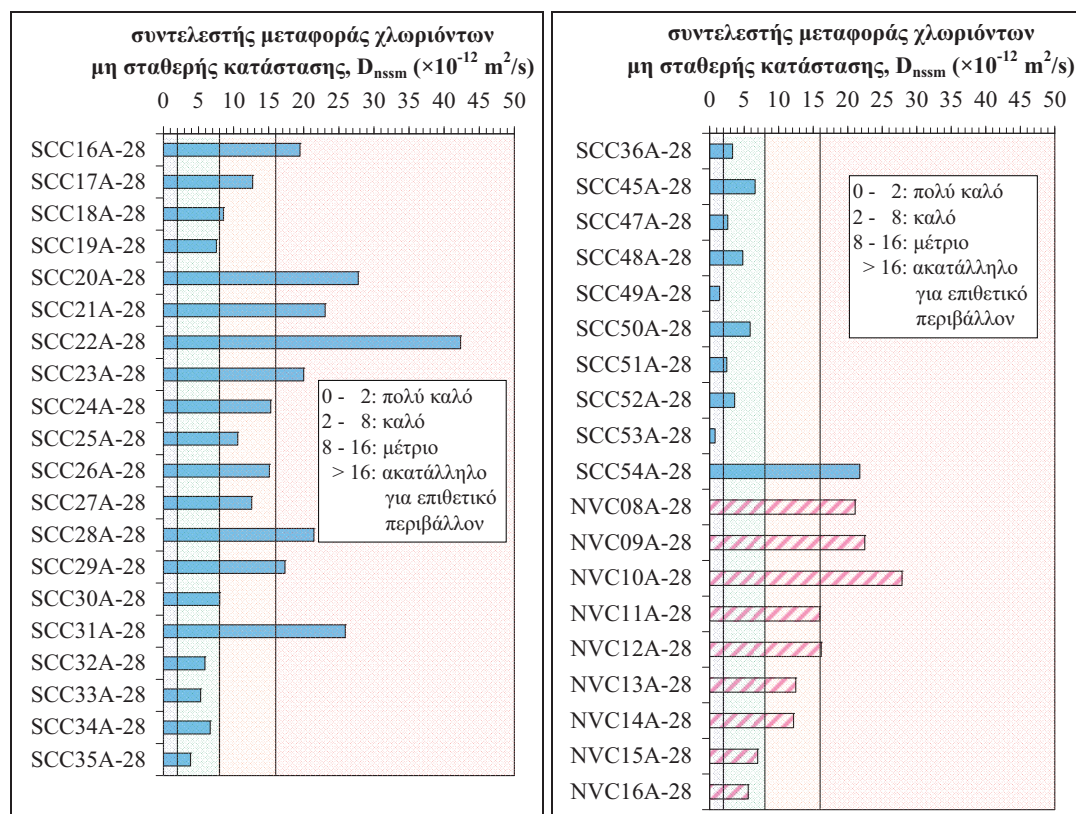
**Σχήμα 347** Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



Σχήμα 348 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 90 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



Σχήμα 349 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 180 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



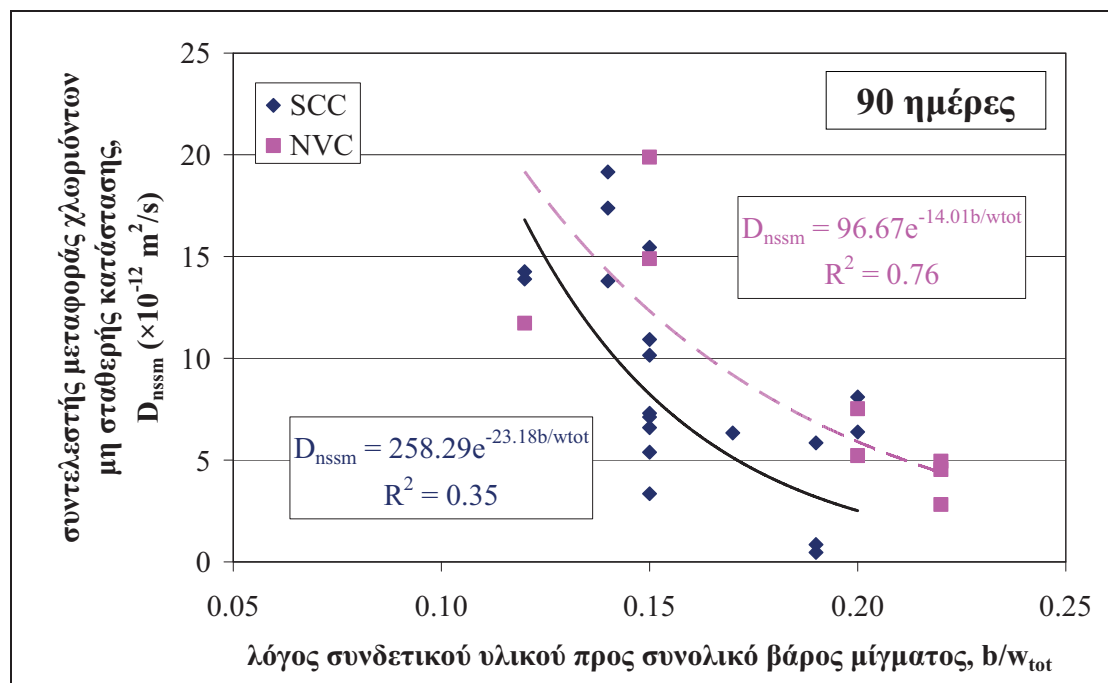
**Σχήμα 350** Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), σε δοκίμια συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού ( $\Delta N$ )

Σε μέρος των συνθέσεων, στο πλαίσιο της ερευνητικής συνεργασίας με το Πανεπιστήμιο Κύπρου, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον έλεγχοι με διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους συνθηκών και ελέγχου (διάλυμα  $NaCl$  3%, εφαρμογή σταθερής τάση  $U = 60$  V dc και διάρκεια ελέγχου  $T = 6$  h), ώστε τα αποτελέσματα να συγκριθούν και κατόπιν της εφαρμογής όμοιων συνθηκών πειράματος. Από το **Σχήμα 347** έως το **Σχήμα 350** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν στον συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όλων των μιγμάτων που ελέγχθηκαν για διάφορες ηλικίες (28, 90 και 180 ημέρες) και για διάφορες μεθόδους συντήρησης των δοκιμών (περιβάλλον εργαστηρίου ή δεξαμενή νερού). Για την ταξινόμηση των μιγμάτων σε κατηγορίες αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, ανάλογα με τον εκτιμηθέντα συντελεστή διάχυσης χλωριόντων,  $D_{nssm}$ , χρησιμοποιήθηκε η κατάταξη κατά **Tang (1996)** (Πίνακας 119).

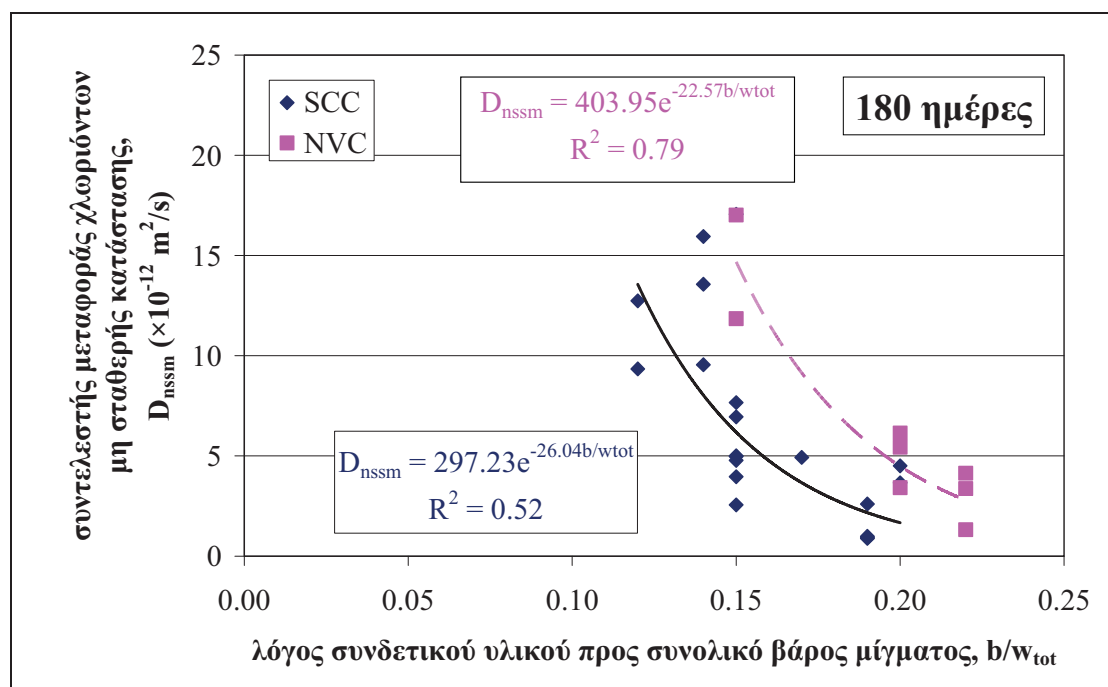
### Συσχέτιση με χαρακτηριστικά σύνθεσης

Ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), ανά ηλικία και μέθοδο συντήρησης, συσχετίστηκε μακροσκοπικά με διάφορα χαρακτηριστικά των συνθέσεων και, συγκεκριμένα, με: **(i)** τον λόγο άμμου προς τα συνολικά αδρανή,  $s/a$ , **(ii)** τον λόγο χονδρόκοκκων αδρανών προς τα συνολικά αδρανή,  $g/a$ , **(iii)** τον λόγο πάστας προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $p/w_{tot}$ , **(iv)** τον λόγο κονιάματος προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $m/w_{tot}$ , **(v)** τον λόγο τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$ , **(vi)** τον λόγο τσιμέντου προς λεπτόκοκκα,  $c/f$ , **(vii)** τον λόγο λεπτόκοκκων προς το συνολικό βάρος,  $f/w_{tot}$ , **(viii)** τον λόγο συνδετικού υλικού προς το συνολικό βάρος,  $b/w_{tot}$ , **(ix)** τον λόγο νερού προς τσιμέντο,  $w/c$ , και **(x)** τη μέση θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>). Οι πλέον ικανοποιητικές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν για τα δοκίμια που είχαν συντηρηθεί σε δεξαμενή νερού ( $\Delta N$ ) και

δοκιμάστηκαν σε ηλικία 90 ή/ και 180 ημερών. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής  $D_{nssm}$  φαίνεται να μειώνεται εκθετικά συναρτήσει του λόγου  $b/w_{tot}$  σε ηλικία 90 και 180 ημερών (Σχήμα 351 και Σχήμα 352, αντίστοιχα). Αντίστοιχες συσχετίσεις παρατηρούνται και για την περίπτωση του ΣΣ, με τη διαφορά ότι για κοινό λόγο  $b/w_{tot}$  ο συντελεστής  $D_{nssm}$  είναι μεγαλύτερος εν σχέσει προς το ΑΣΣ.



Σχήμα 351 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 90 ημερών συναρτήσει του λόγου συνδετικού υλικού προς συνολικό βάρος μίγματος,  $b/w_{tot}$



Σχήμα 352 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 180 ημερών συναρτήσει του λόγου συνδετικού υλικού προς συνολικό βάρος μίγματος,  $b/w_{tot}$

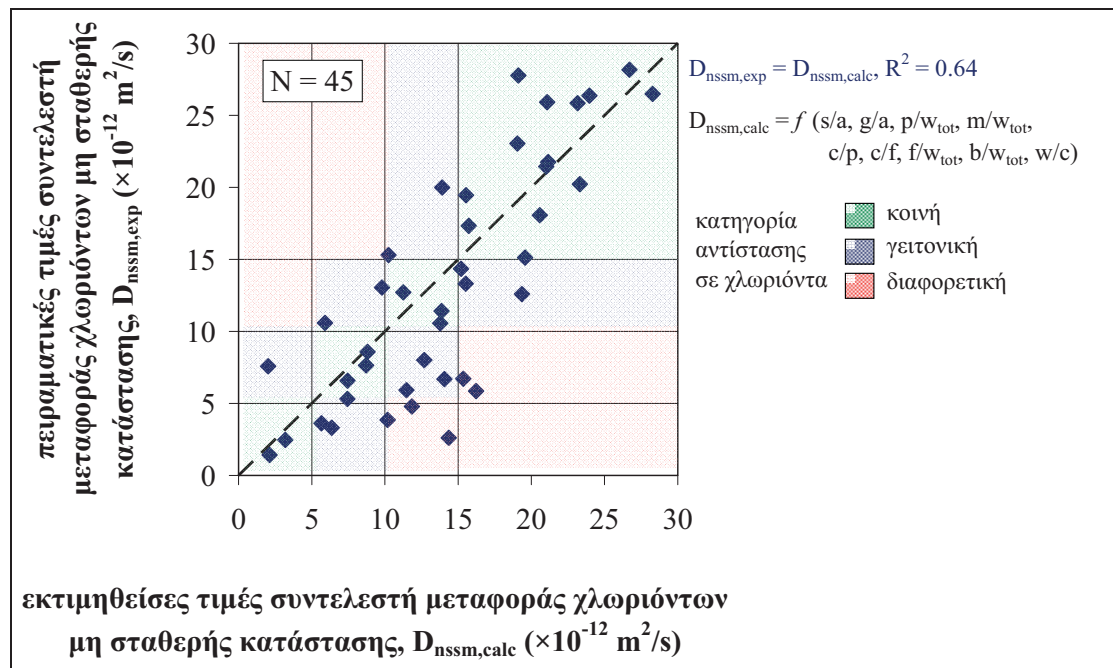
Κατ' αντιστοιχία με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά την αξιολόγηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στο ανοιχτό πορώδες, στην απορροφητικότητα και στην υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη πίεση, θα αναζητηθούν ακολούθως γραμμικές εξισώσεις της μορφής των **Εξισώσεων (4.19)** και **(4.20)** που να συνδέουν το συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), με όλες τις παραπάνω μεταβλητές, πλην της αντοχής. Η γραμμική ανάλυση γίνεται μόνο για τα αποτελέσματα σε ηλικία 28 ημερών, για την οποία υπήρχαν περισσότερα διαθέσιμα δεδομένα.

$$D_{nssm,calc} = a_1 (s/a) + a_2 (g/a) + a_3 (p/w_{tot}) + a_4 (m/w_{tot}) + a_5 (c/p) + a_6 (c/f) + a_7 (f/w_{tot}) + a_8 (b/w_{tot}) + a_9 (w/c) + a_{10} \quad (4.19)$$

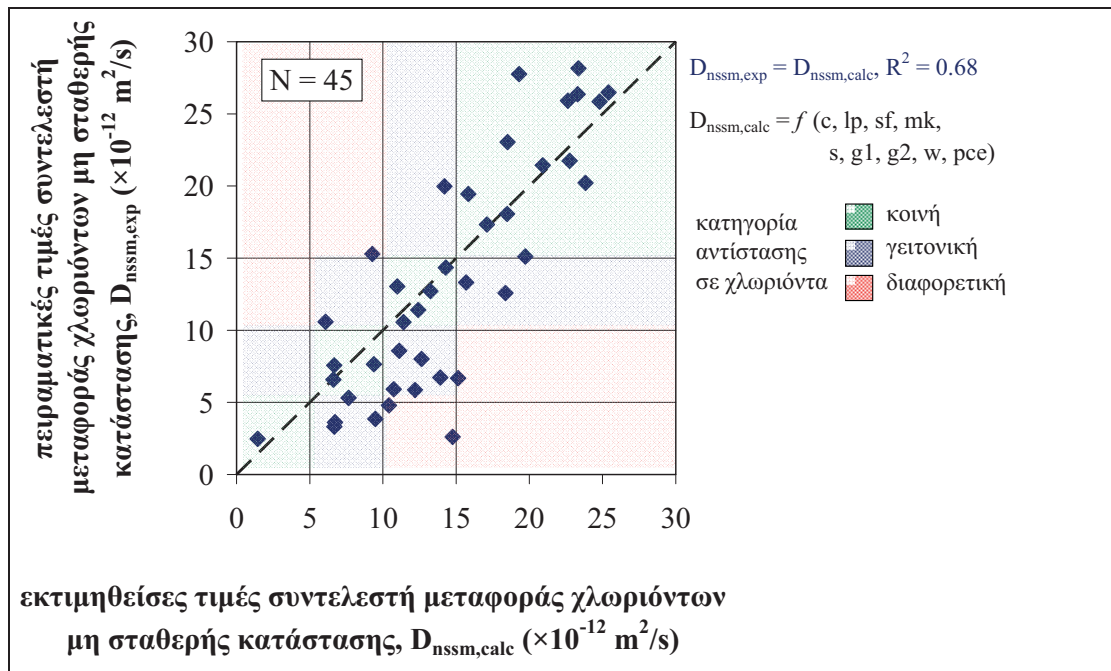
$$D_{nssm,calc} = \beta_1 c + \beta_2 lp + \beta_3 sf + \beta_4 mk + \beta_5 s + \beta_6 g1 + \beta_7 g2 + \beta_8 w + \beta_9 pce + \beta_{10} \quad (4.20)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $a_i$  και  $\beta_j$  ( $i, j = 1$  έως  $10$ ) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $a_i$  και  $\beta_j$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για το συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων 28 ημερών (πλήθος  $N = 45$ ),  $D_{nssm,exp}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s). Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης το συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων φαίνονται στο **Σχήμα 353** για την περίπτωση συσχέτισης με τους χαρακτηριστικούς λόγους των συστατικών της σύνθεσης και στο **Σχήμα 354** για την περίπτωση εκτίμησης μέσω των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης.

Ο **Πίνακας 122** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $a_i$  και  $\beta_j$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι σχετικώς ικανοποιητικοί ( $R^2 = 0.64$  και  $0.68$  για την περίπτωση εκτίμησης μέσω των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών και των περιεκτικότητων τους, αντίστοιχα). Σε κάθε περίπτωση, τα ζεύγη τιμών ανήκουν σε κοινή ή γειτονική κατηγορία αντίστασης σε χλωριόντα.



**Σχήμα 353** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm,calc}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεων των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $D_{nssm,exp}$



**Σχήμα 354** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm,calc}$  ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές,  $D_{nssm,exp}$

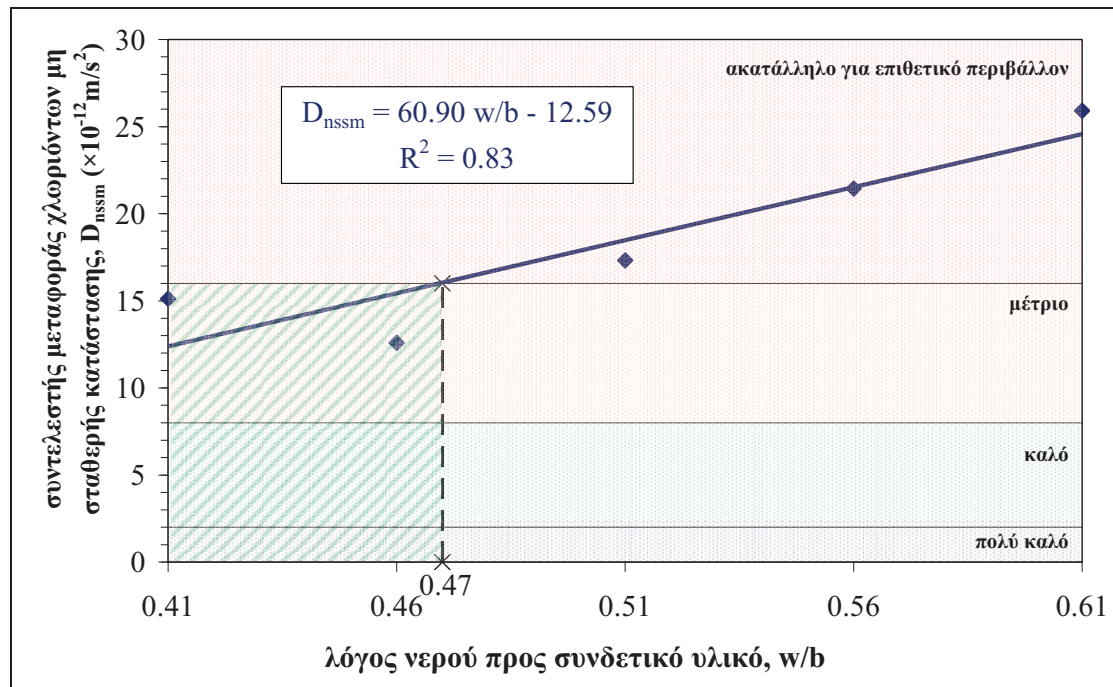
**Πίνακας 122** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm,calc}$  ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$  και  $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$  και  $\beta_j^*$ )

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_i$	-553,80	-778,63	138,93	-365,97	-36,95	152,96	-181,38	-15,45	-6,19	787,67
$\beta_j$	-0,076	0,027	-0,352	-0,413	-0,016	-0,013	-0,015	0,110	0,255	44,840

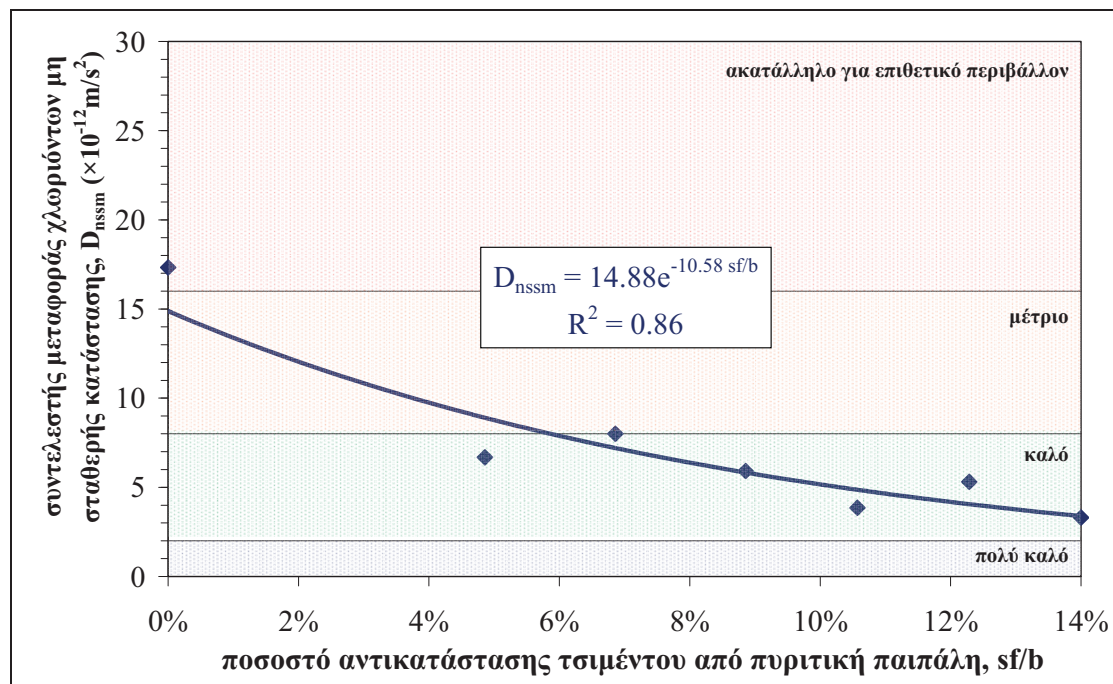
Στη συνέχεια, εξετάζονται μόνο οι παράμετροι που διερευνήθηκαν σε κάθε υπο-ομάδα συνθέσεων ξεχωριστά, σε ηλικία 28 ημερών, ήτοι: **(α)** ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , **(β)** ο λόγος πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , **(γ)** ο λόγος μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/b$ , **(δ)** ο λόγος μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk/lp\}$ , σε μίγματα ΑΣΣ και **(ε)** ο λόγος υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε μίγματα ΣΣ. Επιπλέον, **(στ)** εξετάζονται συγκριτικά τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b = 0.51$  και παρεμφερή θλιπτική αντοχή,  $f_{cc} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ .

**Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )**

Στο **Σχήμα 355** παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Α (Πίνακας 37, Κεφ. 2), με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ . Παρατηρείται ότι ο συντελεστής  $D_{nssm}$  αυξάνεται γραμμικά για την αύξηση του λόγου  $w/b$ , σε εύρος από 0.41 έως 0.61, με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.83$ ). Για τις δεδομένες αναλογίες συστατικών σκυροδέματος των επιμέρους συνθέσεων της υπο-ομάδας Α, φαίνεται ότι λόγοι  $w/b$  άνω του 0.47 οδηγούν σε σκυρόδεμα ακατάλληλο για επιθετικό περιβάλλον (ως προς την έκθεση σε χλωριόντα), σύμφωνα με την κατάταξη κατά **Tang (1996)** των σκυροδεμάτων βάσει του συντελεστή  $D_{nssm}$ .



Σχήμα 355 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 356 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

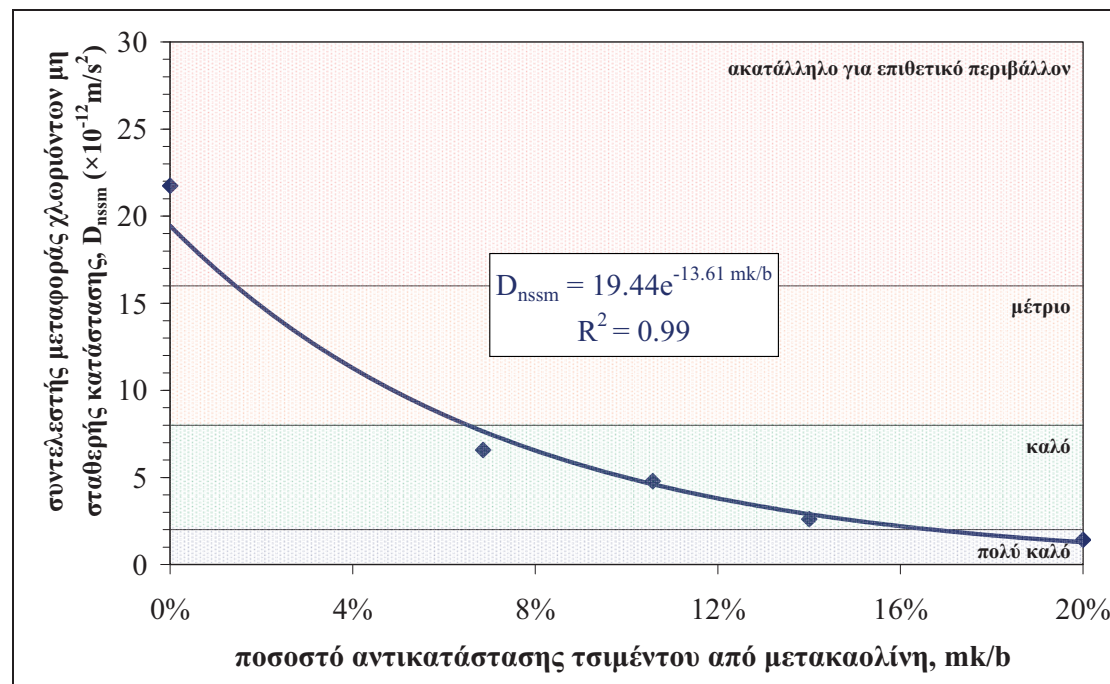
Στο Σχήμα 356 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Β1 (Πίνακας 38, Κεφ. 2), με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf\{sf+c\}$  ή  $sf/b$ . Παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου οδηγεί



σε σημαντική μείωση του συντελεστή  $D_{nssm}$ , βελτιώνοντας έτσι την αντίσταση του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Η εν λόγω συσχέτιση των δύο μεγεθών περιγράφεται μέσω εκθετικής συνάρτησης, με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.86$ ). Η αντίσταση του μίγματος αναφοράς βελτιώθηκε με την προσθήκη πυριτικής παιπάλη (ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου) κατά δύο κατηγορίες ανθεκτικότητας έναντι χλωριόντων, σύμφωνα με την κατάταξη κατά Tang (1996), ενώ φαίνεται ότι μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη βελτιώνουν ακόμη περισσότερο την ικανότητα αντίστασης του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Πάντως, στο εξεταζόμενο εύρος λόγων  $sf/b$ , από 4.9 έως 14.0 % κ.β., οι τιμές του συντελεστή  $D_{nssm}$  μεταβάλλονται εντός της κατηγορίας κατάταξης ανθεκτικότητας έναντι χλωριόντων «καλό σκυρόδεμα». Για την συγκεκριμένη σύνθεση αδρανών και περιεκτικότητα νερού ( $w/b = 0.51$ ), περαιτέρω αύξηση του ποσοστού  $sf/b$  δε φαίνεται να μπορεί να βελτιώσει περισσότερο την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι χλωριόντων.

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ )

Στο Σχήμα 357 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Γ (Πίνακας 40, Κεφ. 2) σε ηλικία 28 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ .



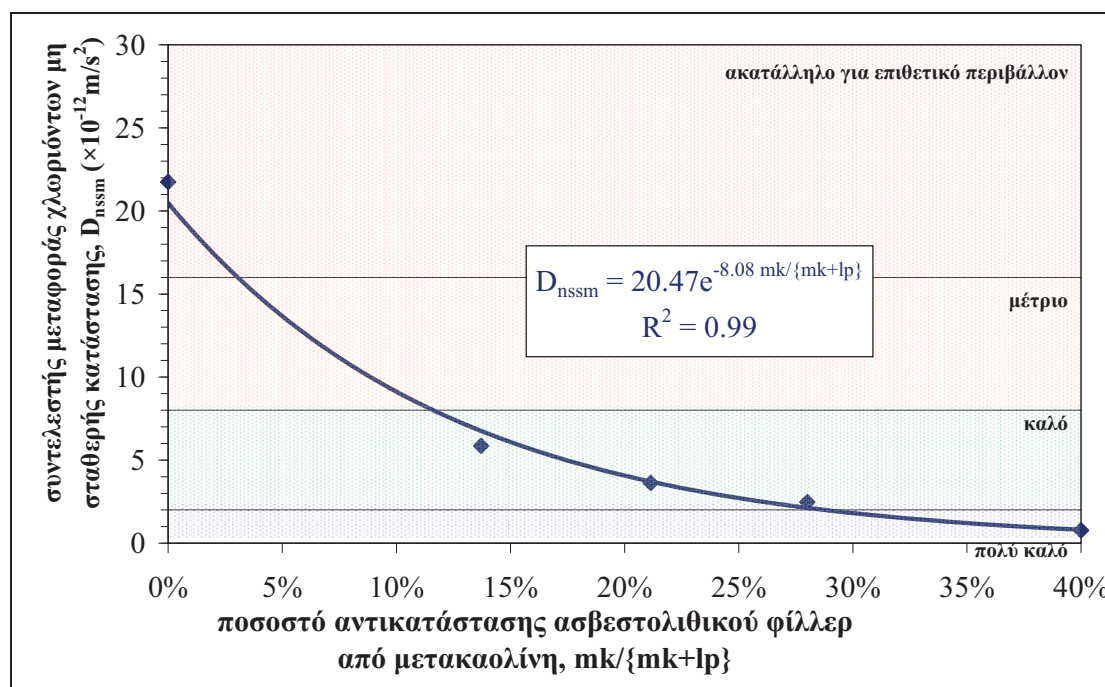
Σχήμα 357 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών

Παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου οδηγεί σε σημαντική μείωση του συντελεστή  $D_{nssm}$ , βελτιώνοντας έτσι την αντίσταση του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Η εν λόγω συσχέτιση των δύο μεγεθών περιγράφεται μέσω εκθετικής συνάρτησης, με εξαιρετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.99$ ). Η αντίσταση του μίγματος αναφοράς βελτιώθηκε κατά δύο κατηγορίες ανθεκτικότητας έναντι χλωριόντων, σύμφωνα με την κατάταξη κατά Tang (1996), ενώ φαίνεται ότι μεγαλύτερα ποσοστά (μεγαλύτερα από 16 %) βελτιώνουν

ακόμη περισσότερο την ικανότητα αντίστασης του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Συγκρικά με την περίπτωση αντικατάστασης του τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, παρατηρείται ότι, παρόλο που οι λόγοι  $w/b$  είναι διαφορετικοί (0.51 και 0.60 για την περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $sf/b$  και  $mk/b$ , αντίστοιχα) η βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του μετακαολίνη.

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Στο **Σχήμα 358** παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Δ (Πίνακας 41, Κεφ. 2) σε ηλικία 28 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$ . Όπως και στην περίπτωση αντικατάστασης του τσιμέντου, και εδώ παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ οδηγεί σε σημαντική μείωση του συντελεστή  $D_{nssm}$ , βελτιώνοντας έτσι την αντίσταση του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Είναι αξιοσημείωτο ότι η μεταβολή του συντελεστή  $D_{nssm}$  είναι πρακτικώς ίδια, ανεξαρτήτως του υλικού που αντικαθίσταται, τσιμέντο ή ασβεστολιθικό φίλερ (Σχήμα 357, Σχήμα 358). Η συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή  $D_{nssm}$  και του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$  περιγράφεται και εδώ μέσω εκθετικής συνάρτησης, με εξαιρετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.99$ ). Η αντίσταση του μίγματος αναφοράς βελτιώθηκε πάλι κατά δύο κατηγορίες ανθεκτικότητας έναντι χλωριόντων, σύμφωνα με την κατάταξη κατά **Tang (1996)**, ενώ φαίνεται ότι μεγαλύτερα ποσοστά (μεγαλύτερα από 30 % κ.β.) βελτιώνουν ακόμη περισσότερο την ικανότητα αντίστασης του σκυροδέματος σε χλωριόντα.



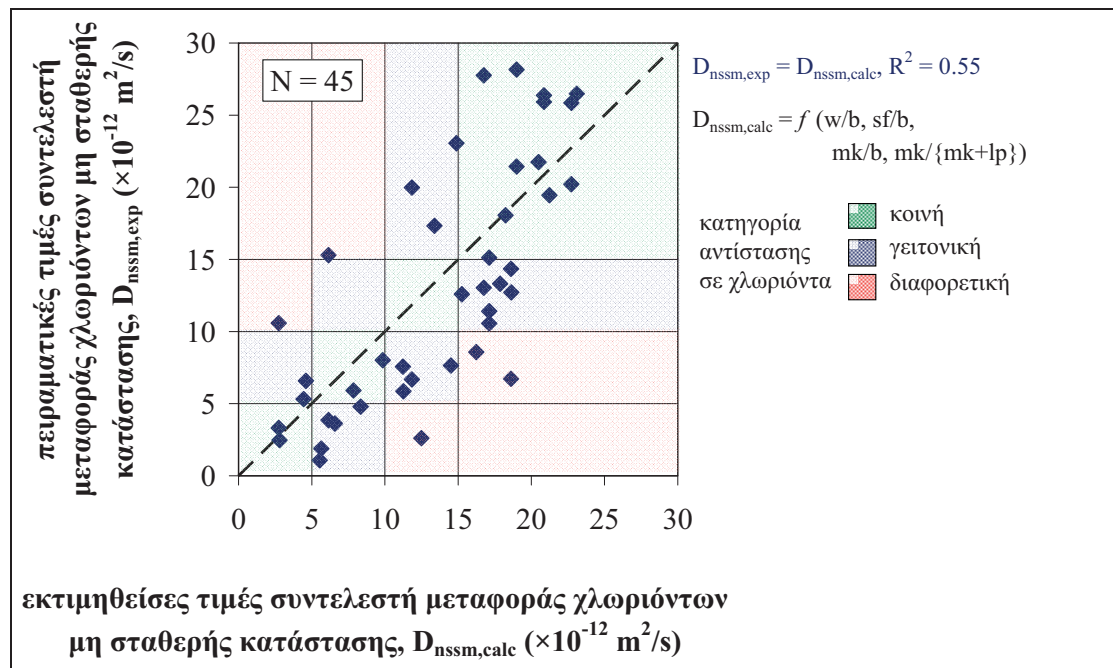
**Σχήμα 358** Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων δοκιμών μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$ ), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Δ σε ηλικία 28 ημερών

**Συσχέτιση με χαρακτηριστικούς λόγους συστατικών**

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, για σταθερή σύνθεση των αναμιγμάτων με μία μοναδική μεταβλητή, ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης βρέθηκε ότι εξαρτάται από τη μεταβολή των λόγων  $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$ . Στη συνέχεια, θα αναζητηθεί μία γραμμική εξίσωση της μορφής της **Εξίσωσης (4.21)** που να συνδέει όλες τις παραπάνω μεταβλητές, για καθένα από τα δύο μεγέθη που εξετάστηκαν.

$$D_{nssm,calc} = \gamma_1 (w/b) + \gamma_2 (sf/b) + \gamma_3 (mk/b) + \gamma_4 (mk/\{mk+lp\}) + \gamma_5 \quad (4.21)$$

Όπως και στις αναλύσεις που προηγήθηκαν, για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\gamma_k$  ( $k = 1$  έως  $5$ ) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\gamma_k$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα (πλήθος  $N = 45$ ) για το συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων 28 ημερών,  $D_{nssm,exp}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s). Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης για το συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 359**, ενώ ο **Πίνακας 123** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\gamma_k$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης είναι σχετικά ικανοποιητικός ( $R^2 = 0.55$ ), ενώ τα ζεύγη τιμών βρίσκονται σε κοινή ή γειτονική κατηγορία αντίστασης σε χλωριόντα.



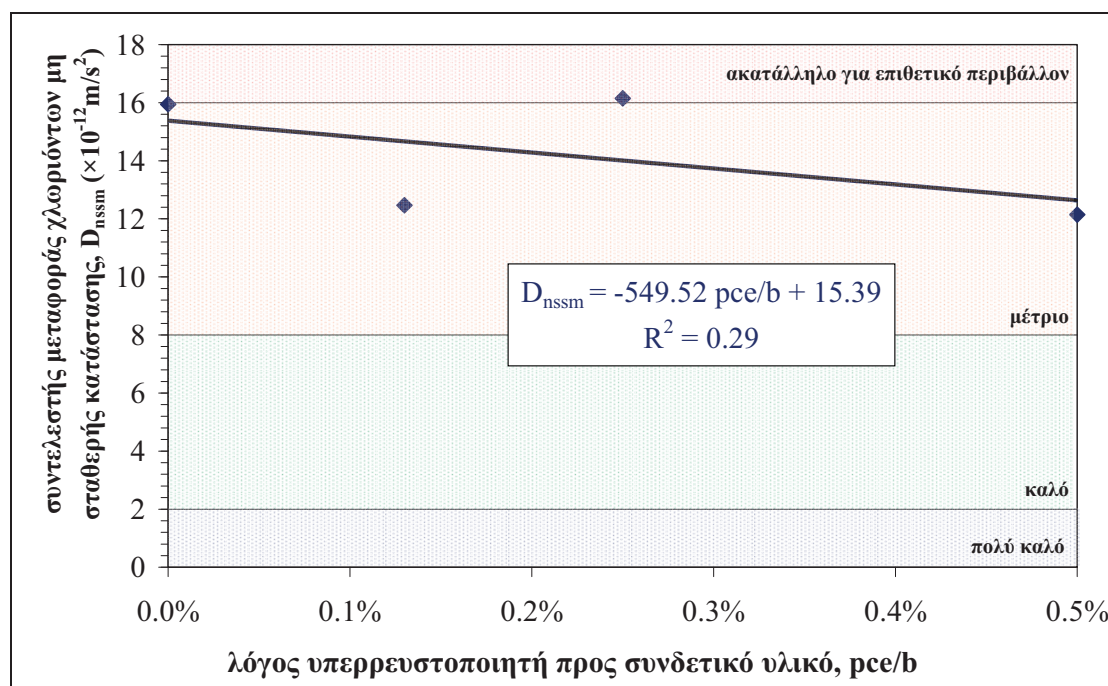
**Σχήμα 359** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm,calc}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $D_{nssm,exp}$

**Πίνακας 123** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm,calc}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

k	1	2	3	4	5
$\gamma_k$	37,38	-100,02	-93,61	-12,71	-1,94

### Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

Στο **Σχήμα 360** παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων E (Πίνακας 42, Κεφ. 2), με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή ως προς το συνδετικό υλικό,  $pce/b$ . Αν και παρατηρείται μία πτωτική τάση του συντελεστή  $D_{nssm}$  για μεγαλύτερα ποσοστά υπερρευστοποιητή (για σταθερή περιεκτικότητα συνδετικού υλικού), θεωρείται ότι η διακύμανση είναι τυχαία και οι τιμές αποτελούν στατιστική απόκλιση γύρω από μία μέση τιμή, καθώς οι μεταβολές του υπερρευστοποιητή είναι πολύ χαμηλές για να δικαιολογούν μια τέτοια συμπεριφορά.

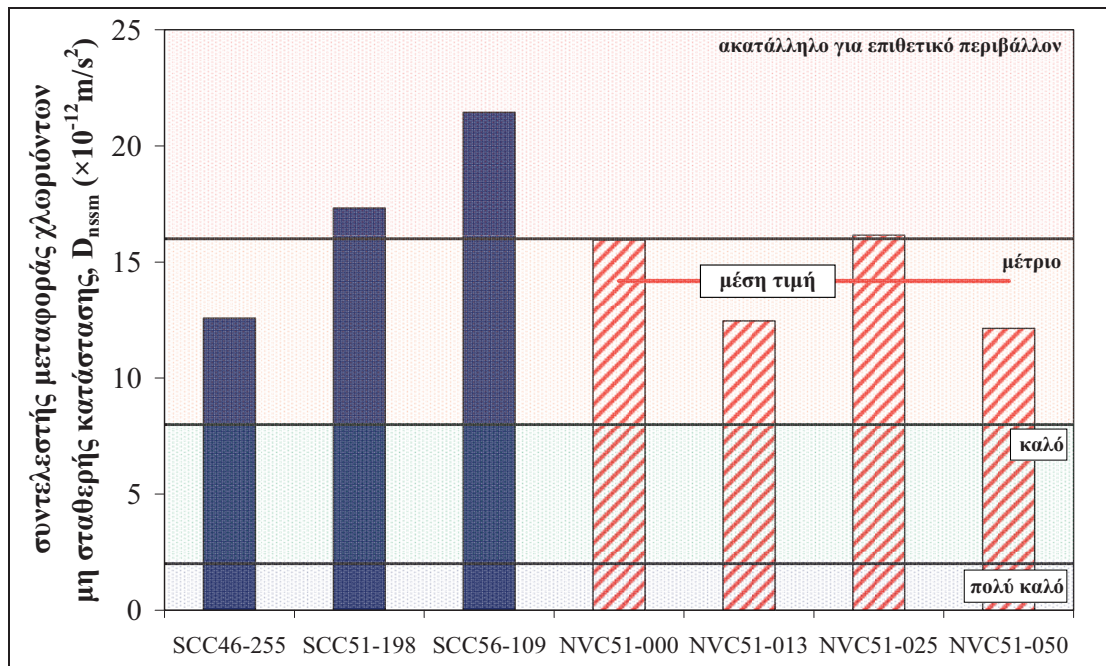


**Σχήμα 360** Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων E σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή τύπου σκυροδέματος

Στο **Σχήμα 361** παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Πίνακας 43 και Πίνακας 44, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή,  $pce/b$  (για σταθερή περιεκτικότητα συνδετικού υλικού). Υπενθυμίζεται ότι η ονοματολογία των συνθέσεων έχει δοθεί ως εξής {ΤύποςΣκυροδέματος} $w/b(\%)$ - $pce/b(\%)$ .

Παρατηρείται ότι για κοινή κοκκομετρία (πλην λεπτόκοκκων υλικών) και κοινό λόγο  $w/b$  (0.51) ο συντελεστής  $D_{nssm}$  είναι περίπου 20 % υψηλότερος στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ (σύγκριση SCC51-198 με όλα τα μίγματα NVC51), γεγονός που αποδίδεται στην ενσωμάτωση του ασβεστολιθικού φίλερ και έχει αναφερθεί και από τον Persson (2004).



Σχήμα 361 Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Z σε ηλικία 28 ημερών

#### 4.2.2.2. Ειδική αντίσταση σκυροδέματος

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

Η ειδική αντίσταση,  $\rho$  ( $\text{k}\Omega\text{-cm}$ ), του σκυροδέματος, που υπολογίζεται βάσει των Εξισώσεων (4.22) και (4.23), σχετίζεται με την ικανότητά του να ανθίσταται στη διείσδυση των χλωριόντων. Η τιμή της ειδικής αντίστασης μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας σταθερή τάση,  $U$  (V), μέσω αντικριστών ηλεκτροδίων σε δύο απέναντι παρειές του υπό έλεγχο δοκιμίου σκυροδέματος (Σχήμα 343) και καταγράφοντας το διερχόμενο ρεύμα,  $I$  (A).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (4.22)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (4.23)$$

- όπου:  $R$  : ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος ( $\text{k}\Omega = 1000 \text{ V/A}$ )  
 $A$  : επιφάνεια της διατομής ( $\text{cm}^2$ )  
 $L$  : πάχος δοκιμίου (cm)  
 $U$  : απόλυτη τιμή την εφαρμοσμένης τάσης (V)  
 $I$  : διερχόμενο ρεύμα (A)

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το ζεύγος εφαρμοζόμενης τάσης – ηλεκτρικού ρεύματος, όπως καταγράφηκαν κατά την έναρξη της δοκιμής NordTest Build 492 (1999). Η αμερικάνικη οδηγία ACI 222R-01 (2001) παρέχει μία ποιοτική εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης, ανάλογα με την τιμή της ειδικής αντίστασης του σκυροδέματος (Πίνακας 124). Στον Πίνακα αναφέρονται και οι πρωτότυποι αγγλικοί περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των διαφόρων σκυροδεμάτων.

**Πίνακας 124** Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της ειδικής αντίστασης [πηγή: [ACI 222R \(2001\)](#)]

Ειδική αντίσταση kΩ-cm	Ρυθμός διάβρωσης	
> 20	Χαμηλός	Low
10 έως 20	Χαμηλός έως μέσος	Low to moderate
5 έως 10	Υψηλός	High
< 5	Πολύ υψηλός	Very high

### Γενική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης πραγματοποιήθηκε για όλα τα δοκίμια που ελέγχθηκαν με τη μέθοδο [NordTest Build 492 \(1999\)](#), βάσει των καταγραφών της εφαρμοζόμενης τάσης και του συνεπακολούθως διερχόμενου ρεύματος Πίνακας 121). Από το **Σχήμα 362** έως το **Σχήμα 365** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν στην ειδική αντίσταση,  $\rho$  (kΩ-cm), όλων των μιγμάτων που ελέγχθηκαν για διάφορες ηλικίες (28, 90 και 180ημέρες) και για δύο μεθόδους συντήρησης (περιβάλλον εργαστηρίου ή δεξαμενή νερού).

### Συσχέτιση με χαρακτηριστικά σύνθεσης

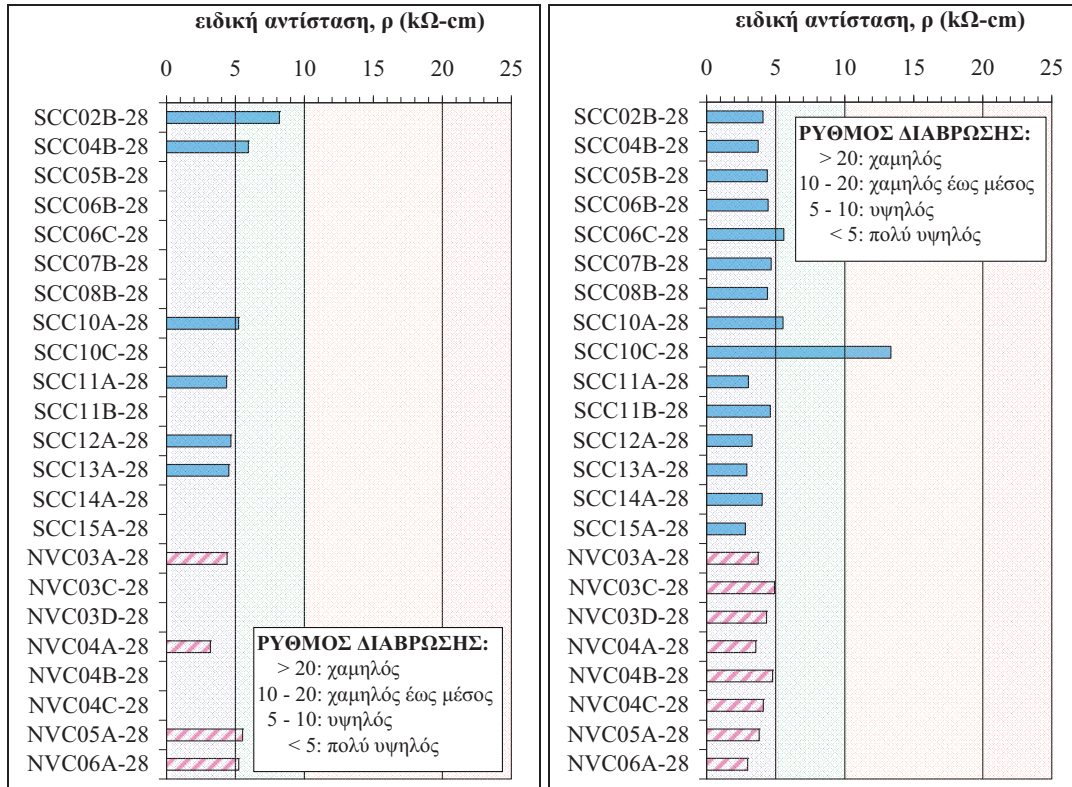
Η ειδική αντίσταση,  $\rho$  (kΩ-cm), ανά ηλικία και μέθοδο συντήρησης, συσχέτιστηκε μακροσκοπικά με διάφορα χαρακτηριστικά των συνθέσεων και, συγκεκριμένα, με: **(i)** τον λόγο άμμου προς τα συνολικά αδρανή,  $s/a$ , **(ii)** τον λόγο χονδρόκοκκων αδρανών προς τα συνολικά αδρανή,  $g/a$ , **(iii)** τον λόγο πάστας προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $p/w_{tot}$ , **(iv)** τον λόγο κονιάματος προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $m/w_{tot}$ , **(v)** τον λόγο τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$ , **(vi)** τον λόγο τσιμέντου προς λεπτόκοκκα,  $c/f$ , **(vii)** τον λόγο λεπτόκοκκων προς το συνολικό βάρος,  $f/w_{tot}$ , **(viii)** τον λόγο συνδετικού υλικού προς το συνολικό βάρος,  $b/w_{tot}$ , **(ix)** τον λόγο νερού προς τσιμέντο,  $w/c$ , και **(x)** τη μέση θλιπτική αντοχή,  $f_{cc}$  (N/mm<sup>2</sup>).

Δεν παρατηρήθηκε καμία αξιόλογη συσχέτιση μεταξύ των παραπάνω μεγεθών στις ομάδες μιγμάτων που εξετάστηκαν. Κατ' αντιστοιχία με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά την αξιολόγηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της σύνθεσης στα υπόλοιπα μεγέθη ανθεκτικότητας, θα αναζητηθούν ακολούθως γραμμικές εξισώσεις της μορφής των **Εξισώσεων (4.24)** και **(4.25)** που να συνδέουν την ειδική αντίσταση,  $\rho$  (kΩ-cm), με όλες τις παραπάνω μεταβλητές, πλην της αντοχής. Η γραμμική ανάλυση γίνεται μόνο για τα αποτελέσματα σε ηλικία 28 ημερών, για την οποία υπήρχαν περισσότερα διαθέσιμα δεδομένα.

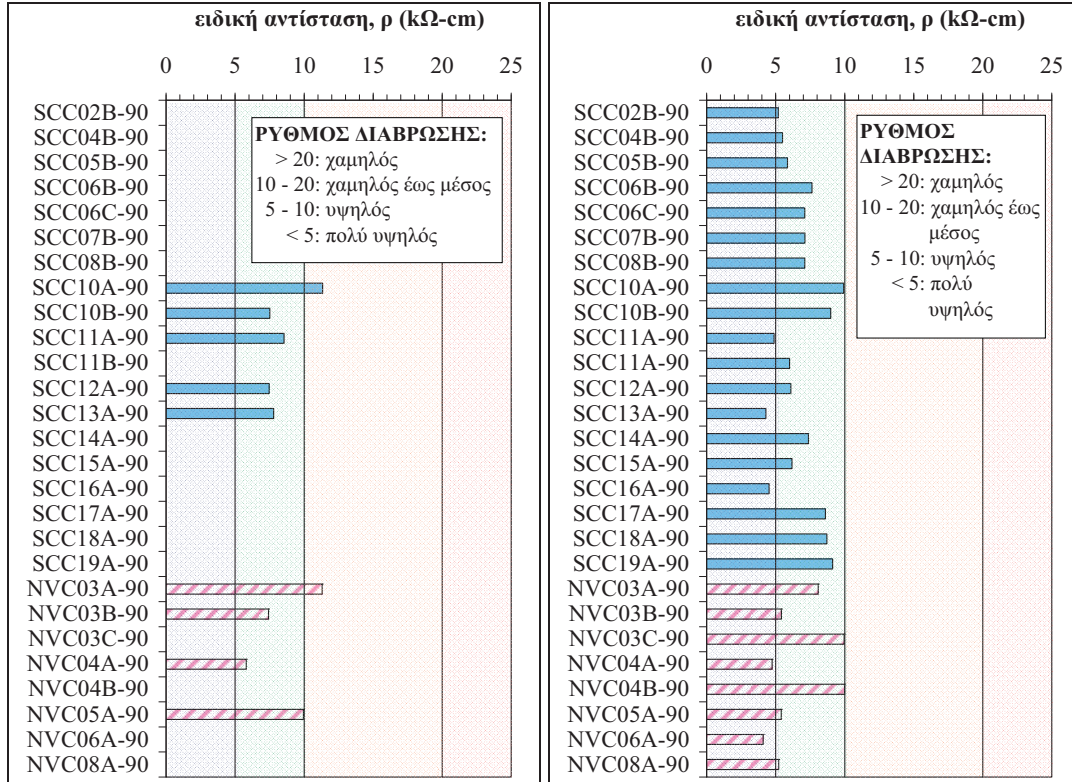
$$\rho_{calc} = \alpha_1 (s/a) + \alpha_2 (g/a) + \alpha_3 (p/w_{tot}) + \alpha_4 (m/w_{tot}) + \alpha_5 (c/p) + \alpha_6 (c/f) + \alpha_7 (f/w_{tot}) + \alpha_8 (b/w_{tot}) + \alpha_9 (w/c) + \alpha_{10} \quad (4.24)$$

$$\rho_{calc} = \beta_1 c + \beta_2 lp + \beta_3 sf + \beta_4 mk + \beta_5 s + \beta_6 g1 + \beta_7 g2 + \beta_8 w + \beta_9 pce + \beta_{10} \quad (4.25)$$

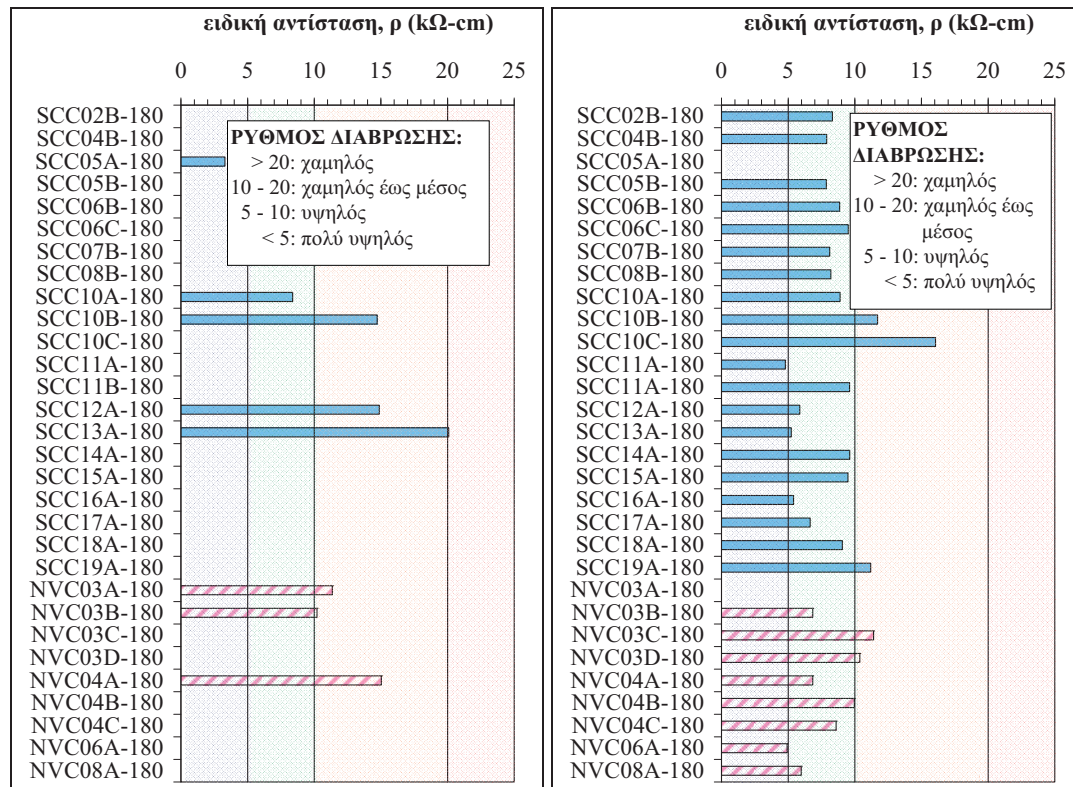
Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha_i$  και  $\beta_j$  ( $i, j = 1$  έως 10) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\alpha_i$  και  $\beta_j$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την ειδική αντίσταση (πλήθος  $N = 45$ ),  $\rho_{exp}$  (kΩ-cm).



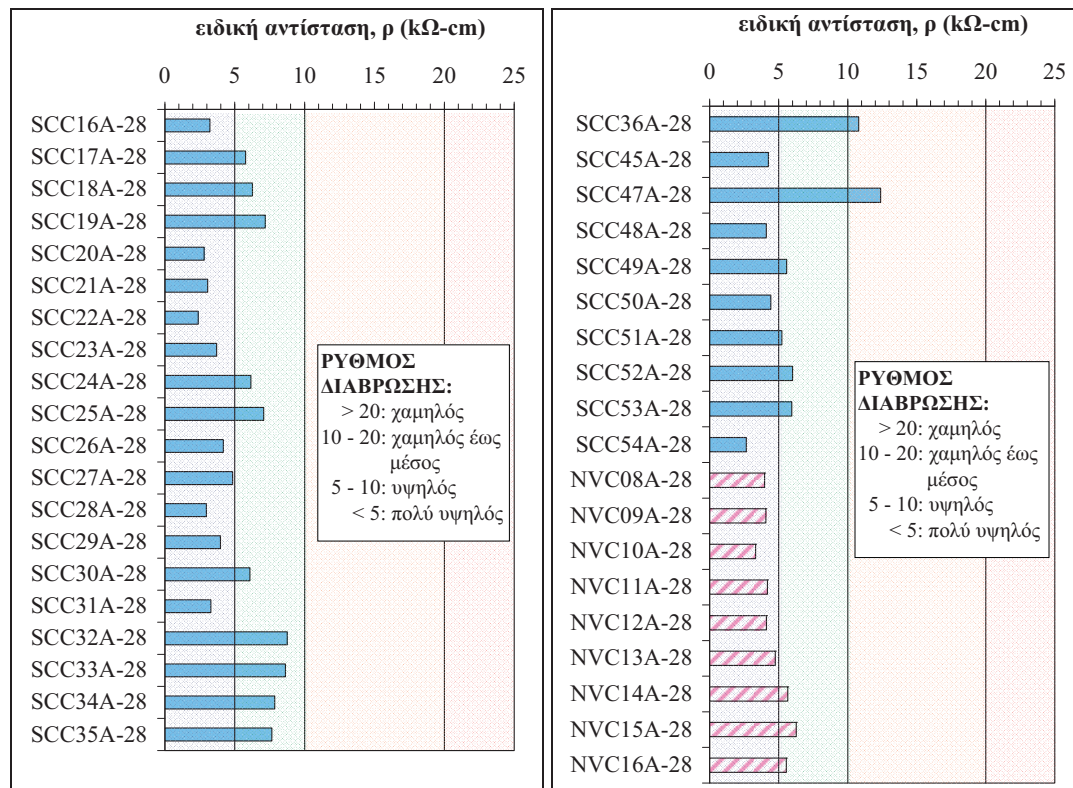
Σχήμα 362 Ειδική αντίσταση, ρ (kΩ-cm), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



Σχήμα 363 Ειδική αντίσταση, ρ (kΩ-cm), δοκιμίων συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 90 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



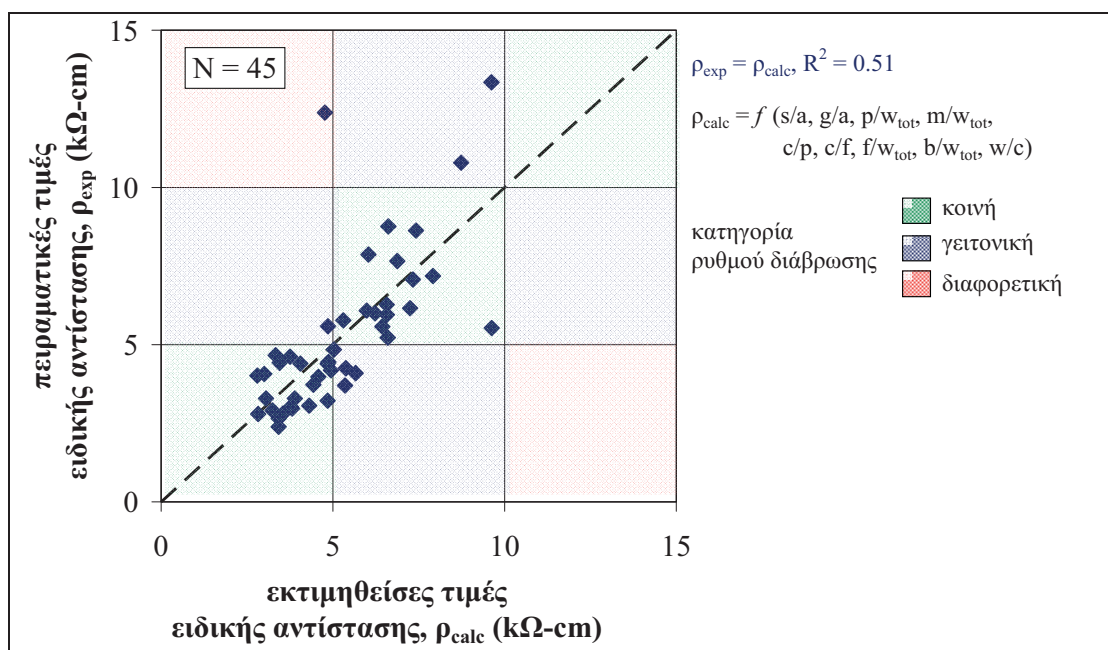
Σχήμα 364 Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (k $\Omega$ -cm), δοκιμών συνθέσεων που ελέγχθηκαν σε ηλικία 180 ημερών και συντηρήθηκαν (α) σε περιβάλλον εργαστηρίου (ΠΕ) και (β) σε δεξαμενή νερού (ΔΝ)



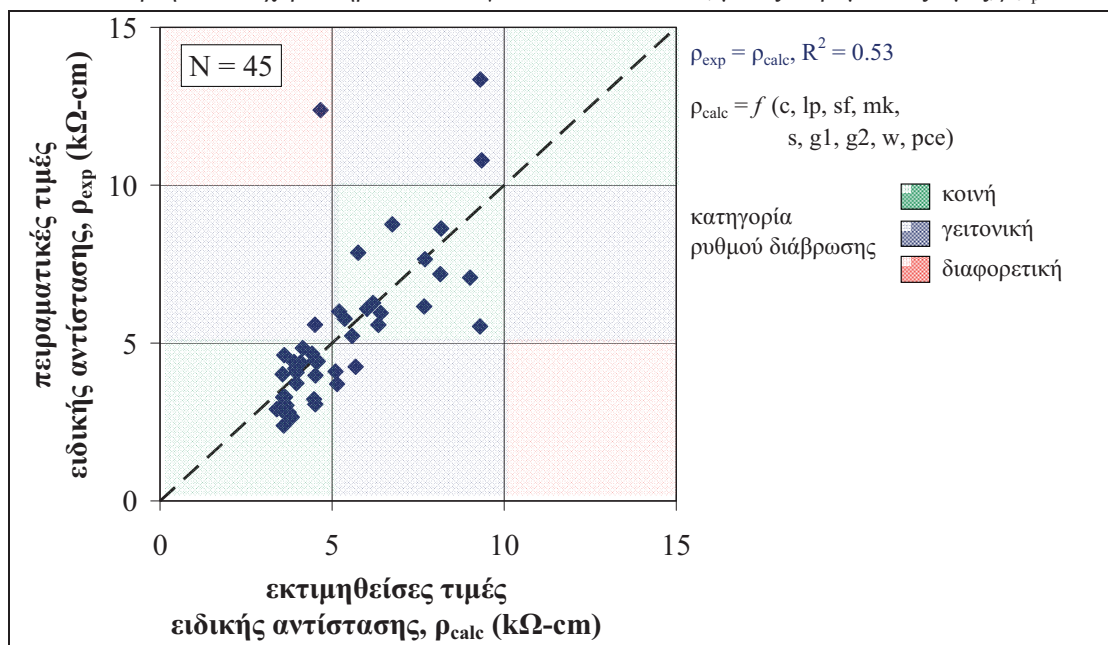
Σχήμα 365 Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (k $\Omega$ -cm), δοκιμών συνθέσεων που συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού (ΔΝ) και ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών



Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης για την ειδική αντίσταση φαίνονται στο **Σχήμα 366** για την περίπτωση συσχέτισης με τους χαρακτηριστικούς λόγους των συστατικών της σύνθεσης και στο **Σχήμα 367** για την περίπτωση εκτίμησης του χρόνου εξίσωσης πίεσης μέσω των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης. Ο **Πίνακας 125** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\alpha_i$  και  $\beta_j$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση. Παρατηρείται ότι οι προτεινόμενες γραμμικές σχέσεις μπορούν να εκτιμήσουν τις πειραματικές τιμές σχετικά ικανοποιητικά ( $R^2 = 0.51$  και  $0.53$  για την εκτίμηση μέσω των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ή των επιμέρους περιεκτικοτήτων τους, αντίστοιχα). Αξίζει, πάντως, να σημειωθεί ότι, σε κάθε περίπτωση, τα ζεύγη τιμών βρίσκονται εν γένει σε κοινές κατηγορίες ως προς το ρυθμό διάβρωσης τους.



**Σχήμα 366** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ειδικής αντίστασης,  $\rho_{calc}$  (kΩ-cm), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $\rho_{exp}$



**Σχήμα 367** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ειδικής αντίστασης,  $\rho_{calc}$  (kΩ-cm), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσει των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης, με τις πειραματικές τιμές,  $\rho_{exp}$

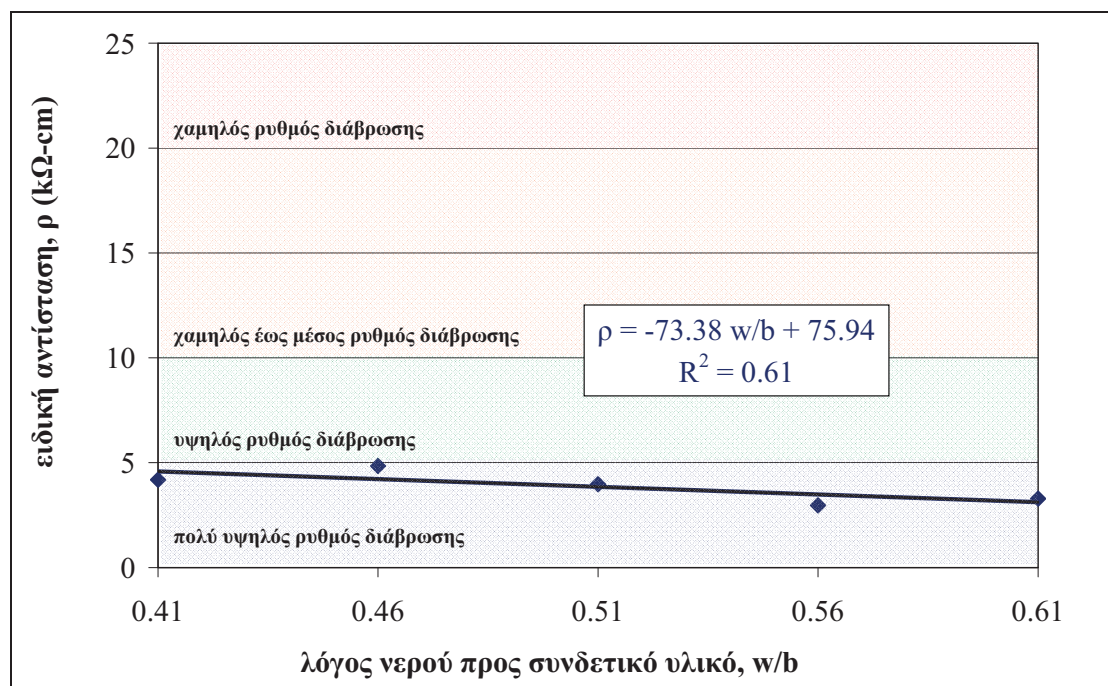
**Πίνακας 125** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ειδικής αντίστασης,  $\rho_{calc}$  (kΩ-cm), συναρτήσει των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών ( $\alpha_i$  και  $\alpha_i^*$ ) και των επιμέρους συστατικών της σύνθεσης ( $\beta_j$  και  $\beta_j^*$ )

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_i$	82,73	306,84	-37,16	305,49	-108,94	8,77	-49,57	-68,21	-37,04	-273,13
$\beta_j$	-0,006	-0,006	0,096	0,025	0,000	-0,003	-0,001	0,012	0,209	4,817

Στη συνέχεια, εξετάζονται μόνο οι παράμετροι που διερευνήθηκαν σε κάθε υπο-ομάδα συνθέσεων ξεχωριστά, ήτοι: **(α)** ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , **(β)** ο λόγος πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , **(γ)** ο λόγος μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/b$ , **(δ)** ο λόγος μετακαολίνη προς το άθροισμα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk/lp\}$ , σε μίγματα ΑΣΣ και **(ε)** ο λόγος υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε μίγματα ΣΣ. Επιπλέον, **(στ)** εξετάζονται συγκριτικά τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b = 0.51$  και παρεμφερή θλιπτική αντοχή,  $f_{cc} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ .

### Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ )

Στο **Σχήμα 368** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  (kΩ-cm), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Α (Πίνακας 37, Κεφ. 2), με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ . Η ειδική αντίσταση φαίνεται να μειώνεται γραμμικά, με σχετικά ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.61$ ), με την αύξηση του λόγου  $w/b$ , αν και θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή στον εκτιμώμενο ρυθμό διάβρωσης δεν είναι ουσιαστική.

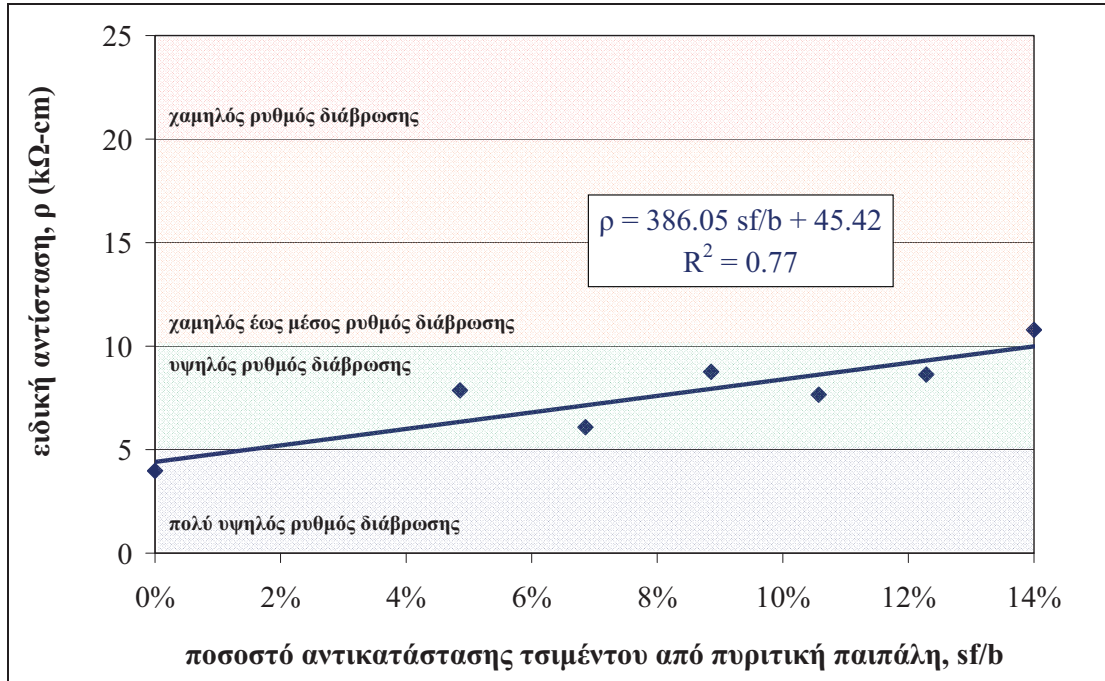


**Σχήμα 368** Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (kΩ-cm), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων Α σε ηλικία 28 ημερών

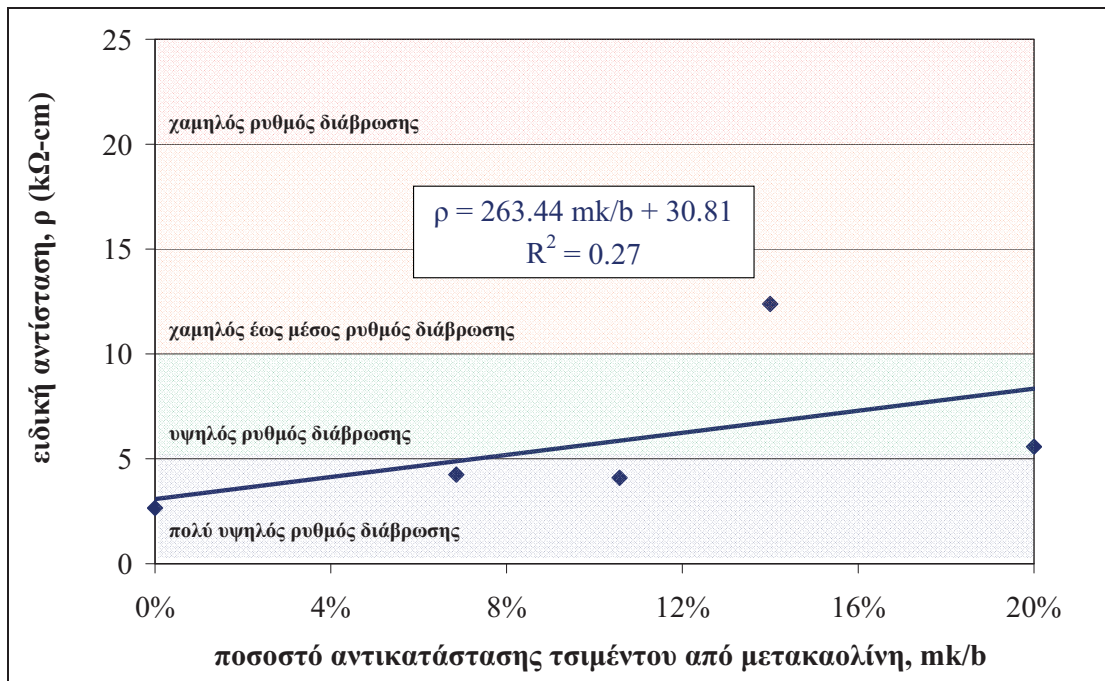
### Επιρροή πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ )

Στο **Σχήμα 369** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  (kΩ-cm), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Β1 (Πίνακας 38,

Κεφ. 2) σε ηλικία 28 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/sf+c$  ή  $sf/b$ . Παρατηρείται ότι η ειδικής αντίσταση αυξάνεται γραμμικά, με αρκετά ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.77$ ), με την αύξηση του λόγου  $sf/b$ . Ειδικά για ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη  $sf/b = 14.0\%$  ο ρυθμός διάβρωσης, όπως εκτιμάται βάσει της ειδικής αντίστασης  $\rho$  κατά [ACI 222R \(2001\)](#), βελτιώνεται, έστω και οριακά, κατά δύο κατηγορίες.



Σχήμα 369 Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (κΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Β σε ηλικία 28 ημερών



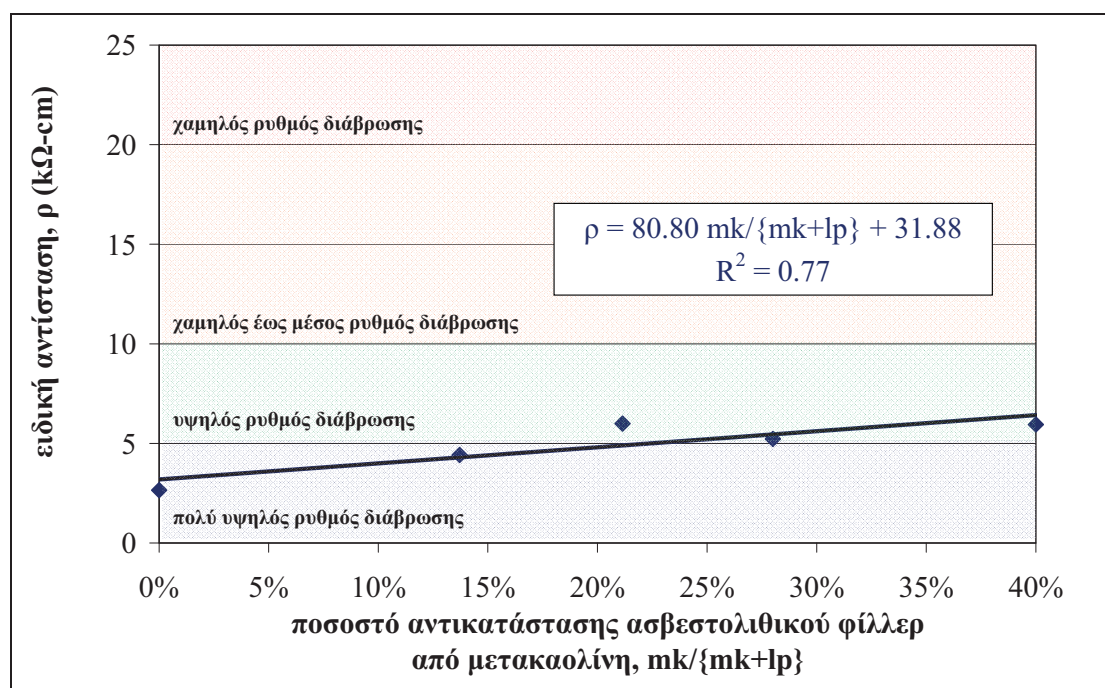
Σχήμα 370 Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (κΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Γ σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $mk/b$ )

Στο **Σχήμα 370** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων  $\Gamma$  (Πίνακας 40, Κεφ. 2) σε ηλικία 28 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+c\}$  ή  $mk/b$ . Η ειδικής αντίσταση φαίνεται να αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του λόγου  $mk/b$ , ενώ η αυξημένη τιμή για λόγο  $mk/b = 14.0\%$  οφείλεται στην επιλογή υψηλής τάσης συγκριτικά με τα γειτονικά μίγματα.

### Επιρροή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ )

Στο **Σχήμα 371** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ), όπως υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων  $\Delta$  (Πίνακας 41, Κεφ. 2) σε ηλικία 28 ημερών, με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη,  $mk/\{mk+lp\}$ . Η ειδική αντίσταση φαίνεται να αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$  και οδηγεί σε βελτίωση του ρυθμού διάβρωσης κατά **ACI 222R (2001)** κατά μία κατηγορία στο εξεταζόμενο εύρος λόγων έως 40 %.



**Σχήμα 371** Ειδική αντίσταση,  $\rho$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ), δοκιμίων υπο-ομάδας συνθέσεων  $\Delta$  σε ηλικία 28 ημερών

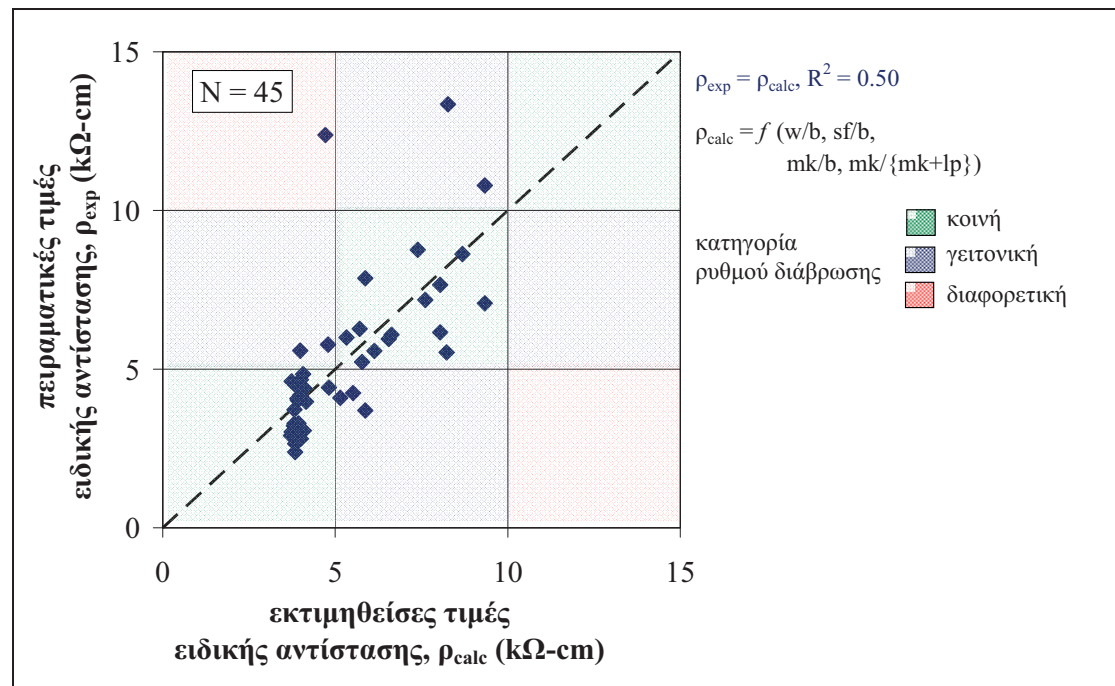
### Συσχέτιση με χαρακτηριστικούς λόγους συστατικών

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, για σταθερή σύνθεση των αναμιγμάτων με μία μοναδική μεταβλητή, η ειδική αντίσταση βρέθηκε ότι εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή των λόγων  $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$ . Στη συνέχεια, θα αναζητηθεί μία γραμμική εξίσωση της μορφής της **Εξίσωσης (4.26)** που να συνδέει όλες τις παραπάνω μεταβλητές, για καθένα από τα δύο μεγέθη που εξετάστηκαν.

$$\rho_{\text{calc}} = \gamma_1 (w/b) + \gamma_2 (sf/b) + \gamma_3 (mk/b) + \gamma_4 (mk/\{mk+lp\}) + \gamma_5 \quad (4.26)$$

Όπως και στις αναλύσεις που προηγήθηκαν, για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\gamma_k$  ( $k = 1$  έως 5) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης. Οι συντελεστές  $\gamma_k$  εκτιμήθηκαν, συνυπολογίζοντας όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την ειδική αντίσταση 28 ημερών (πλήθος  $N = 45$ ),  $\rho_{exp}$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ).

Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης για την ειδική αντίσταση παρουσιάζονται στο **Σχήμα 372**, ενώ ο **Πίνακας 126** περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\gamma_k$ , όπως υπολογίστηκαν από τη γραμμική ανάλυση. Παρατηρείται ότι η πειραματικές τιμές της ειδικής αντίστασης μπορούν να εκτιμηθούν βάσει των γραμμικών σχέσεων που προτείνονται για το σύνολο των δεδομένων, με σχετικά ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.50$ ). Αξίζει, πάντως, να σημειωθεί ότι τα ζεύγη τιμών βρίσκονται εν γένει σε κοινές κατηγορίες ως προς το ρυθμό διάβρωσής τους.



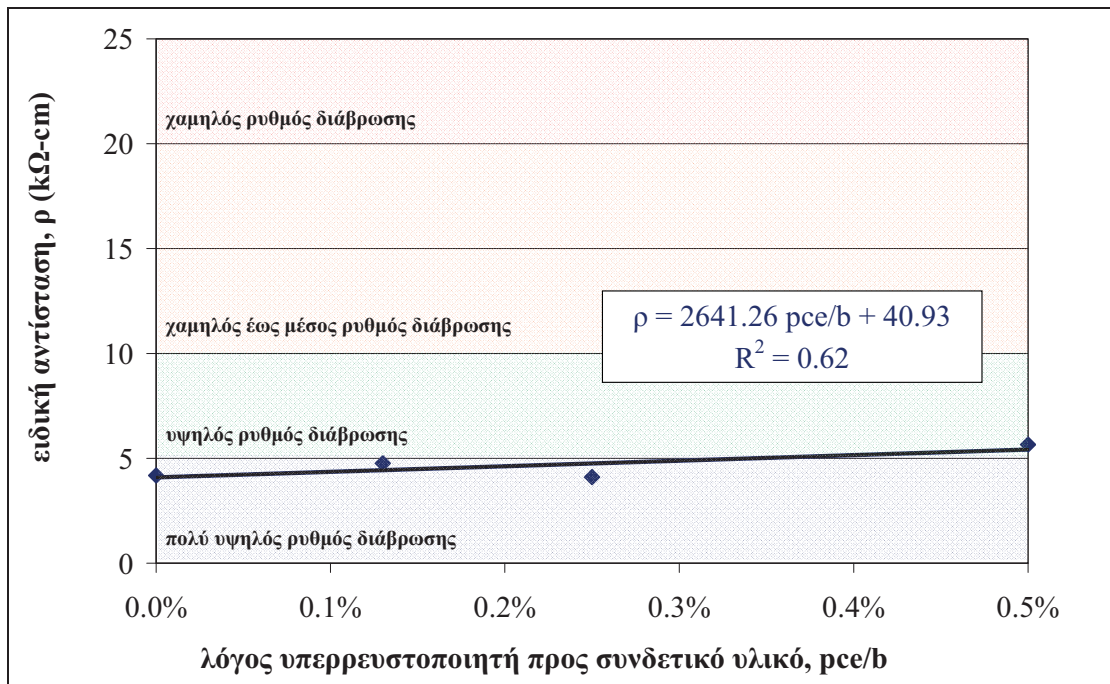
**Σχήμα 372** Σύγκριση εκτιμώμενων τιμών ειδικής αντίστασης,  $\rho_{calc}$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ), μέσω γραμμικής σχέσης συναρτήσεως των λόγων των συστατικών, με τις πειραματικές τιμές,  $\rho_{exp}$

**Πίνακας 126** Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων υπολογισμού ειδικής αντίστασης,  $\rho_{calc}$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ), συναρτήσεως των χαρακτηριστικών λόγων των συστατικών

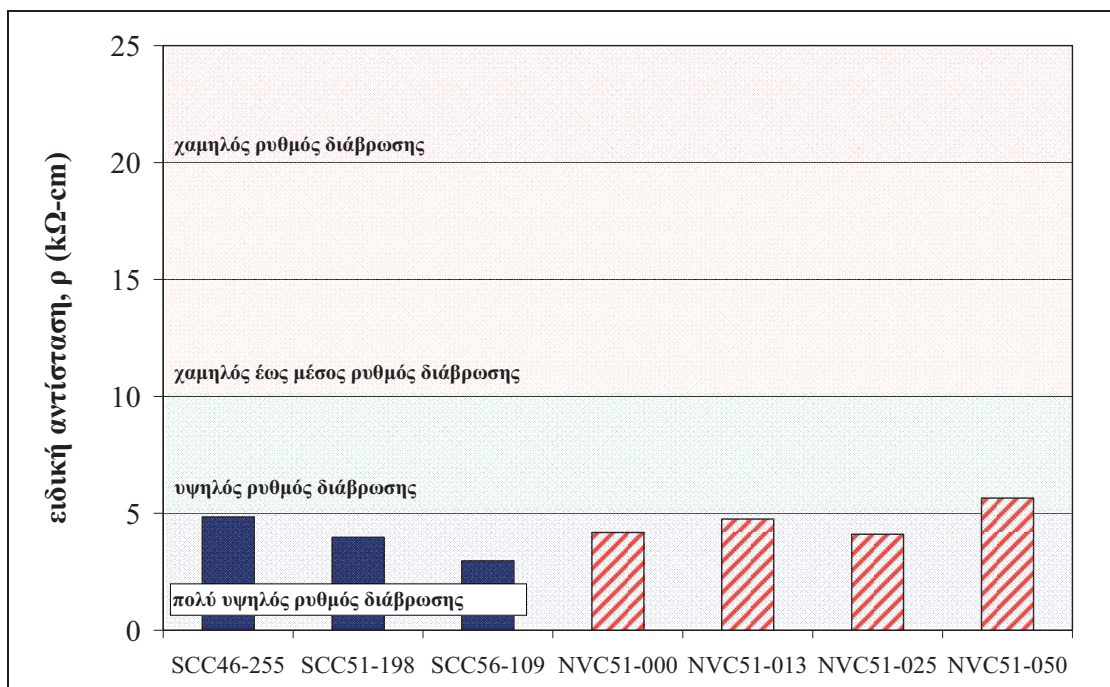
$k$	1	2	3	4	5
$\gamma_k$	-1,671	38,076	5,883	3,919	4,839

### Επιρροή λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό ( $pce/b$ )

Στο **Σχήμα 373** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  ( $k\Omega\text{-cm}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων E (Πίνακας 42, Κεφ. 2), με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή ως προς το συνδετικό υλικό,  $pce/b$ . Παρατηρείται ότι, αν και φαίνεται να υπάρχει μια ήπια αυξητική τάση της ειδικής αντίστασης, όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν βρίσκονται κοντά στο όριο μεταξύ υψηλού και πολύ υψηλού ρυθμού διάβρωσης και μπορούν να θεωρηθούν πρακτικώς όμοια ως προς την ειδική τους αντίσταση.



Σχήμα 373 Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων E σε ηλικία 28 ημερών



Σχήμα 374 Ειδική αντίσταση,  $\rho$  (kΩ-cm), δοκιμών υπο-ομάδας συνθέσεων Z σε ηλικία 28 ημερών

### Επιρροή τύπου σκυροδέματος

Στο Σχήμα 374 παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  (kΩ-cm), όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Z (Πίνακας 43 και Πίνακας 44, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ διαφόρων λόγων νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή. Υπενθυμίζεται ότι η ονοματολογία των συνθέσεων έχει δοθεί ως εξής {ΤύποςΣκυροδέματος}w/b(%)-pce/b(%). Παρατηρείται ότι για κοινή κοκκομετρία (πλην λεπτόκοκκων υλικών) και κοινό λόγο w/b (0.51) η ειδική αντίσταση  $\rho$  του ΑΣΣ είναι ελαφρώς μικρότερη από

την ειδική αντίσταση του ΣΣ, αν και, κατά κανόνα, εντός της ίδιας κατηγορίας ρυθμού διάβρωσης («πολύ υψηλός»), κατά **ACI 222R (2001)**.

#### 4.2.2.3. Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων (μη πρότυπη μέθοδος)

##### Σύγκριση πρότυπων δοκιμών

Όπως αναφέρθηκε ωρίτερα, για την διερεύνηση της ισοδυναμίας των μεθόδων πραγματοποιήθηκε μία πρόσθετη δοκιμή, βασισμένη στη δοκιμή **NordTest Build 492 (1999)**, αλλά με διαφορετικές παραμέτρους. Σημειώνεται ότι η παραλλαγμένη μέθοδος NT Build 492 εφαρμόστηκε σε συνδυασμό με την πρότυπη μέθοδο (Παρ. 4.2.2.1), με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, συγκριτικά με τη δοκιμή **ASTM C 1202 (2009)** (Παρ. 4.2.2.4).

Είναι προφανές ότι οι δύο δοκιμές δεν είναι απολύτως συγκρίσιμες, με τις βασικές τους διαφορές να συνοψίζονται στην αμεσότητα της μέτρησης και την επιρροή της θερμοκρασίας [**Lee and Chisholm (2005)**]. Συγκεκριμένα, η μέθοδος **NordTest Build 492 (1999)** αφορά την άμεση ποσοτική καταγραφή της αντίστασης σε διείσδυση των χλωριόντων, ενώ η μέθοδος **ASTM C 1202 (2009)** εκτιμά έμμεσα την ικανότητα διείσδυσης χλωριόντων μέσω του διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου. Στο σημείο αυτό και βάσει των παραπάνω, θα πρέπει να επισημανθεί ότι, αντίθετα από τη δοκιμή **NT Build 492 (1999)**, η οποία μέσω του συντελεστή διάχυσης  $D_{nssm}$  κατατάσσει το σκυρόδεμα σε κατηγορίες αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, η δοκιμή **ASTM C 1202 (2009)** κατατάσσει το σκυρόδεμα μέσω του διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου  $Q$  σε κατηγορίες ικανότητας διείσδυσης χλωριόντων. Όσο αφορά στη θερμοκρασία, οι **Lee and Chisholm (2005)** τονίζουν ότι στην πρώτη δοκιμή η θερμοκρασία παραμένει πρακτικώς σταθερή, καθώς η εμφάνιση του δοκιμίου σε μεγάλο όγκο διαλύματος χλωριόντων εξουδετερώνει τυχόν θερμοκρασιακές μεταβολές που οφείλονται στην ωμική θέρμανση<sup>4</sup> (ohmic heating) και που μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της δοκιμής. Αντίθετα, στη δεύτερη δοκιμή, ο όγκος του διαλύματος είναι σημαντικά μικρότερος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που δυνητικά μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Ειδικότερα, οι υψηλές θερμοκρασίες (> 80 έως 90 °C) αναμένεται να αυξήσουν την αγωγιμότητα του σκυροδέματος, οδηγώντας σε μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικού φορτίου.

Οι πειραματικές παράμετροι της δοκιμής **ASTM C 1202 (2009)** υιοθετήθηκαν στην εφαρμογή της δοκιμής **NordTest Build 492 (1999)**. Συγκεκριμένα, στο υπό έλεγχο δοκίμιο υπεβλήθη σταθερή διαφορά δυναμικού 60 V dc για έξι ώρες, ενώ το διάλυμα καθόδου αποτελείτο από 3 % κ.β. χλωριούχο νάτριο (**NaCl**). Ο **Πίνακας 127** περιλαμβάνει συγκεντρωτικά τις παραμέτρους των τριών μεθόδων.

Για τη σύγκριση με την επιταχυνόμενη μέθοδο **ASTM C 1202 (2009)**, απαιτήθηκε ο υπολογισμός του ηλεκτρικού φορτίου,  $Q$  (C), ο οποίος πάντως πρέπει να σημειωθεί ότι δεν προβλέπεται από το πρότυπο **NordTest Build 492 (1999)**. Καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα διαρκούς καταγραφής του ρεύματος, τυχόν αυξομειώσεις του κατά τη διάρκεια της δοκιμής αγνοήθηκαν και, αντί του ολοκληρώματος της καμπύλης του της χρονοιστορίας του ρεύματος, ελήφθη η μέση τιμή των τιμών του ρεύματος κατά την έναρξη και λήξη της δοκιμής. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του ηλεκτρικού

<sup>4</sup> Η ωμική θέρμανση (ohmic heating) βασίζεται στο νόμο του Ohm, σύμφωνα με τον οποίο κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου ενός ηλεκτρικά αγωγικού υλικού αναπτύσσεται θερμότητα.

φορτίου πραγματοποιήθηκε μέσω του γινομένου της μέσης τιμής του αρχικού και του τελικού ρεύματος και της διάρκειας της δοκιμής,  $T$  (s), για τη δεδομένη γεωμετρία του δοκιμίου και την υπολογισθείσα μέση τιμή του βάθους διείσδυσης,  $x_d$ . ημειώνεται ότι οι διαφορετικές αρχικές συνθήκες του πειράματος μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μεταβολές των τελικών συνθηκών, συγκριτικά μεταξύ της πρότυπης και της παραλλαγμένης μεθόδου NordTest Build 492 (1999). Ο Πίνακας 128 περιλαμβάνει τις συνθέσεις, στις οποίες πραγματοποιήθηκε η διεργαστηριακή σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν στην αντίσταση του σκυροδέματος σε χλωριόντα.

**Πίνακας 127** Συγκριτική παράθεση παραμέτρων δοκιμών διαπερατότητας σε χλωριόντα

μέγεθος	σύμβολο	μονάδες	RCPT	NT-B492	NT-B492ns
εργαστήριο δοκιμή			ΕΔΥ/ΠΚ	ΕΩΣ/ΕΜΠ	ΕΩΣ/ΕΜΠ παραλλαγμένη
			ASTM C 1202 (2009) (πρότυπη)	NordTest Build 492 (1999) (πρότυπη)	NordTest Build 492 (1999) (μη πρότυπη)
διάμετρος δοκιμίου	$D$	mm	100	100	100
πάχος δοκιμίου	$L$	mm	50	50	50
διάλυμα καθόδου	$NaCl$	%	3	10	3
διάλυμα ανόδου	$NaOH$	N	0.3	0.3	0.3
διαφορά δυναμικού	$U$	V dc	60	10-60 (συνήθως 10-30)	60
διάρκεια δοκιμής	$T$	h	6	6-96 (συνήθως 24)	6

**Πίνακας 128** Συνοπτική παρουσίαση μιγμάτων ΑΣΣ (SCC) και ΣΣ (NVC) που ελέγχθηκαν συγκριτικά ως προς την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων μέσω των επιταχυνόμενων δοκιμών: (α) RCPT [ASTM C 1202 (2009)] και (β) NordTest Build 492 (1999) (πρότυπη και παραλλαγμένη μέθοδος)

τύπος σκυροδέματος	Μίγματα ΑΣΣ		Μίγματα ΣΣ
συντήρηση	ΔN		ΔN
κωδικοί συνθέσεων	SCC20	SCC23	NVC09
	SCC21	SCC24	NVC10
	SCC22	SCC25	
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	6 (6 μετρ.)		<b>8 (8 μετρ.)</b>

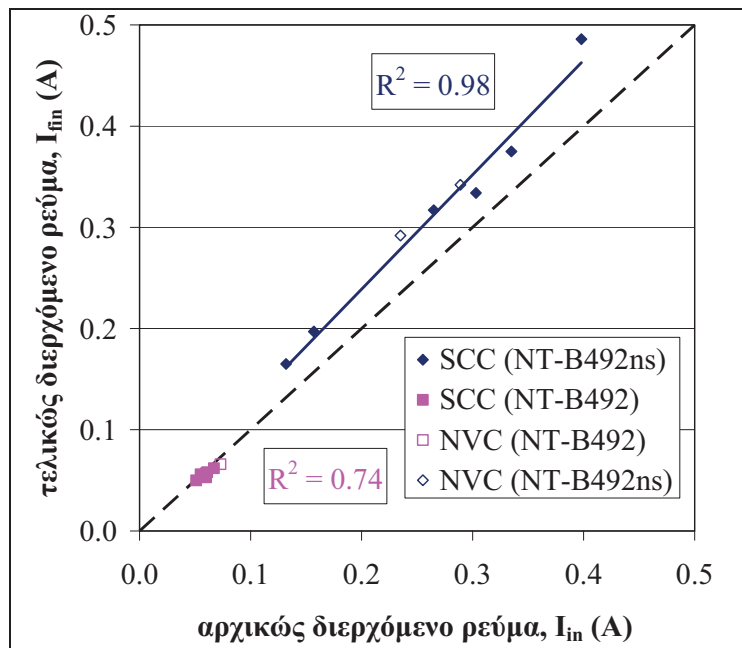
### Σύγκριση πρότυπης και παραλλαγμένης μεθόδου

Οι επίσημες προδιαγραφές της δοκιμής NT Build 492 (NT-B492) που αφορούν στις αρχικές συνθήκες του πειράματος στοχεύουν στη διατήρηση της ισχύος,  $P$  (Watt), κάτω από ένα μέγιστο όριο των 2 W [Tang and Sorensen (1999)], μέσω της ρύθμισης της αρχικής διαφοράς δυναμικού (μεταξύ 10 και 30 V dc) και της συνεπακόλουθης μεταβολής του αρχικώς διερχόμενου ρεύματος (μεταξύ 0.05 και 0.08 A). Από την άλλη πλευρά, για την περίπτωση της παραλλαγμένης δοκιμής (NT-B492ns), ο στόχος αυτός αγνοήθηκε και το αρχικό ρεύμα κυμαινόταν σε μεγαλύτερο εύρος (από 0.13 έως 0.40 A) για μια σταθερή διαφορά δυναμικού 60 V dc.

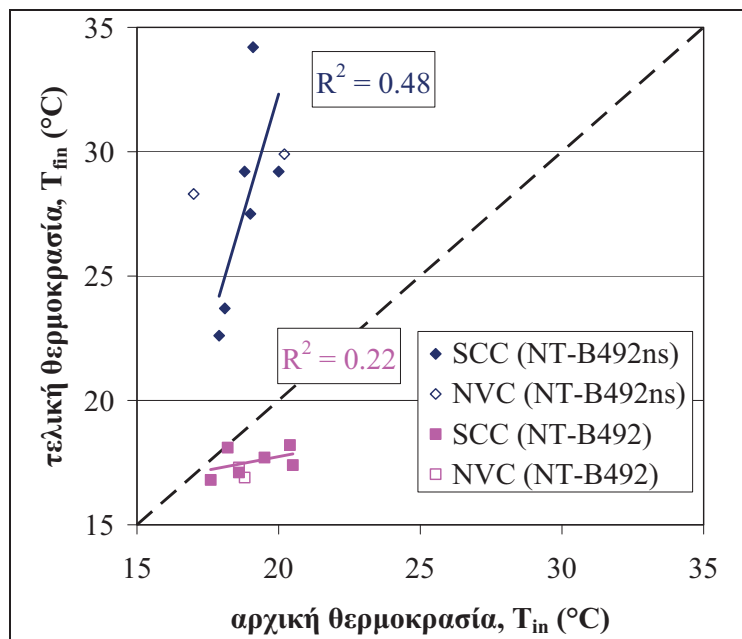
Η μεγαλύτερη ισχύς,  $P$  (Watt), που επιβλήθηκε στο δοκίμιο για τη δεύτερη περίπτωση οδήγησε σε μια σταθερή αύξηση του τελικώς διερχόμενου ρεύματος (κατά περίπου 15 %) (Σχήμα 375) και μία σημαντική αύξηση της τελικής θερμοκρασίας (έως και 50 %) κατά τη διάρκεια των 6 ωρών (Σχήμα 376). Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι υψηλές θερμοκρασίες είναι πιθανό να αυξήσουν την αγωγιμότητα του σκυροδέματος, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές ηλεκτρικού φορτίου εν σχέσει προς τις πραγματικές τιμές (Lee and Chisholm, 2005). Σημειώνεται πάντως ότι στα πειράματα που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής η θερμοκρασία,



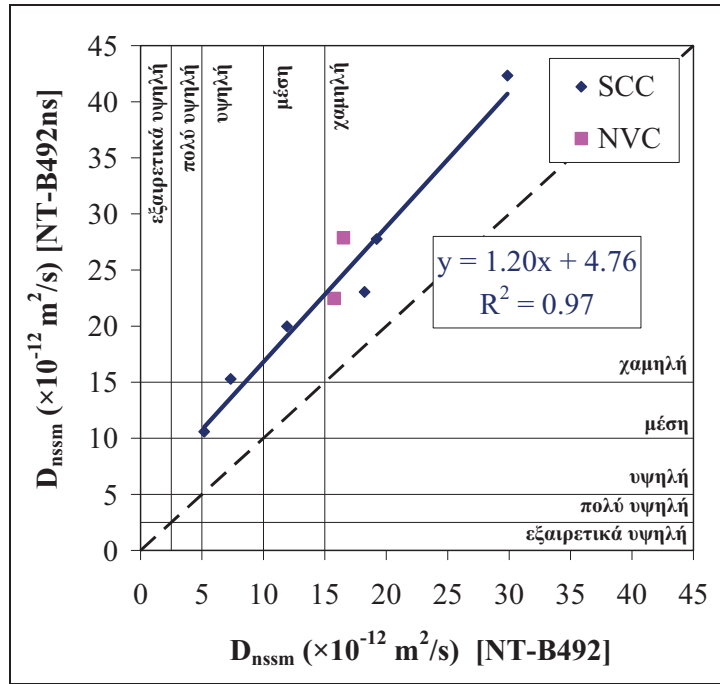
αν και αυξημένη εν σχέσει προς την πρότυπη μέθοδο NordTest Build 492 (1999), δεν ξεπέρασε τους 35 °C και, επομένως, δεν αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 377 συσχετίζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492. Παρατηρείται ότι η παραλλαγμένη μέθοδος οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του συντελεστή  $D_{nssm}$ , με τη διαφορά από τον αντίστοιχο συντελεστή της πρότυπης μεθόδου να είναι πρακτικώς σταθερή, αν και με μια μικρή αύξηση για δοκίμια με υψηλότερη διαπερατότητα. Η κατάταξη του σκυροδέματος για λιγότερο διαπερατά δοκίμια διαφέρει κατά μία κατηγορία, με την παραλλαγμένη μέθοδο να είναι πιο συντηρητική.



Σχήμα 375 Επιρροή εφαρμογής επίσημης και παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 στη μεταβολή του διερχόμενου ρεύματος, κατά τη διάρκεια της δοκιμής

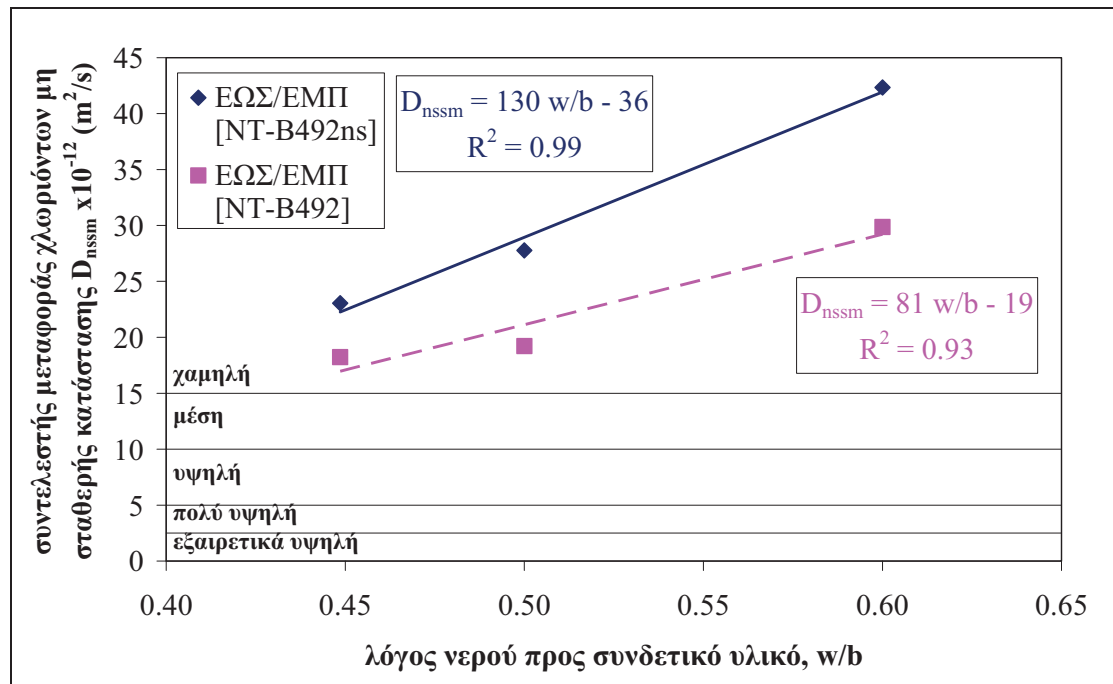


Σχήμα 376 Επιρροή εφαρμογής επίσημης και παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 στη μεταβολή της θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια της δοκιμής

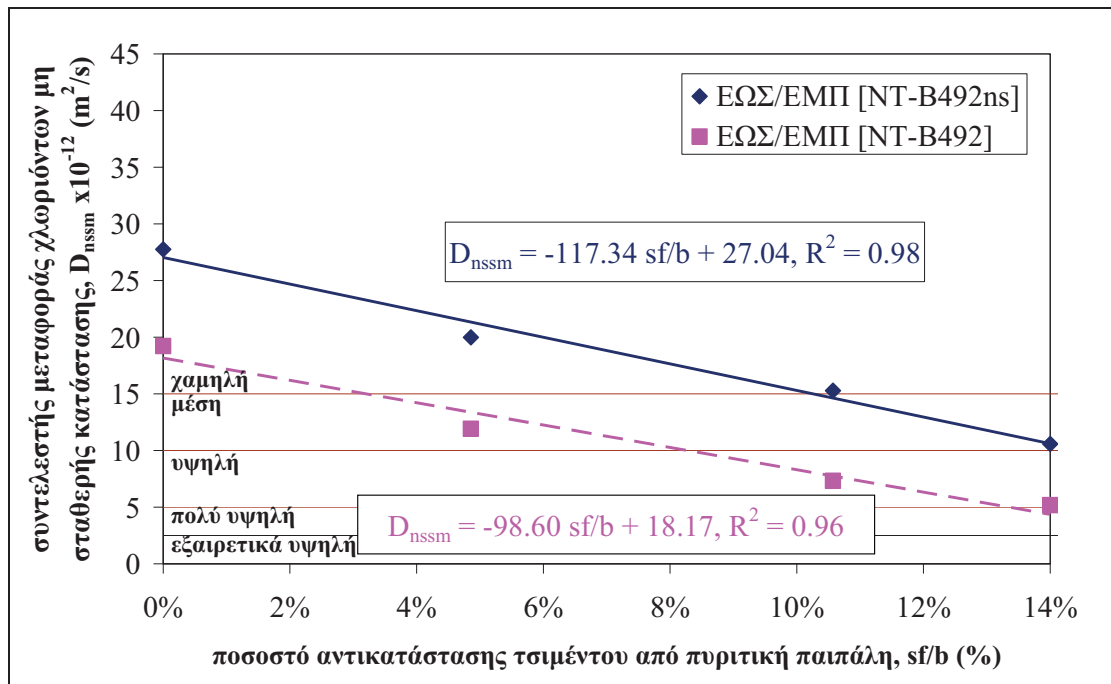


**Σχήμα 377** Σύγκριση συντελεστών μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492

Στα επόμενα δύο Σχήματα (**Σχήμα 378** και **Σχήμα 379**) παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492, σε δοκίμια με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , και σε δοκίμια με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/b$ , αντίστοιχα.



**Σχήμα 378** Επιρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό στο συντελεστή μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492



Σχήμα 379 Επιρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη στο συντελεστή μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492

Παρατηρείται (Σχήμα 378) ότι ο συντελεστής  $D_{nssm}$  μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του λόγου  $w/b$ . Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $w/b$  οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή  $D_{nssm}$ , η οποία είναι ελαφρώς ηπιότερη στην περίπτωση της εφαρμογής της πρότυπης μεθόδου. Για μικρότερους λόγους  $w/b$  οι δύο παραλλαγές της μεθόδου φαίνεται να συγκλίνουν. Τέλος, αν και για τη δεδομένη κεντρική σύνθεση, δεν παρατηρείται διαφορά στην κατάταξη των μιγμάτων, η πρότυπη μέθοδος φαίνεται να είναι λιγότερο συντηρητική. Επιπλέον, παρατηρείται (Σχήμα 379) ότι ο συντελεστής  $D_{nssm}$  μεταβάλλεται επίσης γραμμικά συναρτήσει του λόγου  $sf/b$ . Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $sf/b$  οδηγεί σε μείωση του συντελεστή  $D_{nssm}$ , με όμοιο ρυθμό μεταξύ της πρότυπης και της παραλλαγμένης μεθόδου. Σημειώνεται και πάλι ότι η κατάταξη των μιγμάτων είναι πιο συντηρητική στην παραλλαγμένη μέθοδο και, συγκεκριμένα, κατά μία κατηγορία.

#### 4.2.2.4. Ηλεκτρικό φορτίο

##### Συνοπτική περιγραφή δοκιμής

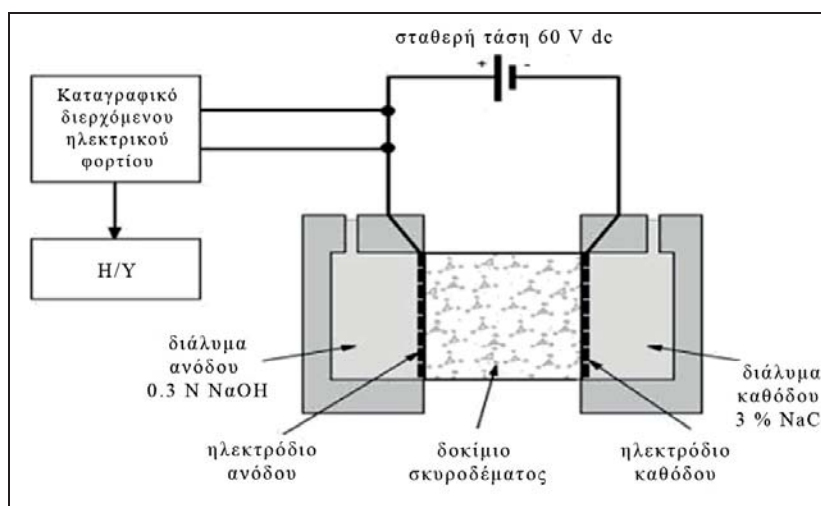
Η μέθοδος εκτίμησης της ικανότητας του σκυροδέματος να ανθίσταται σε χλωριόντα που περιγράφεται στην παρούσα Παράγραφο πραγματοποιήθηκε σε μίγματα που παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ), στο πλαίσιο της διερεύνησης της διεργαστηριακής αναπαραγωγιμότητας μεταξύ παρεμφερών μιγμάτων, σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ).

Η εν λόγω επιταχυνόμενη δοκιμή διαπερατότητας σε χλωριόντα (Rapid Chloride Permeability Test, RCTP), η οποία αναπτύχθηκε αρχικώς από τον Whiting (1981), στηρίζεται στα αμερικάνικα πρότυπα AASHTO T 277 (2007) και ASTM C 1202 (2009). Η δοκιμή συνίσταται στην εργαστηριακή αξιολόγηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δοκιμών και την ποιοτική ταξινόμηση του σκυροδέματος ως προς την ικανότητά του να ανθίσταται στην επιταχυνόμενη διεύδυση χλωριόντων.

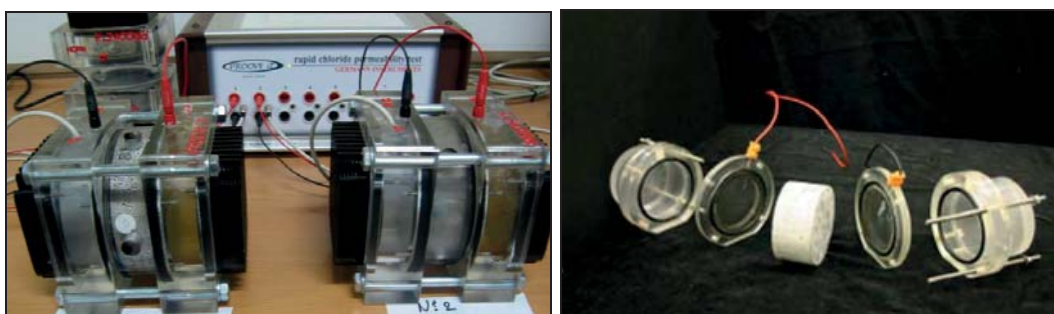
Συγκεκριμένα, το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο (electric charge),  $Q$  (C: Coulomb), που διέρχεται διαμέσου ενός συμβατικών διαστάσεων δοκιμίου σκυροδέματος υπό διαφορά δυναμικού 60 V dc μεταξύ των δύο πλευρών του για συνολική διάρκεια 6 ωρών, σχετίζεται με την αντίσταση του υλικού έναντι της διείσδυσης χλωριόντων. Ο Πίνακας 129 περιλαμβάνει την ταξινόμηση του σκυροδέματος ανάλογα με το εκτιμηθέν διερχόμενο φορτίο  $Q$ , σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM C 1202 (2009). Στον Πίνακα αναφέρονται και οι πρωτότυποι αγγλικοί περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των διαφόρων κατηγοριών σκυροδέματος.

Πίνακας 129 Ικανότητα διείσδυσης χλωριόντων συναρτήσει διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου [πηγή: ASTM C 1202 (2009)]

Διερχόμενο Φορτίο $Q$ (C: Coulomb)	Ικανότητα Διείσδυσης Χλωριόντων	
> 4000	Υψηλή	High
2000 – 4000	Μέση	Medium
1000 – 2000	Χαμηλή	Low
100 – 1000	Πολύ χαμηλή	Very low
< 100	Αμελητέα	Negligible



Σχήμα 380 Περιγραφή πειραματικής διάταξης AASHTO T 277 (2007) / ASTM C 1202 (2009) [πηγή: Stanish et al. (1997)]



Σχήμα 381 Πειραματική διάταξη δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα κατά ASTM C 1202 (2009) [πηγή: (α) φωτογραφικό αρχείο ΕΔΥ/ΠΚ, (β) Lee and Chisholm (2005)]

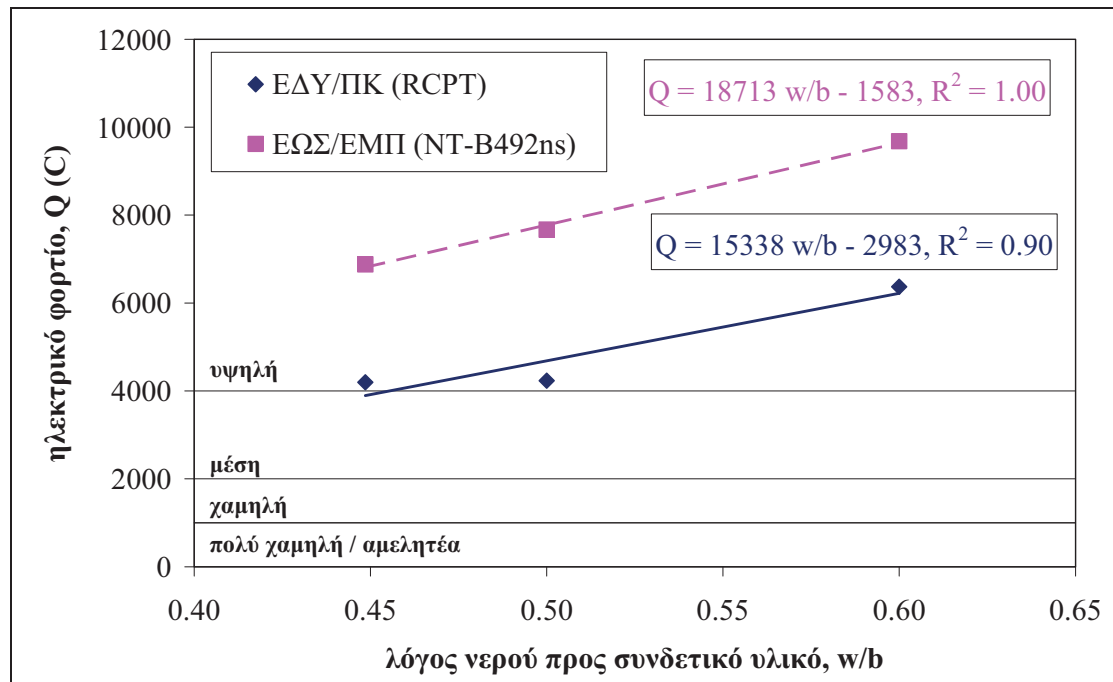
Στη βιβλιογραφία [Stanish et al. (1997), Lee and Chisholm (2005)] αναφέρεται ότι η μέθοδος δεν υπολογίζει ουσιαστικά τη διαπερατότητα, αλλά την κίνηση των ιόντων. Επιπροσθέτως, το συνολικώς διερχόμενο φορτίο δεν επηρεάζεται μόνο από την κίνηση των ιόντων χλωρίου, αλλά όλων των ιόντων. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνεται το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν επιτυγχάνεται

σταθερή κατάσταση μεταφοράς ιόντων (steady-state migration), καθώς επίσης και ότι η υψηλή εφαρμοζόμενη τάση (60 V dc) οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας, ειδικά για σκυροδέματα χαμηλής ποιότητας, με συνεπακόλουθη αύξηση του συνολικώς διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου. Συνεπώς, η μέθοδος δεν παρέχει απολύτως ακριβή αποτελέσματα. Συμβατικό δοκίμιο ( $D = 100$  mm,  $L = 50$  mm) που εξάγεται από τη μεσαία ζώνη πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος ( $D = 100$  mm,  $L = 200$  mm) υποβάλλεται σε διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Το διάλυμα καθόδου αποτελείται από 3 % κ.β. χλωριούχο νάτριο ( $NaCl$ ), ενώ το διάλυμα ανόδου από 0.3 N οξείδιο του νατρίου ( $NaOH$ ). Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο **Σχήμα 380**, ενώ μία τυπική εμπορική διάταξη, η οποία χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (ΕΔΥ/ΠΚ), παρουσιάζεται στο **Σχήμα 381**. Σημειώνεται ότι η εν λόγω δοκιμή έχει πολύ μεγάλη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων της και, για το λόγο αυτό, πρέπει να εξετάζονται τρία δοκίμια. Επίσης, καθώς η δοκιμή συσχετίζει την αγωγιμότητα του σκυροδέματος με την ικανότητα διείσδυσης των χλωριόντων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι τυχόν ενσωμάτωση αγωγίμων υλικών στο σκυρόδεμα, όπως ο χάλυβας σπλισμού ή μεταλλικές ίνες, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της μετρούμενης αγωγιμότητας.

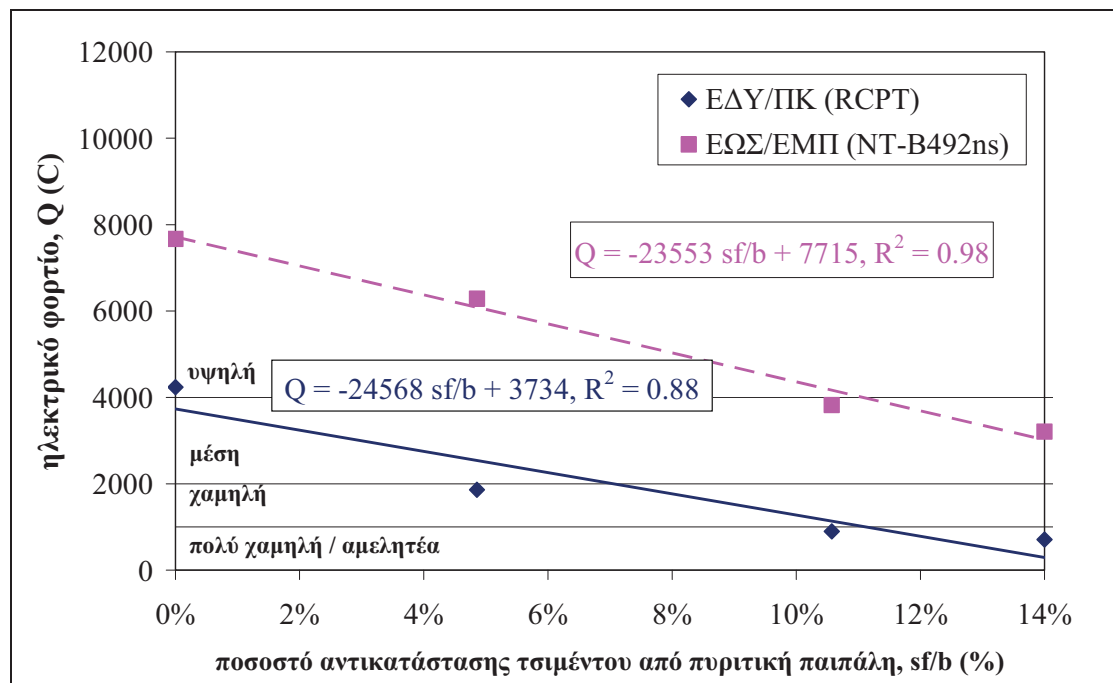
### Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στο **Σχήμα 382** και το **Σχήμα 383** παρουσιάζεται το ηλεκτρικό φορτίο,  $Q$  (C), όπως υπολογίστηκε για τα δοκίμια της υπο-ομάδας συνθέσεων Η (Πίνακας 45 και Πίνακας 46, Κεφ. 2), που αφορά σε μίγματα ΑΣΣ με μεταβλητό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , και με μεταβλητό ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη,  $sf/\{sf+c\}$  ή  $sf/b$ . Παρατηρείται ότι τόσο για την περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $w/b$ , όσο και για την περίπτωση μεταβλητού λόγου  $sf/b$ , το ηλεκτρικό φορτίο μεταβάλλεται κατά τον ίδιο τρόπο, ανεξαρτήτως της εφαρμοσθείσας δοκιμής, αν και είναι κατ' απόλυτη τιμή δυσμενέστερο στην περίπτωση της παραλλαγμένης μεθόδου NT Build 492. Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό φορτίο αυξάνεται γραμμικά για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ , ενώ μειώνεται γραμμικά για μεγαλύτερους λόγους  $sf/b$ . Σημειώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, οι συντελεστές συσχέτισης είναι πολύ υψηλοί ( $R^2 > 0.90$ ). Γενικώς, παρατηρείται ότι οι ευθείες της γραμμικής παλινδρόμησης, όπως υπολογίζονται με κάθε μέθοδο ξεχωριστά, είναι παράλληλες και παρουσιάζουν μια σταθερή απόσταση περί τα 3000 C, γεγονός που εμποδίζει την παρεμφερή ποιοτική κατάταξη των μιγμάτων. Η διαφορά αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 384**, όπου συγκρίνονται οι τιμές του ηλεκτρικού φορτίου, αναλόγως της εφαρμοζόμενης δοκιμής. Δεδομένης, πάντως, της παραλληλίας των ευθειών, μια μεταβολή των ορίων κατάταξης στην παραλλαγμένη μέθοδο NT Build 492 θα μπορούσε να οδηγήσει σε παρόμοια αποτελέσματα και για τις δύο μεθόδους.

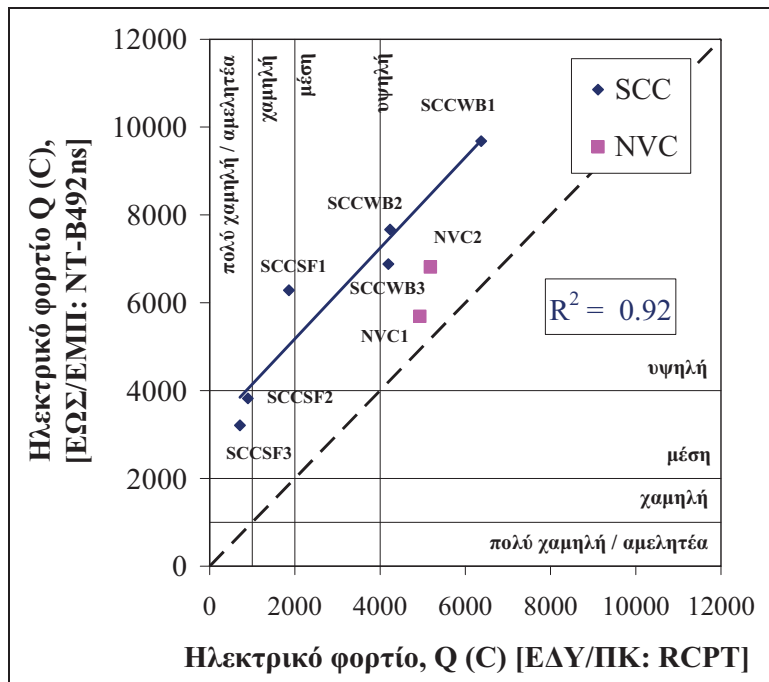
Στο **Σχήμα 385** συσχετίζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>), όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή της πρότυπης δοκιμής NT Build 492 στο ΕΩΣ/ΕΜΠ με τις τιμές του ηλεκτρικού φορτίου,  $Q$  (C), όπως υπολογίστηκαν κατά της εφαρμογή της πρότυπης δοκιμής RCTP στο ΕΔΥ/ΠΚ. Παρατηρείται ότι η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι γραμμική, με εξαιρετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 = 0.98$ ). Όσο αφορά στις κατηγορίες κατάταξης, οι οποίες υπενθυμίζεται ότι αφορούν αντίθετες ιδιότητες (διαπερατότητα σε χλωριόντα για το ηλεκτρικό φορτίο  $Q$ , αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων για το συντελεστή  $D_{nssm}$ ), αυτές φαίνεται να αποκλίνουν ελαφρώς μεταξύ των δύο μεθόδων, ειδικά για πιο αδιαπέρατα σκυροδέματα.



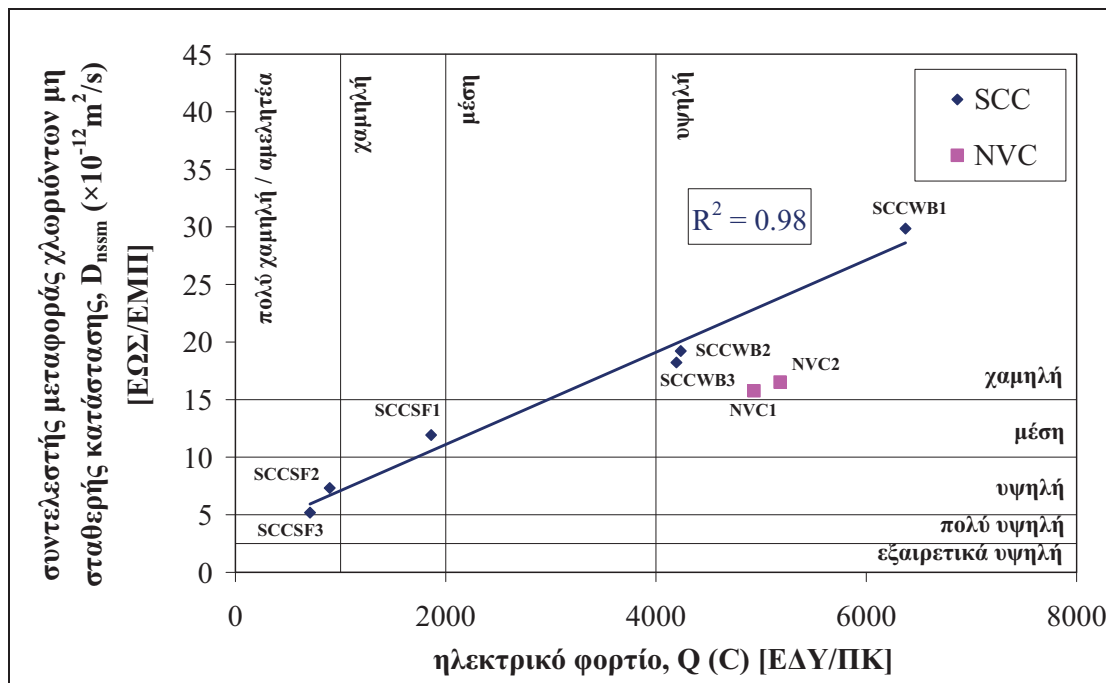
Σχήμα 382 Επίρροή λόγου νερού προς συνδετικό υλικό στο ηλεκτρικό φορτίο κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ)



Σχήμα 383 Επίρροή ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη στο ηλεκτρικό φορτίο κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ)



Σχήμα 384 Συσχέτιση ηλεκτρικού φορτίου κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της παραλλαγμένης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ)



Σχήμα 385 Συσχέτιση ηλεκτρικού φορτίου και συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης κατόπιν εφαρμογής της πρότυπης δοκιμής RCTP (ΕΔΥ/ΠΚ) και της πρότυπης δοκιμής NT Build 492 (ΕΩΣ/ΕΜΠ), αντίστοιχα





# 5

---

## Συμπεράσματα Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

### Σύνοψη Κεφαλαίου

Το Κεφάλαιο ξεκινά με μια σύντομη περιγραφή του σκοπού και της θεματολογίας της Διατριβής, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται η πρωτοτυπία και η συμβολή της στην έρευνα. Κατόπιν, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα από τα Κεφάλαια που προηγήθηκαν σε θέματα που αφορούν στα υλικά και στις συνθέσεις ΑΣΣ, στη ρεολογία, στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στην ανθεκτικότητα, ενώ τίθενται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση από μελλοντικούς ερευνητές.

Ειδικότερα, συνοψίζονται τα ευρήματα που σχετίζονται με τη ρεολογία (μέσω των δοκιμών εκτίμησης των χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης), το χρόνο πήξης και τη διεργαστηριακή αναπαραγωγιμότητα των ελέγχων νωπού ΑΣΣ.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα σημαντικότερα ευρήματα που αφορούν στις μηχανικές αντοχές και, ειδικότερα, στη θλιπτική, στην εφελκυστική και την καμπτική αντοχή, την αντοχή σε συνάφεια και τη θερμική συμπεριφορά του ΑΣΣ. Ειδικά για τα θέματα της συνάφειας, σχολιάζονται οι καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων και οι αντιπροσωπευτικές τάσεις που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση, το φαινόμενο άνω οπλισμών και η μεταβολή της συνάφειας κατά μήκος οριζόντιων στοιχείων με μοναδικό σημείο έγχυσης. Επιπλέον, σχολιάζεται η επιρροή του υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος, των σχετικών μετακινήσεων κατά τη διάρκεια της πήξης και των υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια, ενώ αξιολογείται η διεργαστηριακή αναπαραγωγιμότητα ως προς τη συνάφεια.

Τέλος, συνοψίζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στην ανθεκτικότητα και, συγκεκριμένα, στη διαπερατότητα σε νερό (ανοιχτό πορώδες, απορροφητικότητα και υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη η σταθερή πίεση) και σε χλωριόντα (συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων, ειδική αντίσταση).

## 5.1. Σκοπός & Σύντομη Περιγραφή Διατριβής

Σκοπός της παρούσας Διατριβής ήταν η θεωρητική και πειραματική προσέγγιση του Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (ΑΣΣ), σε θέματα που αφορούν στο σχεδιασμό των μιγμάτων, στην παρασκευή και στον έλεγχο του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Στο πλαίσιο της Διατριβής πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρασκευάστηκε εργαστηριακό ΑΣΣ, με σκοπό τον έλεγχο των ιδιοτήτων του. Ειδικότερα, μελετήθηκαν οι ρεολογικές ιδιότητες, τα μηχανικά χαρακτηριστικά, με έμφαση σε εξειδικευμένα θέματα συνάφειας, και θέματα ανθεκτικότητας.

Από την αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν χρήσιμα ευρήματα και συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του ΑΣΣ, μεγάλο μέρος των οποίων έχει ήδη δημοσιευθεί σε έγκυρα επιστημονικά περιοδικά, καθώς και σε διεθνή και σε εθνικά συνέδρια.

## 5.2. Πρωτοτυπία – Συμβολή

Οι κύριοι τομείς συμβολής της παρούσας Διατριβής, στο υπάρχον γνωσιακό επίπεδο σχετικά με το ΑΣΣ, συνοψίζονται ως εξής:

- Εργαστηριακή παρασκευή μιγμάτων ΑΣΣ και δημιουργία βάσης δεδομένων που συνδέει αναλυτικά στοιχεία σύνθεσης 76 μιγμάτων ΑΣΣ και 22 μιγμάτων ΣΣ, παρασκευασμένων με εγχώρια ή εισαγόμενα υλικά, με λεπτομερείς τιμές από τις αντίστοιχες δοκιμές έμμεσου προσδιορισμού της ρεολογίας (δοκιμές εκτίμησης χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης). Σημειώνεται ότι οι πρώτες εργασίες ελλήνων ερευνητών με αντικείμενο το ΑΣΣ δημοσιεύθηκαν κατά την τελευταία περίπου δεκαετία (από το 2003) και αφορούσαν, κατ' αρχάς και κατά κύριο λόγο, στο σχολιασμό του θεωρητικού υπόβαθρου και των πειραματικών αποτελεσμάτων για το ΑΣΣ, βάσει της ξένης βιβλιογραφίας. Μόλις τα τελευταία χρόνια (κυρίως από το 2006 και έπειτα) δημοσιεύτηκαν αποτελέσματα από εγχώρια πειραματικά δεδομένα και εφαρμογές πεδίου και σχολιάστηκε λεπτομερώς η ελληνική εμπειρία.
- Διερεύνηση και αξιολόγηση ιδιοτήτων σκληρυμένου ΑΣΣ, με έμφαση στη συνάφεια με το χάλυβα οπλισμού και την ανθεκτικότητα. Σημειώνεται ότι, ενώ η υπάρχουσα διεθνής βιβλιογραφία για το ΑΣΣ υπερκαλύπτει τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος δεν έχουν διερευνηθεί σε αντίστοιχο βαθμό. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν και αξιολογήθηκαν:
  - εξειδικευμένα θέματα συνάφειας του ΑΣΣ με το χάλυβα οπλισμού. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν θέματα που αφορούν στην ένταση του φαινομένου άνω οπλισμών, στη μεταβολή της συνάφειας συναρτήσει της απόστασης των ράβδων από το σημείο έγχυσης και στην επιρροή αθέλκτων μετακινήσεων των ράβδων σε νωπό σκυροδέμα στη συνάφεια. Στο πλαίσιο των δοκιμών συνάφειας, αξιολογήθηκε, επιπλέον, η επιλογή των αντιπροσωπευτικών τάσεων που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση των ευρημάτων.

- θέματα ανθεκτικότητας ΑΣΣ. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν θέματα που αφορούν στη διαπερατότητα σε νερό και σε χλωριόντα. Μεταξύ άλλων ευρημάτων, στο πλαίσιο αυτό προτάθηκε η εφαρμογή μιας νέας μεθόδου εκτίμησης της υδατοπερατότητας. Τονίζεται, πάντως, ότι η εν λόγω μέθοδος απαιτεί περαιτέρω στοχευμένη διερεύνηση από μελλοντικούς ερευνητές για την πλήρη εφαρμογή της στην πράξη.
- Διερεύνηση και αξιολόγηση της επιρροής διαφορετικών χαρακτηριστικών σύνθεσης ΑΣΣ στις παραπάνω ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επιρροή (α) της περιεκτικότητας σε νερό, (β) της προσθήκης πυριτικής παιπάλης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου και (γ) της προσθήκης μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης ( $\gamma_1$ ) του τσιμέντου και ( $\gamma_2$ ) του ασβεστολιθικού φίλερ. Τα ευρήματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από συνθέσεις ΣΣ μεταβλητής περιεκτικότητας σε υπερρευστοποιητή.
- Διερεύνηση και αξιολόγηση της αναπαραγωγισιμότητας παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με υλικά και μεθόδους που συμμορφώνονται με τα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα. Στο πλαίσιο της δυνατότητας αναπαραγωγής των μιγμάτων μελετήθηκαν θέματα ρεολογίας, τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά (αντοχές, συνάφεια) και οι ιδιότητες ανθεκτικότητας.

Εκτός από τα παραπάνω, στο πλαίσιο της ΔΔ επιτεύχθηκαν και τα εξής:

- Διεύρυνση τεχνογνωσίας του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΩΣ/ΕΜΠ) σε θέματα που σχετίζονται με την παρασκευή και τον έλεγχο του ΑΣΣ, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρυμένη κατάσταση. Συγκεκριμένα, συγκεντρώθηκαν και οργανώθηκαν τα σχετικά πρότυπα, οι κανονισμοί και οι πηγές επίκαιρης έρευνας που αφορούν στο ΑΣΣ, μέσω εκτενούς και αδιάκοπης βιβλιογραφικής ανασκόπησης κατά τα τελευταία οκτώ χρόνια (από το 2005).
- Σχεδιασμός και κατασκευή νέων πειραματικών διατάξεων στο ΕΩΣ/ΕΜΠ για τον έλεγχο του σκυροδέματος, ανεξαρτήτως τύπου. Συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής, μέρος των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο σκληρυμένο ΑΣΣ σχεδιάστηκαν εξ αρχής και είναι εφαρμόσιμες και στο ΣΣ (π.χ. διάταξη δοκιμής χλωριόντων, διάταξη δοκιμής απορροφητικότητας, ειδικοί ξυλότυποι για δοκιμές συνάφειας, χλωριόντων, κ.λπ.).
- Διεύρυνση δικτύου συνεργατών του ΕΩΣ/ΕΜΠ, μέσω της πραγματοποίησης ουσιαστικών επαφών με τη ελληνική και ξένη βιομηχανία (τσιμεντοβιομηχανία, βιομηχανίες αδρανών, πρόσμικτων και χημικών πρόσθετων) που σχετίζεται με την παρασκευή σκυροδέματος και, ειδικότερα, ΑΣΣ.

### 5.3. Σύνοψη συμπερασμάτων

Τα βασικότερα συμπεράσματα της παρούσας Διατριβής συνοψίζονται ως εξής:

#### Ρεολογία

- Αναδείχθηκε η αξία της δοκιμής εξάπλωσης και αμφισβητήθηκε μερικώς η αποτελεσματικότητα της δοκιμής εμποδιζόμενης εξάπλωσης και της επαναληπτικής δοκιμής χοάνης V, ενώ προτάθηκε μία μεταβολή στο όριο μεταξύ των κατηγοριών ταξινόμησης ιξώδους VF1 και VF2.

- Διαπιστώθηκε άμεση εκθετική επιρροή της περιεκτικότητας σε ρευστοποιητή στον χρόνο της πήξης (για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας), ανεξαρτήτως του τύπου σκυροδέματος (ΑΣΣ ή ΣΣ).
- Αποδείχθηκε πειραματικά η ικανοποιητική αναπαραγωγισιμότητα μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, στη βάση της δυνατότητας επίτευξης κοινών ρεολογικών χαρακτηριστικών.

### Μηχανικές Αντοχές

- Διατυπώθηκαν αναλυτικές γραμμικές σχέσεις που συνδέουν τη θλιπτική, την εφελκυστική και την καμπτική αντοχή με τις μεταβολές των χαρακτηριστικών της σύνθεσης (μεταβλητοί λόγοι  $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk/lp\}$ ,  $pce/b$ , κατά περίπτωση).
- Διαπιστώθηκε η σχετικά ικανοποιητική επάρκεια για το ΑΣΣ των κανονιστικών προβλεπόμενων συσχετίσεων της εφελκυστικής αντοχής με τη θλιπτική αντοχή για το ΣΣ.
- Αναδείχθηκε η ευμενής επιρροή του μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου και διαπιστώθηκε η ασήμαντη επιρροή του ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλλερ στη θερμική απόκριση του σκυροδέματος.

### Συμπεριφορά σε Συνάφεια

- Διαπιστώθηκε μερική ασυμβατότητα αναλυτικών μοντέλων τάσεων συνάφειας-ολισθήσεων για το ΣΣ κατά την εφαρμογή τους στις πειραματικές καμπύλες για το ΑΣΣ και προτάθηκε η μεταβολή των κανονιστικώς προβλεπόμενων τιμών για τη δυσκαμψία και τη μέγιστη τάση συνάφειας.
- Αναδείχθηκε η σπουδαιότητα της αντιπροσωπευτικής τάσης συνάφειας, η οποία χρησιμοποιείται τόσο για τη διεργαστηριακή σύγκριση μιγμάτων ΑΣΣ, όσο και για τη σύγκριση μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ.
  - Η μέγιστη τάση συνάφειας φαίνεται να είναι η μόνη τάση συνάφειας που οδηγεί σε συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των εργαστηρίων,
  - Για πειράματα που διενεργούνται στο ίδιο εργαστήριο η συνολική συμπεριφορά σε συνάφεια του ΑΣΣ φαίνεται να είναι εν γένει καλύτερη ή τουλάχιστον παρεμφερής με την αντίστοιχη συμπεριφορά του ΣΣ για οποιαδήποτε αντιπροσωπευτική τάση συνάφειας.
- Διατυπώθηκαν αναλυτικές γραμμικές σχέσεις που συνδέουν τις αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας ( $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{max}$ , κατά περίπτωση) με τις μεταβολές των χαρακτηριστικών της σύνθεσης (μεταβλητοί λόγοι  $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk/lp\}$ ,  $pce/b$ , κατά περίπτωση).
- Ορίστηκαν πειραματικά βέλτιστα εύρη τιμών χαρακτηριστικών σύνθεσης ( $w/b$  και  $sf/b$ ) που ελαχιστοποιούν το φαινόμενο των άνω οπλισμών.
- Διαπιστώθηκε η συντηρητικότητα των ορίων των περιοχών «καλής» και «κακής» συνάφειας που προβλέπονται για το ΣΣ κατά την εφαρμογή τους στο ΑΣΣ και τέθηκε υπό σκέψη η μεταβολή τους, ειδικά σε στοιχεία μεγαλύτερου βάθους.
- Διαπιστώθηκε η ασήμαντη μεταβολή της συνάφειας στο ΑΣΣ συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έγχυσης για αποστάσεις ράβδων έως 1.60 m και με διασπορές ίσες ή μικρότερες εν σχέσει προς το ΣΣ.

- Διαπιστώθηκε μικρότερη επιρροή των σχετικών μετακινήσεων ράβδων, λόγω τοπικών διαφορικών καθίζησεων ικριωμάτων ή οριζόντιων μετακινήσεων των τύπων, οφειλόμενων σε σεισμικά γεγονότα ή τυχαία κρουστικά φορτία κατά τη νωπή φάση του σκυροδέματος, στη συνάφεια με το ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ.
- Διαπιστώθηκε η μεγαλύτερη ευαισθησία του ΑΣΣ ως προς τη συνάφεια δοκιμίων που υπόκεινται σε θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες (έως 900 °C), με συχνότερα φαινόμενα εκρηκτικών αποφλοιώσεων και τις απώλειες συνάφειας να είναι μεγαλύτερες από το ΣΣ.

### Ανθεκτικότητα

- Διατυπώθηκαν γενικές αναλυτικές γραμμικές σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη ανθεκτικότητας (διαπερατότητα σε νερό –ανοιχτό πορώδες, απορροφητικότητα, υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση– και διαπερατότητα σε χλωριόντα –συντελεστής διάχυσης χλωριόντων, ειδική αντίσταση) με τις μεταβολές των χαρακτηριστικών της σύνθεσης
- Διαπιστώθηκε η εξαιρετικά ευεργετική επιρροή της προσθήκης προσμίκτων τύπου II (πυριτική παιπάλη, μετακαολίνης) στη διαπερατότητα σε χλωριόντα, ακόμα και για χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης (τσιμέντου ή/ και ασβεστολιθικού φίλερ)
- Διαπιστώθηκε η αρκετά ικανοποιητική αναπαραγωγισιμότητα μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων όσο αφορά στα μεγέθη ανθεκτικότητας

Στις επόμενες τρεις παραγράφους (Παρ. 5.4 έως 5.6) περιλαμβάνεται λεπτομερής περιγραφή των παραπάνω γενικών συμπερασμάτων, αλλά και λοιπές παρατηρήσεις.

## 5.4. Ρεολογία

### 5.4.1. Δοκιμές νωπού σκυροδέματος

Οι διάφορες υπο-ομάδες μιγμάτων ΑΣΣ (βλ. Πιν. 36 του Κεφάλαιου 2) παρασκευάστηκαν στοχεύοντας σε παρόμοια ρεολογικά χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων μιγμάτων και αποσκοπούσαν στη μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών και της ανθεκτικότητας. Ως εκ τούτου, τα ευρήματα που αφορούν στη ρεολογία (η οποία εκτιμήθηκε εμμέσως, μέσω δοκιμών των χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης) αξιολογήθηκαν μόνο μακροσκοπικά για το σύνολο των μιγμάτων. Από τις συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των διάφορων δοκιμών νωπού σκυροδέματος προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- η εξάπλωση υπό εμποδιζόμενη ροή είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την αντίστοιχη εξάπλωση υπό ανεμπόδιστη ροή, με τη διαφορά τους να είναι σταθερή και περίπου ίση με 10 mm για το εύρος των εξαπλώσεων που αφορά το ΑΣΣ ( $550 \text{ mm} < SF < 850 \text{ mm}$ ),
- η ποιοτική εκτίμηση του ιξώδους μέσω των χρόνων εξάπλωσης  $t_{500}$  και εκροής  $t_v$  οδηγεί εν γένει σε παρόμοια συμπεράσματα, αν και μία μείωση κατά περίπου 20 % του ορίου μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών ιξώδους στη δοκιμή χοάνης V εκτιμάται ότι θα οδηγεί σε πιο συγκρίσιμα αποτελέσματα (ως προς την ταξινόμηση των μιγμάτων σε κατηγορίες ιξώδους),

- η τάση απόμιξης του μίγματος, όπως αυτή εκτιμάται από το χρόνο εκροής  $t_v$  5 min (κατά τη δεύτερη φάση της δοκιμής χοάνης V), φαίνεται να είναι προβλέψιμη και να αυξάνεται συστηματικά για μεγαλύτερους χρόνους  $t_v$ . Συγκεκριμένα ο χρόνος εκροής  $t_v$  5 min μπορεί να υπολογιστεί, επαυξάνοντας το χρόνο εκροής  $t_v$  κατά 40 %, για χρόνους  $t_v$  έως περίπου 20 s.

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, αναδεικνύεται η αξία της δοκιμής εξάπλωσης. Με κατάλληλη προσαρμογή των ορίων μεταξύ των κατηγοριών ιξώδους της δοκιμής χοάνης V, τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών μπορούν να είναι συγκρίσιμα. Επιπλέον, τίθεται υπό αμφισβήτηση η αποτελεσματικότητα αφενός της δοκιμής εμποδιζόμενης εξάπλωσης και αφετέρου της επαναληπτικής δοκιμής χοάνης V (μετά από 5 min) για τον προσδιορισμό της τάσης απόμιξης του μίγματος.

#### 5.4.2. Χρόνος πήξης

Αν και το δείγμα μιγμάτων που εξετάστηκε ήταν μικρό, φαίνεται ότι τα μίγματα ΑΣΣ καθυστερούν ως προς το χρόνο έναρξης πήξης τους κατά περίπου 1.5 έως και 9 ώρες, εν σχέσει προς τα μίγματα ΣΣ. Οι χρόνοι έναρξης και λήξης της πήξης φαίνεται να επηρεάζονται από την περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή μέσω εκθετικών συναρτήσεων. Σημειώνεται, πάντως, ότι τα παραπάνω ευρήματα αφορούν δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε πρακτικώς σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τυχόν έντονες διακυμάνσεις αναμένεται να συνεπηρεάσουν τα αποτελέσματα.

#### 5.4.3. Αναπαραγωγισιμότητα

Όσο αφορά στη διεργαστηριακή αναπαραγωγισιμότητα, φαίνεται ότι μέσω κατάλληλης ρύθμισης των αναλογιών των συστατικών του μίγματος μπορεί να επιτευχθούν παρεμφερείς ρεολογικές ιδιότητες. Οποιοσδήποτε διαφορές μπορούν επαρκώς να ερμηνευτούν βάσει των διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων των συστατικών υλικών και, ιδιαιτέρως, της δραστηριότητας των χημικών πρόσθετων και των περιεχόμενων πρόσμικτων τύπου II (π.χ. πυριτική παιπάλη).

### 5.5. Μηχανικές αντοχές

#### 5.5.1. Θλιπτική αντοχή

Υψηλότερες αντοχές 28 ημερών αναπτύσσονται για χαμηλότερους λόγους νερού προς συνδετικό υλικό ( $w/b$ ), υψηλότερα ποσοστά πυριτικής παιπάλης ή μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου ( $sf/b$ ,  $mk/b$ ), υψηλότερα ποσοστά μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ ( $mk/\{mk+lp\}$ ) και υψηλότερη περιεκτικότητα ρευστοποιητή ως προς το περιεχόμενο νερό ( $pce/w$ ). Οι αντοχές συσχετίζονται γραμμικά με τους εξεταζόμενους λόγους, με πολύ υψηλούς συντελεστές συσχέτισης ( $R^2 > 0.87$ ). Ειδικά για την περίπτωση της πυριτικής παιπάλης, παρατηρείται μία μείωση της αντοχής για ποσοστά αντικατάστασης χαμηλότερα από περίπου 5 %, γεγονός που αποδίδεται στην ανεπάρκεια του όγκου της παιπάλης, ώστε αυτή να δράσει ευεργετικά, αλλά και στη μείωση της πραγματικής απαίτησης σε νερό για χαμηλά ποσοστά. Όσο αφορά στο μετακαολίνη, παρατηρήθηκε ότι η επιρροή του στην αντοχή είναι παρόμοια, ανεξαρτήτως του υλικού που αντικαθιστά (τσιμέντο ή ασβεστολιθικό φίλερ). Υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη οδηγούν σε μεγαλύτερη διασπορά

αντοχών, ενώ για την περίπτωση αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ το εύρος των αντοχών μεταξύ δίδυμων δοκιμίων είναι σχεδόν σταθερό. Τα παραπάνω συμπεράσματα έρχονται, γενικώς, σε συμφωνία με την προγενέστερη βιβλιογραφία. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μεγάλες ηλικίες (360 ημέρες), η επιρροή του αυξανόμενου λόγου  $mk/b$  ή  $mk/\{mk+lp\}$  είναι πιο ήπια. Η περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη της αντοχής συναρτήσει της ηλικίας.

### 5.5.2. Εφελκυστική αντοχή

Υψηλότερες εφελκυστικές αντοχές αναπτύσσονται για υψηλότερα ποσοστά μετακαολίνη. Το εύρος των αντοχών μεταξύ δίδυμων δοκιμίων είναι μεταβλητό για την περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου, αλλά σχεδόν σταθερό για την περίπτωση αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ. Για την περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου, παρατηρήθηκε μια ασθενής γραμμική συσχέτιση, ενώ για την περίπτωση αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ παρατηρήθηκε μία ισχυρή γραμμική συσχέτιση της εφελκυστικής αντοχής με το ποσοστό αντικατάστασης. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι παρατηρείται μια μικρή πτώση της αντοχής για χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη, φαινόμενο πάντως που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

### 5.5.3. Καμπτική αντοχή

Χαμηλότερες καμπτικές αντοχές αναπτύσσονται για υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη. Η γραμμική συσχέτιση της αντοχής με το ποσοστό αντικατάστασης είναι ικανοποιητική για την περίπτωση του τσιμέντου, αλλά ασαφής για την περίπτωση του ασβεστολιθικού φίλερ. Πάντως, οι αντίθετες τάσεις μεταβολής συναρτήσει των λόγων αντικατάστασης εν σχέσει προς την εφελκυστική αντοχή ενδεχομένως υποδεικνύουν ότι οι μεταβολές είναι τυχαίες και οφείλονται στην τυχαία διασπορά των τιμών. Δεδομένου ότι και από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι η καμπτική αντοχή του ΑΣΣ δεν έχει επαρκώς μελετηθεί, απαιτείται περαιτέρω εκτεταμένη διερεύνησή της από μελλοντικούς ερευνητές.

### 5.5.4. Εφελκυστική αντοχή εν σχέσει προς τη θλιπτική αντοχή

Τα ζεύγη αντοχών των μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ βρίσκονται μεταξύ της μέσης καμπύλης και του άνω ορίου του ευρωπαϊκού κανονισμού για το ΣΣ, για το εύρος αντοχών που εξετάστηκε, από περίπου 30 έως 60 N/mm<sup>2</sup>. Αντιθέτως, για την περίπτωση μιγμάτων με ενσωμάτωση μετακαολίνη ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου ή του ασβεστολιθικού φίλερ, τα ζεύγη αντοχών βρίσκονται κοντά στο κάτω όριο του κανονισμού. Επιπλέον, ενώ στο ΣΣ η εφελκυστική αντοχή φαίνεται να συσχετίζεται με την θλιπτική αντοχή μέσω καμπύλης δυνάμεως, αυτό δε συμβαίνει πάντα για το ΑΣΣ. Συγκεκριμένα: **(α)** σε μίγματα ΑΣΣ χωρίς πρόσμικτα (τύπου I ή II) ή αποκλειστικά με πυριτική παιπάλη, οι εφελκυστικές αντοχές συσχετίζονται με τις θλιπτικές μέσω καμπύλης δυνάμεως, η οποία βρίσκεται κοντά στο άνω όριο του κανονισμού και έχει παρεμφερή τάση συσχέτισης, **(β)** σε μίγματα ΑΣΣ με ασβεστολιθικό φίλερ, τα ζεύγη αντοχών δε φαίνεται να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση, ενώ **(γ)** σε μίγματα ΑΣΣ με συνδυασμό ασβεστολιθικού φίλερ και μετακαολίνη, οι εφελκυστικές αντοχές συσχετίζονται με τις θλιπτικές μέσω καμπύλης δυνάμεως, η οποία βρίσκεται κοντά στο κάτω όριο του κανονισμού, το

οποίο φαίνεται να υπερεκτιμά τις εφελκυστικές αντοχές για χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές.

### 5.5.5. Θερμική συμπεριφορά σκυροδέματος

Υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη φαίνεται να βελτιώνουν τη θερμική απόκριση του σκυροδέματος, όταν αυτό υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες έως 600 °C, ανεξαρτήτως της απόστασης από την επιφάνεια (για βάθη έως 75 mm). Για σταθερή απόσταση από την επιφάνεια, οι θερμοκρασίες φαίνεται να συσχετίζονται γραμμικά με το ποσοστό αντικατάστασης  $mk/b$ . Αντίθετα, το ποσοστό αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη δε φαίνεται να επηρεάζει τη θερμική απόκριση του σκυροδέματος. Πάντως, κρίσιμη θεωρείται μία μελλοντική διερεύνηση της θερμικής απόκρισης του σκυροδέματος υπό το πρίσμα της διαφοράς της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των τριών εξεταζόμενων υλικών (ασβεστολιθικό φίλερ, τσιμέντο, μετακαολίνης).

### 5.5.6. Συμπεριφορά σε συνάφεια

Στο πλαίσιο διερεύνησης της συμπεριφοράς του ΑΣΣ σε συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού, εξετάστηκε η επιρροή: **(α)** του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ **(β)** του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, μέσω του λόγου πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ και **(γ)** της περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή, μέσω του λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε τυπικά μίγματα ΣΣ σε θέματα συνάφειας.

Τα θέματα αυτά αφορούσαν: **(i)** στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών συνάφειας μέσω δοκιμών εξόλκευσης σε πρότυπα κυβικά δοκίμια, **(ii)** στην ένταση του φαινομένου άνω οπλισμών, **(iii)** στην επιρροή της απόστασης από το σημείο έγχυσης στη συνάφεια, **(iv)** στην επιρροή του πάχους υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος στη συνάφεια, **(v)** στην επιρροή σχετικών μετακινήσεων μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού κατά τη διάρκεια της πήξης στη συνάφεια και **(vi)** στην επιρροή της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες στη συνάφεια. Τέλος, εξετάστηκε **(vii)** η αναπαραγωγισιμότητα παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, με κριτήριο την συμπεριφορά σε συνάφεια. Ακολουθούν τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω πειραματικές αναλύσεις.

#### 5.5.6.1. Καμπύλες τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων

Τα χαρακτηριστικά των καμπυλών τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων (αρχική δυσκαμψία, μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{max}$ , και αντίστοιχη ολίσθηση,  $s_{\tau_{max}}$ ) φαίνεται να παρουσιάζουν μικρότερη μεταβλητότητα στο ΑΣΣ, εν σχέσει προς το ΣΣ. Τα αναλυτικά κανονιστικά μοντέλα και τα μοντέλα της βιβλιογραφίας για το ΣΣ (όπως περιγράφονται αναλυτικά στην Παρ. 3.2.3) φαίνεται να υποεκτιμούν την αρχική δυσκαμψία και να υπερεκτιμούν τη μέγιστη τάση συνάφειας,  $\tau_{max}$  (υπολογιζόμενη βάσει της μέσης θλιπτικής αντοχής,  $f_{cc}$ ), ειδικά για μίγματα ΑΣΣ με υψηλότερους λόγους  $w/b$  ή μίγματα ΣΣ μεγαλύτερης εργασιμότητας (υψηλότερων λόγων  $pce/b$ ).



Από τη διερεύνηση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας Διατριβής προέκυψε ότι μία μείωση της σταθεράς 'α', που εκφράζει τη δυσκαμψία της καμπύλης τάσεων συνάφειας – ολισθήσεων, κατά 25 % (από 0.4 σε 0.3), η οποία προτείνεται και από τη βιβλιογραφία, φαίνεται να οδηγεί σε καλύτερη απεικόνιση της αρχικής δυσκαμψίας των μιγμάτων. Επιπροσθέτως, μία μείωση της προβλεπόμενης μέγιστης τάσης,  $\tau_{\max}$ , κατά 20 % (σε  $2.0 f_{cc}^{0.5}$ ) μπορεί να απαιτηθεί, ειδικά για μίγματα με μεγαλύτερο λόγο  $w/b$ . Η μείωση θα μπορούσε να είναι μικρότερη, σε περίπτωση που ο υπολογισμός της  $\tau_{\max}$  γίνεται με τη χαρακτηριστική αντοχή  $f_{ck}$  (αντί της μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cc}$ ).

### 5.5.6.2. Αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας

Η συνολική συμπεριφορά του ΑΣΣ σε συνάφεια είναι εν γένει καλύτερη ή τουλάχιστον παρεμφερής με την αντίστοιχη συμπεριφορά του ΣΣ, για οποιαδήποτε εκ των αντιπροσωπευτικών τάσεων,  $\tau_{0.25}$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{\max}$  (όπως ορίζονται στην Παρ. 3.2.4).

Παρατηρήθηκε ότι οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  οδηγούν σε παραπλήσια αποτελέσματα για τη συνάφεια. Κατ' αντιστοιχία, σε παρεμφερή αποτελέσματα μεταξύ τους οδηγούν και οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{\max}$ . Για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών ερευνητικών εργασιών, αλλά και δοκιμών της βιομηχανίας, προτείνεται τυχόν μεταγενέστερες εκδόσεις των κανονιστικών κειμένων να προδιαγράφουν τον υπολογισμό και αναφορά τουλάχιστον μίας εκ των αντιπροσωπευτικών τάσεων κάθε περίπτωσης (ως οι πιο επικρατέστερες, προτείνονται οι  $\tau_m$  και  $\tau_{\max}$ ).

Η επιρροή των χαρακτηριστικών της σύνθεσης του ΑΣΣ (μεταβολή  $w/b$  ή  $sf/b$ ) φαίνεται να αποτυπώνονται καλύτερα στις αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$ . Συγκεκριμένα, αύξηση των λόγων  $w/b$  και  $sf/b$  οδηγούν σε μείωση των  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$ , η οποία είναι πιο έντονη στην περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $w/b$ . Η αύξηση του λόγου  $w/b$  οδηγεί επίσης σε μείωση των  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{\max}$  και αύξηση της  $s_{\tau_{\max}}$ , αν και με σημαντικά χαμηλότερους συντελεστές συσχέτισης. Αντίθετα, η αύξηση του λόγου  $sf/b$  οδηγεί σε αύξηση των  $\tau_{m,int}$ ,  $\tau_{\max}$  και  $s_{\tau_{\max}}$ , πάλι όμως με χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης. Σημειώνεται ότι για ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη έως 10 % και αναλόγως των αναλογιών των υπόλοιπων συστατικών μπορεί να υποθεθεί ότι όλες οι τάσεις, και ειδικά οι  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{\max}$ , παραμένουν πρακτικώς σταθερές. Στο ΣΣ, η μεταβολή του λόγου  $pce/b$  φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά όλες τις αντιπροσωπευτικές τάσεις που εξετάστηκαν.

Για μίγματα με ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ και λόγο  $w/b = 0.51$ , το ΣΣ αναπτύσσει πρακτικώς ίσες ή οριακώς μεγαλύτερες ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  από το ΑΣΣ με ίδιο λόγο  $w/b$  ή ίδια μέση θλιπτική αντοχή, αλλά σαφώς μεγαλύτερες (έως και 50 %) ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{m,int}$  και  $\tau_{\max}$ . Η σταδιακά αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή φαίνεται, πάντως, να μειώνει τις τιμές των τάσεων σε κάθε περίπτωση. Η ολίσθηση  $s_{\tau_{\max}}$  είναι αρκετά χαμηλότερη στο ΑΣΣ για την περίπτωση κοινού λόγου  $w/b$ , αλλά οριακά μεγαλύτερη στο ΑΣΣ από οποιαδήποτε ολίσθηση των ΣΣ για την περίπτωση κοινής μέσης θλιπτικής αντοχής. Αντίθετα, για μίγματα χωρίς ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ και λόγο  $w/b = 0.62$ , το ΑΣΣ αναπτύσσει σαφώς μεγαλύτερες αντιπροσωπευτικές

τάσεις εν σχέσει προς το  $\Sigma\Sigma$  κοινού λόγου  $w/b$ . Στην περίπτωση αυτή, η ολίσθηση  $s_{\text{tmax}}$  είναι παρεμφερής μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος.

### 5.5.6.3. Μεταβολή συνάφειας καθ' ύψος (φαινόμενο άνω οπλισμών)

Το φαινόμενο άνω οπλισμών επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της σύνθεσης και φαίνεται να είναι ηπιότερο στην περίπτωση του ΑΣΣ, εν σχέσει προς το  $\Sigma\Sigma$ .

Σημειώνεται ότι σε στοιχεία μεγάλου βάθους (τα οποία προσομοιώθηκαν με κατακόρυφα στοιχεία ύψους 1.80 m, με εγκάρσια εγκιβωτισμένες ράβδους, κατανεμημένες καθ' ύψος), τόσο η επιρροή των χαρακτηριστικών της σύνθεσης, όσο και η επιρροή του τύπου σκυροδέματος δεν είναι εμφανής σε ράβδους που βρίσκονται σε αποστάσεις έως 0.70 m από τον πόδα του στοιχείου. Για μεγαλύτερες αποστάσεις, τα χαρακτηριστικά της σύνθεσης, όπως η υψηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ο χαμηλότερος λόγος  $w/b$ , η ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης, καθώς και η λεπτότητα και περιεκτικότητα ασβεστολιθικού φίλερ, φαίνεται να επηρεάζουν την ένταση του φαινομένου άνω οπλισμών προς τον περιορισμό του. Η απώλεια συνάφειας καθ' ύψος στα δοκίμια ΑΣΣ φαίνεται να είναι παρόμοια ή μικρότερη από τα δοκίμια  $\Sigma\Sigma$  για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_{0.25}$ , αλλά παρόμοια ή μεγαλύτερη για τις αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_m$  και  $\tau_{\text{max}}$ . Ο κανονιστικώς προβλεπόμενος μειωτικός συντελεστής 0.7 της τάσης συνάφειας, που στοχεύει στο συνυπολογισμό του φαινομένου άνω οπλισμών στην εκτιμώμενη τάση συνάφειας, φαίνεται να είναι επαρκής –έστω και οριακά– για οποιαδήποτε αντιπροσωπευτική τάση και για οποιοδήποτε τύπο σκυροδέματος για ράβδους που βρίσκονται σε απόσταση από τον πόδα δοκιμίου μεγάλου βάθους έως 0.70 m. Πάντως, θα μπορούσε μελλοντικά να εξεταστεί μία μεγέθυνση της περιοχής «καλής» συνάφειας, ειδικά για στοιχεία μεγαλύτερου βάθους. Ειδικά για στοιχεία του βάθους που εξετάστηκε (1.80 m), οι τάσεις στο όριο αλλαγής μεταξύ περιοχών «καλής» και «κακής» συνάφειας (σε απόσταση από τη βάση ίση με 0.25 m) εμφανίζονται μειωμένες περίπου 10 % εν σχέσει προς την τάση της κάτω ράβδου, ανεξαρτήτως της εξεταζόμενης αντιπροσωπευτικής τάσης ή του τύπου σκυροδέματος. Για μεγαλύτερες αποστάσεις από τη βάση ( $> 0.25$  m) η μείωση της τάσης συνάφειας μπορεί να φτάσει και σε ποσοστά περί του 60 έως 70 %, που θα οδηγούσαν σε απαίτηση ενός μειωτικού συντελεστή μεταξύ 0.4 έως 0.3, αντιστοίχως.

Για τα κατακόρυφα στοιχεία μικρού βάθους (τα οποία προσομοιώθηκαν με κατακόρυφα στοιχεία ύψους 0.60 m, με εγκάρσια εγκιβωτισμένες ράβδους, κατανεμημένες καθ' ύψος) ο κανονιστικώς προβλεπόμενος μειωτικός συντελεστής και ο καθορισμός του ορίου αλλαγής μεταξύ περιοχών «καλής» και «κακής» συνάφειας φαίνεται να είναι επαρκείς για το ΑΣΣ. Για τη δεδομένη σύνθεση που εξετάστηκε, λόγοι  $w/b$  μεταξύ 0.46 και 0.51 φαίνεται να ελαχιστοποιούν ή και να εξαλείφουν πλήρως το φαινόμενο των άνω οπλισμών. Υψηλότεροι λόγοι  $w/b$  οδηγούν σε εντονότερο φαινόμενο άνω οπλισμών για ράβδους που βρίσκονται κοντά στο όριο μεταξύ των περιοχών «καλής» και «κακής» συνάφειας ή για ράβδους εντός των περιοχών «κακής» συνάφειας, ανεξαρτήτως της αντιπροσωπευτικής τάσης. Παρά το γεγονός αυτό, θα πρέπει να τονιστεί ότι το φαινόμενο άνω οπλισμών παραμένει ηπιότερο στα μίγματα ΑΣΣ υψηλού λόγου  $w/b$  εν σχέσει προς το  $\Sigma\Sigma$ . Συγκεκριμένα, το  $\Sigma\Sigma$  παρουσιάζει εν γένει απώλειες συνάφειας καθ' ύψος υψηλότερες από τις κανονιστικώς προβλεπόμενες ( $> 70$  %), οι οποίες μάλιστα μεγεθύνονται περαιτέρω για μεγαλύτερους λόγους  $pce/b$  και εντονότερα για την αντιπροσωπευτική τάση  $\tau_m$ .

Το φαινόμενο άνω οπλισμών φαίνεται να περιορίζεται (ή, για συγκεκριμένες συνθέσεις, να ελαχιστοποιείται έως την πλήρη εξάλειψή του) για ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη μεταξύ  $sf/b = 7.5$  και  $10.6$  %. Σημειώνεται, πάντως, ότι, αναλόγως της αναλογίας των υπόλοιπων συστατικών, η απώλεια συνάφειας καθ' ύψος μπορεί να εμφανίζεται και μεγαλύτερη της προβλεπόμενης από τους κανονισμούς.

#### 5.5.6.4. Μεταβολή συνάφειας κατά μήκος (συναρτήσεως της απόστασης από το σημείο έγχυσης)

Οι ανηγμένες αντιπροσωπευτικές τάσεις συνάφειας δε φαίνεται να επηρεάζονται από την απόσταση από το σημείο έγχυσης, καθώς δεν παρατηρείται απώλεια συνάφειας σε εγκάρσια τοποθετημένες ράβδους κατά μήκος οριζόντιων δοκιμίων με απόσταση ακραίων ράβδων έως (τουλάχιστον)  $1.60$  m για οποιοδήποτε μίγμα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  ή  $sf/b$  που εξετάστηκε. Η διασπορά των τιμών των τάσεων συνάφειας μεταξύ των κατά μήκος καταναμημένων ράβδων σε δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  ή  $sf/b$  με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο είναι συγκρίσιμη και, κατά περίπτωση, ακόμα και μικρότερη από την αντίστοιχη διασπορά σε ομοιόμορφα συμπακνωμένα και με πολλά σημεία έγχυσης δοκίμια ΣΣ. Ως εκ τούτου, γραμμικά στοιχεία έως  $3.20$  m ή επιφανειακά στοιχεία έως περίπου  $10$  m<sup>2</sup>, παρασκευασμένα από ΑΣΣ, απαιτούν, υπό συνθήκες, μόνο ένα κεντρικό σημείο έγχυσης, χωρίς να κινδυνεύουν από απώλεια συνάφειας στις πιο απομακρυσμένες ράβδους. Σημειώνεται, πάντως, ότι υψηλά ποσοστά οπλισμών ή περίπλοκη γεωμετρία μπορούν δυνητικά να περιορίσουν αυτή την ικανότητα.

Η μέση τιμή της ανηγμένης μέσης τάσης συνάφειας,  $\tau_m/f_{cc}^{0.5}$ , όλων των ράβδων μειώνεται για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ , ενώ δεν παρατηρείται κάποια σαφής συσχέτιση για την περίπτωση της ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας,  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$ . Οι ολισθήσεις  $s_{tmax}$  αυξάνονται σταδιακά για μεγαλύτερους λόγους  $w/b$ , ενώ φαίνεται να συσχετίζονται με την ανηγμένη μέγιστη τάση συνάφειας. Συγκεκριμένα, για μία αύξηση της  $\tau_{max}/f_{cc}^{0.5}$  η ολίσθηση  $s_{tmax}$  τετραπλασιάζεται.

Για μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ παρεμφερούς κοκκομετρίας και κοινό λόγο  $w/b = 0.51$  η μεταβλητότητα των τάσεων φαίνεται να είναι παρόμοια, οι μέσες τάσεις  $\tau_m$  είναι υψηλότερες στο ΑΣΣ, ενώ οι μέγιστες τάσεις  $\tau_{max}$  είναι υψηλότερες στο ΣΣ. Για μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρεμφερούς κοκκομετρίας και κοινή μέση θλιπτική αντοχή  $f_{cc} \sim 50$  N/mm<sup>2</sup>, η μεταβλητότητα των τάσεων είναι μικρότερη στο ΑΣΣ, ενώ τόσο οι μέσες όσο και οι μέγιστες τάσεις είναι παρεμφερείς μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος.

#### 5.5.6.5. Επιρροή υποκείμενου και υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος

Δεδομένης της μη απώλειας συνάφειας κατά μήκος οριζόντιου στοιχείου (μήκους  $1.60$  m) με μοναδικό σημείο έγχυσης στο ένα άκρο (όπως περιγράφηκε στην Παρ. 5.5.6.4), η μέση τιμή των τάσεων των ράβδων συγκρίθηκε με την τάση συνάφειας της άνω και της κάτω ράβδου του κατακόρυφου στοιχείου, ώστε να διερευνηθεί, αντιστοίχως, η επιρροή στη συνάφεια του υποκείμενου και του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος.

Από τη σύγκριση των τάσεων συνάφειας των ράβδων του οριζόντιου στοιχείου με την άνω ράβδο του κατακόρυφου στοιχείου προέκυψε ότι η επιρροή του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος είναι εν γένει λιγότερο σημαντική για το ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ. Για τις ράβδους με μεγάλο υποκείμενο στρώμα σκυροδέματος, η αύξηση του λόγου  $w/b$  σε μίγματα ΑΣΣ φαίνεται να οδηγεί σε μία σαφή μείωση της  $\tau_{max}$ , που μπορεί να αποδοθεί σε μια ήπια στατική απόμιξη λόγω βαρύτητας. Αντίθετα, οι μεταβολές του λόγου  $w/b$  δε φαίνεται να έχουν κάποια επιρροή στην  $\tau_m$ . Η επιρροή του υποκείμενου στρώματος σκυροδέματος περιορίζεται για λόγους  $sf/b$  κοντά στο 10 %. Για τα μίγματα ΣΣ, υψηλότεροι λόγοι  $pce/b$  οδηγούν σε μείωση των  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ .

Ομοίως, από τη σύγκριση των τάσεων συνάφειας των ράβδων του οριζόντιου στοιχείου με την κάτω ράβδο του κατακόρυφου στοιχείου προέκυψε ότι η επιρροή του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος είναι εν γένει λιγότερο σημαντική για το ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ. Για τις ράβδους με μεγάλο υπερκείμενο στρώμα σκυροδέματος, η μεταβολή του λόγου  $w/b$  σε μίγματα ΑΣΣ δε φαίνεται να επηρεάζει τις τάσεις  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ . Η επιρροή του υπερκείμενου στρώματος σκυροδέματος περιορίζεται για υψηλούς λόγους  $sf/b$ , μεταξύ 10.0 και 14.0 %. Αντίθετα, υψηλότεροι λόγοι  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ οδηγούν σε μείωση των  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$ .

#### 5.5.6.6. Επιρροή σχετικών μετακινήσεων σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού κατά την πήξη του σκυροδέματος

Σεισμικά γεγονότα κατά τη διάρκεια της πήξης δεν αναμένεται να επηρεάσουν αρνητικά τη συνάφεια του ΑΣΣ, εν σχέσει προς το ΣΣ. Μετά την έναρξη πήξης, η αρνητική επιρροή τυχόν σχετικών μετακινήσεων μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού είναι συγκρίσιμη μεταξύ του ΑΣΣ και του ΣΣ. Συγκεκριμένα, για την μέση τάση συνάφειας  $\tau_m$  στα δοκίμια ΑΣΣ οι τάσεις των ράβδων που μετακινούνται πριν την έναρξη της πήξης παραμένουν πρακτικώς ανεπηρέαστες, ενώ μειώνονται κατά 40 έως 60 % για τις ράβδους που μετακινούνται μετά την έναρξη της πήξης. Στα δοκίμια ΣΣ, η μετακίνηση της ράβδου σε χρόνο που αντιστοιχεί σε μικρή πίεση διεύθυνσης βελτιώνει τη συνάφεια (έως και 40 %), μέσω της επίτευξης καλύτερης συμπίκνωσης του σκυροδέματος γύρω από τη ράβδο, ενώ σε ράβδους που μετακινούνται σε χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν σε διαδοχικά μεγαλύτερη πίεση διεύθυνσης, η τάση μειώνεται σχεδόν γραμμικά κατά ολόένα και μεγαλύτερα ποσοστά (έως και 80 %) εν σχέσει προς την αρχική της τιμή. Όσο αφορά στη μέγιστη τάση συνάφειας  $\tau_{max}$  οι δύο τύποι σκυροδέματος παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, οι τάσεις των δύο ράβδων που μετακινούνται πριν την έναρξη της πήξης παρουσιάζουν μικρή βελτίωση ή αμελητέα απώλεια για το ΑΣΣ. Αντίθετα, για το ΣΣ οι τάσεις παρουσιάζουν μια σημαντική αρχική βελτίωση έως και 20 έως 30 %, η οποία ακολουθείται από μια ηπιότερη, αν και προφανή, μείωση λίγο πριν την έναρξη της πήξης. Οι μετακινήσεις των ράβδων μετά την έναρξη της πήξης οδηγούν σε απώλεια συνάφειας από 60 έως 80 % για οποιονδήποτε τύπο σκυροδέματος.

Συνοψίζοντας, το ΑΣΣ φαίνεται να παρουσιάζει μία εν γένει καλύτερη συμπεριφορά εν σχέσει προς το ΣΣ έως την πήξη. Παρά το γεγονός ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε υπερρευστοποιητή στα μίγματα ΑΣΣ οδηγεί σε μία σημαντική καθυστέρηση της αρχικής πήξης, τυχόν σεισμικά γεγονότα που μπορεί αν οδηγήσουν σε μετακινήσεις των τύπων και, συνεπώς, σε σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος, κατά τη διάρκεια της σημαντικά μεγαλύτερης περιόδου μετά την διάστρωση, δεν αναμένεται να επηρεάσουν αρνητικά τη συνάφεια. Μετά την αρχική

πήξη, τόσο το ΑΣΣ όσο και το ΣΣ φαίνεται να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όσο αφορά στην απώλεια της τάσης συνάφειας λόγω των σχετικών μετακινήσεων, η οποία για την περίπτωση της μέσης τάσης συνάφειας είναι ελαφρώς χαμηλότερη στο ΑΣΣ εν σχέσει προς το ΣΣ.

#### 5.5.6.7. Επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στη συνάφεια

Τα δοκίμια ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$ , αλλά και τα δοκίμια ΣΣ, δεν παρουσίασαν φαινόμενα εκρηκτικών αποφλοιώσεων υπό υψηλές θερμοκρασίες, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι για τα εν λόγω δοκίμια ΑΣΣ η θερμική καταπόνηση ανήλθε μόνο έως 650 °C. Για ορισμένα σκυροδέματα ΑΣΣ με ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης και, ειδικότερα, για εκείνα με υψηλό λόγο  $sf/b$  παρατηρήθηκαν φαινόμενα εκρηκτικών αποφλοιώσεων κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες έως 900 °C, γεγονός που αποδόθηκε στον σταθερό, αλλά μη ελεγχόμενο, υψηλό ρυθμό θερμικής καταπόνησης (6.2 °C/min) του πυριαντηρίου που χρησιμοποιήθηκε.

Θερμοκρασίες έως 300 °C φαίνεται να επηρεάζουν περισσότερο την  $\tau_m$  και λιγότερο την  $\tau_{max}$ , σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  ή μίγματα ΣΣ. Συγκεκριμένα, η απώλεια στην τάση συνάφειας ανήλθε σε 40 και 30 % για τη μέση και τη μέγιστη τάση, αντίστοιχα. Οι μειώσεις στο ΣΣ ήταν μικρότερες κατά περίπου 15 % και ανήλθαν σε 30 και 20 % για τη μέση και τη μέγιστη τάση, αντίστοιχα. Η ολίσθηση  $s_{\tau_{max}}$  παραμένει πρακτικώς σταθερή ανεξαρτήτως του λόγου  $w/b$  στα δοκίμια ΑΣΣ, ενώ στα δοκίμια ΣΣ τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Οι αντίστοιχες αντιπροσωπευτικές τάσεις των μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  δε φαίνεται να επηρεάζονται, ενώ υψηλότεροι λόγοι  $sf/b$  φαίνεται να μειώνουν την  $s_{\tau_{max}}$ .

Θερμοκρασίες έως 650 ή 900 °C φαίνεται να μειώνουν όλα τα χαρακτηριστικά συνάφειας που εξετάστηκαν ( $\tau_m$ ,  $\tau_{max}$ ,  $s_{\tau_{max}}$ ), με την επιρροή να είναι ελαφρώς εντονότερη στην περίπτωση του ΑΣΣ. Λόγω μικρού δείγματος, δεν είναι σαφής ο τρόπος επιρροής της σύνθεσης την απομένουσα συνάφεια, πάντως οι διαφορές μεταξύ των συνθέσεων φαίνεται να είναι πιο έντονες στην περίπτωση διαφορετικών λόγων  $w/b$  εν σχέσει προς τους διαφορετικούς λόγους  $sf/b$ . Για το ΣΣ, οι διαφορετικοί λόγοι  $pce/b$  δε φαίνεται να μεταβάλλουν τα αποτελέσματα.

#### 5.5.6.8. Διεργαστηριακή αναπαραγωγισιμότητα

Η σύγκριση των αντιπροσωπευτικών τάσεων συνάφειας  $\tau_m$  και  $\tau_{max}$  παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ με ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης μεταξύ των δύο διαφορετικών εργαστηρίων που συμμετείχαν στην έρευνα οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι τυχόν αποκλίσεις δεν ξεπερνούν ένα εύρος από -15 έως +35 %, το οποίο περιορίζεται σε  $\pm 15$  % για την πλειονότητα των τιμών. Η εν λόγω απόκλιση είναι άμεσα συγκρίσιμη με την επαναληψιμότητα των δοκιμών εξόλκευσης μεταξύ δίδυμων δοκιμίων (από το ίδιο μίγμα) που ελέγχονται στο ίδιο εργαστήριο και από τον ίδιο χειριστή και, επομένως, διασφαλίζεται ικανοποιητική διεργαστηριακή αναπαραγωγισιμότητα, δεδομένων και των διαφορετικών συστατικών υλικών (προέλευση, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά), αλλά και των διαφορετικών διατάξεων ελέγχου και χειριστών. Οι αντιπροσωπευτικές τάσεις  $\tau_{0.25}$  και  $\tau_m$  οδηγούν σε αντίθετα αποτελέσματα μεταξύ των εργαστηρίων, όσο αφορά την επιρροή του λόγου  $sf/b$ . Ως εκ τούτου, το πλέον κατάλληλο χαρακτηριστικό μέγεθος συνάφειας για τη διεργαστηριακή σύγκριση παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  φαίνεται να είναι η μέγιστη τάση

συνάφειας,  $\tau_{\max}$ . Συγκεκριμένα, υψηλότεροι λόγοι  $sf/b$  φαίνεται να αυξάνουν την  $\tau_{\max}$  των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν σε οποιοδήποτε εκ των δύο εργαστηρίων. Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πυριτικής παιπάλης και η συνεπακόλουθη δραστηριότητά της στο μίγμα, φαίνεται να παίζουν σημαντικό ρόλο και στα μηχανικά χαρακτηριστικά, πέραν των ρεολογικών.

## 5.6. Ανθεκτικότητα

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής διερευνήθηκε η επιρροή των χαρακτηριστικών της σύνθεσης σε θέματα ανθεκτικότητας σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επιρροή (**α**) του λόγου νερού προς συνδετικό υλικό,  $w/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ (**β**) του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, μέσω του λόγου πυριτικής παιπάλης προς συνδετικό υλικό,  $sf/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ, (**γ**) του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη, μέσω του λόγου μετακαολίνη προς συνδετικό υλικό,  $mk/b$ , σε μίγματα ΑΣΣ, (**δ**) του ποσοστού αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη, μέσω του λόγου μετακαολίνη προς συνολική ποσότητα μετακαολίνη και ασβεστολιθικού φίλερ,  $mk/\{mk+lp\}$ , σε μίγματα ΑΣΣ και (**ε**) της περιεκτικότητας υπερρευστοποιητή, μέσω του λόγου υπερρευστοποιητή προς συνδετικό υλικό,  $pce/b$ , σε τυπικά μίγματα ΣΣ σε θέματα ανθεκτικότητας.

Τα θέματα αυτά αφορούν στην εκτίμηση (**i**) της διαπερατότητας σε νερό μέσω του υπολογισμού του ανοιχτού πορώδους,  $p$  (%), της απορροφητικότητας,  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ ), της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση με χρήση των προτεινόμενων δεικτών του χρόνου εξίσωσης πίεσης,  $\ln T$  ( $T$  σε s), και εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας,  $c$  ( $\times 10^{-3}$ ), και της υδατοπερατότητας υπό σταθερή πίεση, μέσω του προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης νερού,  $d$  (mm), και (**ii**) της διαπερατότητας σε χλωριόντα, μέσω του υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων από πειράματα μη-σταθερής κατάστασης,  $D_{\text{nssm}}$  ( $\times 10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ), της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  ( $\text{k}\Omega\text{-cm}$ ), και του ηλεκτρικού φορτίου,  $Q$  (C). Πραγματοποιήθηκαν, επιπροσθέτως, (**iii**) παραμετρικές αναλύσεις μεταξύ των ανωτέρω αναφερθέντων μεγεθών, ενώ σε μέρος των προαναφερθέντων θεμάτων ανθεκτικότητας εξετάστηκε, επιπλέον, (**iv**) η αναπαραγωγιμότητα παρεμφερών μιγμάτων ΑΣΣ μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, με κριτήριο την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Ακολουθούν τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω πειραματικές αναλύσεις.

### 5.6.1. Διαπερατότητα σε νερό

#### 5.6.1.1. Ανοιχτό πορώδες

Στο σύνολο των μιγμάτων που παρασκευάστηκαν και διερευνήθηκαν, το ανοιχτό πορώδες σε ηλικία 28 ημερών δε φαίνεται εν γένει να συσχετίζεται με κάποια συγκεκριμένη αναλογία συστατικών της σύνθεσης ή με τη μέση θλιπτική αντοχή. Πάντως, στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, αποδείχτηκε ότι η εκτίμηση του ανοιχτού πορώδους σε ηλικία 28 ημερών είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των συστατικών ή τις απόλυτες τιμές τους στο μίγμα. Οι γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.1.1). Σημειώνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών, με βάση τις παραπάνω γραμμικές σχέσεις, είναι αρκετά

ικανοποιητικοί ( $R^2 > 0.62$ ). Εκτιμάται, πάντως, ότι περαιτέρω στοχευμένη έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε αρκετά πιο ασφαλείς εξισώσεις εκτίμησης του ανοιχτού πορώδους.

Η εκτίμηση του ανοιχτού πορώδους σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των χαρακτηριστικών λόγων ( $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk+lp\}$ ). Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε σχετικά μεγάλη διασπορά μεταξύ των εκτιμώμενων μέσω γραμμικών σχέσεων τιμών και των πειραματικών τιμών ( $R^2 = 0.38$ ). Οι γραμμικές σχέσεις μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.1.1).

Ξεχωριστά για κάθε εξετασθείσα υπο-ομάδα συνθέσεων, το ανοιχτό πορώδες παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, το ανοιχτό πορώδες μιγμάτων ΑΣΣ σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να αυξάνεται για υψηλότερους λόγους  $w/b$ . Η ενσωμάτωση πρόσμικτων τύπου ΙΙ (πυριτική παιπάλη και μετακαολίνης) σε μίγματα ΑΣΣ, ως υλικών αντικατάστασης του περιεχόμενου τσιμέντου, φαίνεται να μειώνουν το ανοιχτό πορώδες σε ηλικία 28 ημερών, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή συναρτήσκει του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη παρουσιάζει σημαντική διασπορά. Η μείωση του ανοιχτού πορώδους με την προσθήκη έστω και μικρής ποσότητας πυριτικής παιπάλης είναι πολύ υψηλή (προσθήκη 5 % πυριτικής παιπάλης μειώνει το ανοιχτό πορώδες από 13.5 % σε 10.0 %), ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά (έως 20 %) το ανοιχτό πορώδες μειώνεται γραμμικά.

Σε ηλικία 360 ημερών, η προσθήκη και η μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε μετακαολίνη ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου δε φαίνεται να επηρεάζουν το ανοιχτό πορώδες, φαινόμενο που παρατηρείται σε οποιαδήποτε ηλικία (28 ή 360 ημερών) και για τη μεταβολή του λόγου  $mk/\{mk+lp\}$ . Ειδικά για τη χρήση του μετακαολίνης ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου, μπορεί να αναφερθεί ότι προσφέρει απλώς ταχύτερη επίτευξη της τελικής τιμής του ανοιχτού πορώδους σε μεγάλες ηλικίες (360 ημέρες), η οποία όμως δε διαφέρει από την αντίστοιχη τιμή του ανοιχτού πορώδους του μίγματος αναφοράς στην ίδια ηλικία. Για την περίπτωση αντικατάστασης του ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη, παρατηρείται μία μείωση του ανοιχτού πορώδους κατά περίπου 11.5 % από την ηλικία των 28 ημερών στην ηλικία των 360 ημερών (μείωση από 18.4 % σε 16.3 %), γεγονός που αποδίδεται αποκλειστικά στη συνεχισθείσα συντήρηση σε δεξαμενή νερού.

Γενικώς, προτείνεται η μέτρηση του ανοιχτού πορώδους σε μίγματα ΑΣΣ, τα οποία εν γένει περιλαμβάνουν ποζολανικά πρόσμικτα (τύπου ΙΙ), να πραγματοποιείται σε μεγαλύτερες ηλικίες και κατόπιν καλής συντηρήσης (σε δεξαμενή νερού), ώστε η επιδράση της ποζολανικότητας των υλικών στο ανοιχτό πορώδες να έχει ολοκληρωθεί.

Για τα μίγματα ΣΣ σταθερής σύνθεσης, η προσθήκη και η σταδιακή αύξηση του υπερρευστοποιητή για την επίτευξη υψηλής εργασιμότητας (κατηγορίες κάθισης S3-S4) έως ποσοστού  $pce/b = 1.0$  %, φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική αύξηση του ανοιχτού πορώδους 28 ημερών έως και κατά περίπου 33 % (αύξηση ανοιχτού πορώδους από 15 σε 20 %). Συγκρίνοντας τα μίγματα ΑΣΣ με μίγματα ΣΣ παρεμφερούς κοκκομετρίας, φαίνεται ότι το ίδιο ανοιχτό πορώδες 28 ημερών επιτυγχάνεται για αυξημένο λόγο  $w/b$  κατά 10 % στα μίγματα ΑΣΣ, ενώ για τον ίδιο

λόγο  $w/b = 0.51$ , το ανοιχτό πορώδες του ΑΣΣ είναι κατά 15 έως 30 % χαμηλότερο από το ανοιχτό πορώδες του ΣΣ.

Τέλος, από τη διεργαστηριακή διερεύνηση παρεμφερών μιγμάτων, προέκυψε ότι το ανοιχτό πορώδες 28 ημερών μειώνεται με σχετικά παρόμοιο τρόπο μεταξύ των εργαστηρίων, συναρτήσει της μείωσης του λόγου  $w/b$  ή της αύξησης του λόγου  $sf/b$ . Ειδικά για την περίπτωση του μεταβλητού λόγου  $w/b$ , φαίνεται οι τυχόν διαφορές να περιορίζονται για υψηλότερους λόγους  $w/b$ .

### 5.6.1.2. Απορροφητικότητα

Ανεξαρτήτως των υπόλοιπων αναλογιών των συστατικών, η απορροφητικότητα του ΑΣΣ φαίνεται να μειώνεται εκθετικά, αν και με μεγάλη διασπορά των επιμέρους τιμών, για μεγαλύτερους λόγους τσιμέντου προς πάστα,  $c/p$ . Δεν παρατηρήθηκε το ίδιο φαινόμενο και στα μίγματα ΣΣ, αν και τα μίγματα που δοκιμάστηκαν δεν είχαν ουσιαστικές μεταβολές στη σύνθεσή τους. Γενικά, για τον ίδιο λόγο  $c/p$  το ΑΣΣ αναπτύσσει μικρότερη απορροφητικότητα εν σχέσει προς το ΣΣ.

Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η εκτίμηση της απορροφητικότητας σε ηλικία 28 ημερών είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των συστατικών ή τις απόλυτες τιμές τους στο μίγμα. Οι γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.1.2). Σημειώνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών, με βάση τις παραπάνω γραμμικές σχέσεις, είναι ικανοποιητικοί ( $R^2 \approx 0.65$ ). Εκτιμάται, πάντως, ότι περαιτέρω στοχευμένη έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα πιο ασφαλείς εξισώσεις εκτίμησης της απορροφητικότητας.

Η εκτίμηση της απορροφητικότητας σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των χαρακτηριστικών λόγων ( $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk+lp\}$ ). Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε σχετικά μεγάλη διασπορά μεταξύ των εκτιμώμενων μέσω γραμμικών σχέσεων τιμών και των πειραματικών τιμών ( $R^2 = 0.34$ ). Οι γραμμικές σχέσεις μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.1.2).

Ξεχωριστά για κάθε εξετασθείσα υπο-ομάδα συνθέσεων, η απορροφητικότητα παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η απορροφητικότητα σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να αυξάνεται για υψηλότερους λόγους  $w/b$  και να μειώνεται υψηλότερους λόγους  $sf/b$ ,  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$ . Ειδικά για την περίπτωση της αντικατάστασης τσιμέντου ή ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη, η μείωση είναι παρεμφερής μεταξύ των δύο ηλικιών που ελέγχθηκαν, 28 και 360 ημέρες. Για τα μίγματα ΣΣ, η μεταβολή του λόγου  $pce/b$  δε φαίνεται να μεταβάλλει την απορροφητικότητα 28 ημερών, αν και παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις. Η σύγκριση μεταξύ μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ παρεμφερούς σύνθεσης και κοινού λόγου  $w/b$  αποδεικνύει ότι η απορροφητικότητα του ΑΣΣ είναι πάντοτε μικρότερη ή, το πολύ, ίση με την αντίστοιχη απορροφητικότητα του ΣΣ.

Τέλος, από τη διεργαστηριακή διερεύνηση παρεμφερών μιγμάτων, προέκυψε ότι η απορροφητικότητα μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $sf/b$  είναι απολύτως συγκρίσιμη μεταξύ των δύο εργαστηρίων, ενώ η απορροφητικότητα μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού



λόγου  $w/b$  είναι παρεμφερής για μίγματα χαμηλότερου λόγου  $w/b$ , ενώ περισσότερο επιρρεπής σε διαφοροποιήσεις για υψηλότερους λόγους  $w/b$ .

### 5.6.1.3. Υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση

Στο σύνολο των διερευνηθέντων μιγμάτων, η υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη ή σταθερή πίεση δε φαίνεται να συσχετίζεται με κάποια συγκεκριμένη αναλογία συστατικών της σύνθεσης ή τη μέση θλιπτική αντοχή.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, αποδείχτηκε ότι η εκτίμηση της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση σε ηλικία 28 ημερών είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των συστατικών ή τις απόλυτες τιμές τους στο μίγμα. Οι γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν, ανάλογα με το εξεταζόμενο μέγεθος (χρόνος εξίσωσης πίεσης,  $\ln T_{\text{atm}}$ , ή εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας,  $c$ ) μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.1.3). Σημειώνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών, με βάση τις παραπάνω γραμμικές σχέσεις, είναι αρκετά ικανοποιητικοί ( $0.68 < R^2 < 0.72$ ). Εκτιμάται, πάντως, ότι περαιτέρω στοχευμένη έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα πιο ασφαλείς εξισώσεις εκτίμησης του χρόνου εξίσωσης πίεσης και του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας.

Η εκτίμηση της υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των χαρακτηριστικών λόγων ( $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk+lp\}$ ). Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε σχετικά μεγάλη διασπορά μεταξύ των εκτιμώμενων μέσω γραμμικών σχέσεων τιμών και των πειραματικών τιμών, με υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης να υπολογίζεται για τον εκθετικό συντελεστή διαπερατότητας ( $R^2 = 0.54$ , έναντι  $R^2 = 0.24$  για τον χρόνο εξίσωσης πίεσης). Οι γραμμικές σχέσεις μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.1.3).

Ξεχωριστά για κάθε εξετασθείσα υπο-ομάδα συνθέσεων, η υδατοπερατότητα υπό μεταβαλλόμενη πίεση παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, μεγαλύτεροι χρόνοι εξίσωσης πίεσης, που συνεπάγονται λιγότερο υδατοπερατό σκυρόδεμα, υπολογίστηκαν για μίγματα ΑΣΣ με χαμηλότερους λόγους  $w/b$  ή  $sf/b$  και για μίγματα ΣΣ με υψηλότερους λόγους  $pce/b$ . Η αντικατάσταση του τσιμέντου ή του ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη δε φαίνεται να επηρεάζει τον χρόνο εξίσωσης πίεσης, ανεξαρτήτως της ηλικίας ελέγχου, στις 28 ή τις 360 ημέρες. Από την άλλη πλευρά, ο εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας, μικρότερες τιμές του οποίου συνεπάγονται λιγότερο υδατοπερατό σκυρόδεμα, φαίνεται να μειώνεται για μίγματα ΑΣΣ με χαμηλότερους λόγους  $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$  ή  $mk/\{mk+lp\}$ . Ειδικά για τους δύο τελευταίους λόγους, η επιρροή της ηλικίας δε φαίνεται να μεταβάλλει τα ευρήματα. Σε μίγματα ΣΣ, ο εκθετικός συντελεστής υδατοπερατότητας φαίνεται να μειώνεται για υψηλότερους λόγους  $pce/b$ .

Συγκρίνοντας τα μίγματα ΑΣΣ και ΣΣ, παρατηρείται ότι για παρεμφερή σύνθεση και κοινό λόγο  $w/b$ , το ΑΣΣ είναι λιγότερο υδατοπερατό από το ΣΣ, όταν η υδατοπερατότητά τους εκτιμάται είτε μέσω του χρόνου εξίσωσης πίεσης είτε μέσω του εκθετικού συντελεστή υδατοπερατότητας. Παρεμφερείς τιμές υδατοπερατότητας υπό μεταβαλλόμενη πίεση μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος επιτυγχάνονται για αυξημένο λόγο  $w/b$  κατά 10 % στα μίγματα ΑΣΣ.

## 5.6.2. Διαπερατότητα σε χλωριόντα

### 5.6.2.1. Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων

Ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων φαίνεται να συσχετίζεται με συγκεκριμένες αναλογίες συστατικών της σύνθεσης και με τη μέση θλιπτική αντοχή, με τις συσχετίσεις να είναι εν γένει καλύτερες σε μεγαλύτερες ηλικίες. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μειώνεται για μεγαλύτερους λόγους συνδετικού υλικού προς το συνολικό βάρος του μίγματος,  $b/w_{tot}$ , σε ηλικία 90 και 180 ημερών, αν και θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά των τιμών είναι μεγάλη. Για ίδιο λόγο  $b/w_{tot}$  ο συντελεστής είναι χαμηλότερος για μίγματα ΑΣΣ.

Όπως και στα μεγέθη που αφορούν στη διαπερατότητα σε νερό, έτσι και εδώ, αποδείχτηκε ότι η εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων σε ηλικία 28 ημερών είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των συστατικών ή τις απόλυτες τιμές τους στο μίγμα. Οι γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.2.1). Σημειώνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών, με βάση τις παραπάνω γραμμικές σχέσεις, είναι αρκετά ικανοποιητικοί ( $R^2 > 0.64$ ). Εκτιμάται, πάντως, ότι περαιτέρω στοχευμένη έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα πιο ασφαλείς εξισώσεις εκτίμησης του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων.

Η εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των χαρακτηριστικών λόγων ( $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk+lp\}$ ). Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε σχετικά μεγάλη διασπορά μεταξύ των εκτιμώμενων μέσω γραμμικών σχέσεων τιμών και των πειραματικών τιμών ( $R^2 = 0.55$ ). Οι γραμμικές σχέσεις μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.2.1).

Ξεχωριστά για κάθε εξετασθείσα υπο-ομάδα συνθέσεων, ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων σε ηλικία 28 ημερών παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μειώνεται γραμμικά για χαμηλότερους λόγους  $w/b$  σε μίγματα ΑΣΣ και υψηλότερους λόγους  $pce/b$  σε μίγματα ΣΣ, αν και στη δεύτερη περίπτωση θα μπορούσε να υποθεθεί ότι ο συντελεστής παραμένει πρακτικώς σταθερός. Η μείωση του συντελεστή είναι εκθετική για υψηλότερους λόγους  $sf/b$ ,  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$ . Η ενσωμάτωση πρόσμικτων τύπου Π (πυριτική παιπάλη ή μετακαολίνη) οδηγεί σε βελτίωση της ικανότητας αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων έως και κατά δύο κατηγορίες. Για την πυριτική παιπάλη, ενώ επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση κατά την πρώτη ενσωμάτωση, οι τιμές του συντελεστή παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση για τη μεταβολή του λόγου  $sf/b$  χωρίς να βελτιώνεται θεαματικά την ικανότητα αντίστασης για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης. Αντίθετα, πιο σαφής είναι η βελτίωση για υψηλότερα ποσοστά  $mk/b$  ή  $mk/\{mk+lp\}$ . Σημαντικό εύρημα αποτελεί η διαπίστωση ότι ανεξαρτήτως του υλικού που αντικαθίσταται, τσιμέντο ή ασβεστολιθικό φίλερ, η προσθήκη μετακαολίνη στο μίγμα έχει παρεμφερή επιρροή στον συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων.

Από τη σύγκριση μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ κοινής κοκκομετρίας και λόγου  $w/b$  παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ αυξάνει το συντελεστή μεταφοράς κατά 20 %, χωρίς πάντως να μεταβάλλεται η κατηγορία αντίστασης σε

διείσδυση χλωριόντων. Ίδιος συντελεστής επιτυγχάνεται για μείωση του λόγου  $w/b$  στα μίγματα ΑΣΣ με ενσωμάτωση ασβεστολιθικού φίλερ κατά περίπου 5 έως 10 %, εν σχέσει προς τα μίγματα ΣΣ χωρίς ασβεστολιθικό φίλερ.

Η εφαρμογή παραλλαγμένων συνθηκών πειράματος (εφαρμοζόμενη τάση, συγκέντρωση διαλύματος καθόδου, διάρκεια) στην πρότυπη μέθοδο [NordTest Build 492 \(1999\)](#) και, ειδικότερα, ταυτόσημων με τις αντίστοιχες συνθήκες πειράματος της πρότυπης μεθόδου [ASTM C 1202 \(2009\)](#), οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερο διερχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διάρκεια του πειράματος, με αποτέλεσμα υψηλότερα ή ίσα βάθη διείσδυσης χλωριόντων για τις διάφορες συνθέσεις και, συνεπώς, υψηλότερους συντελεστές μεταφοράς χλωριόντων. Ως εκ τούτου, η παραλλαγμένη μέθοδος οδηγεί σε πιο συντηρητική κατάταξη των μιγμάτων, η οποία πάντως δε διαφέρει περισσότερο από μία κατηγορία. Η διαφορά μεταξύ των συντελεστών μεταφοράς χλωριόντων της πρότυπης και της παραλλαγμένης μεθόδου είναι πρακτικώς σταθερή, αν και εμφανίζει μια ήπια αύξηση για πιο διαπερατά σκυροδέματα. Η επιρροή των μεταβολών  $w/b$  και  $sf/b$  στο συντελεστή χλωριόντων είναι παρόμοια (μειωμένος συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων για χαμηλότερους λόγους  $w/b$  και υψηλότερους λόγους  $sf/b$ ), ανεξαρτήτως της μεθόδου που εφαρμόζεται, αν και πάλι η παραλλαγμένη μέθοδος δίδει πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Πάντως, μία μεταβολή των ορίων κατάταξης στην παραλλαγμένη μέθοδο θα μπορούσε να οδηγήσει σε παρεμφερή αποτελέσματα κατάταξης σκυροδεμάτων. Τα παραπάνω συνεπάγονται ότι με τις προτεινόμενες παραλλαγές των συνθηκών πειράματος, η προκύπτουσα παραλλαγμένη μέθοδος μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη και ταχύτερη εναλλακτική μέθοδο εκτίμησης της ικανότητας αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων.

Τέλος, από τη διεργαστηριακή διερεύνηση παρεμφερών μιγμάτων, προέκυψε ότι ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων και το ηλεκτρικό φορτίο, όπως υπολογίζονται από τις πρότυπες μεθόδους [NordTest Build 492 \(1999\)](#) και [ASTM C 1202 \(2009\)](#), αντίστοιχα, συσχετίζονται πολύ καλά. Τα μίγματα κατατάσσονται σε παρεμφερείς κατηγορίες κατάταξης, ενώ αποκλίνουν ελαφρώς για περισσότερο αδιαπέρατα σκυροδέματα.

#### 5.6.2.2. Ειδική αντίσταση σκυροδέματος

Για το σύνολο των μιγμάτων, η συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων και της ειδικής αντίστασης είναι πολύ καλή, γεγονός που εξυπηρετεί στην ταχεία εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μέσω της στιγμιαίας μέτρησης της ειδικής αντίστασης. Η συσχέτιση φαίνεται να είναι ελαφρώς πιο αξιόπιστη για την περίπτωση των μιγμάτων ΣΣ.

Στο σύνολο των μιγμάτων που παρασκευάστηκαν και διερευνήθηκαν, η ειδική αντίσταση δε φαίνεται να συσχετίζεται με κάποια συγκεκριμένη αναλογία συστατικών της σύνθεσης ή με τη μέση θλιπτική αντοχή. Στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής, αποδείχτηκε ότι η εκτίμηση της ειδικής αντίστασης σε ηλικία 28 ημερών είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των συστατικών ή τις απόλυτες τιμές τους στο μίγμα. Οι γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.2.2). Σημειώνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών, με βάση τις παραπάνω γραμμικές σχέσεις, είναι οριακώς ικανοποιητικοί ( $R^2 \approx 0.50$ ). Εκτιμάται,

πάντως, ότι περαιτέρω στοχευμένη έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα πιο ασφαλείς σχέσεις εκτίμησης της ειδικής αντίστασης σκυροδέματος.

Η εκτίμηση της ειδικής αντίστασης σε ηλικία 28 ημερών φαίνεται να είναι δυνατή, συνδυάζοντας γραμμικά τις επιμέρους αναλογίες των κυμαινόμενων λόγων ( $w/b$ ,  $sf/b$ ,  $mk/b$ ,  $mk/\{mk+lp\}$ ). Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί παρατηρήθηκε σχετικά μεγάλη διασπορά μεταξύ των εκτιμώμενων μέσω γραμμικών σχέσεων τιμών και των πειραματικών τιμών ( $R^2 < 0.50$ ). Οι γραμμικές σχέσεις που προέκυψαν μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.2.2.2).

Ξεχωριστά για κάθε εξετασθείσα υπο-ομάδα συνθέσεων, η ειδική αντίσταση σε ηλικία 28 ημερών παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης επιτυγχάνονται για χαμηλότερους λόγους  $w/b$  και υψηλότερους λόγους  $sf/b$ ,  $mk/b$  και  $mk/\{mk+lp\}$  σε μίγματα ΑΣΣ. Η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών είναι γραμμική. Η βελτίωση στην κατηγορία ρυθμού διάβρωσης κυμαίνεται από μία έως δύο, με την μικρότερη επιρροή να συναντάται στην περίπτωση αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από μετακαολίνη και την υψηλότερη επιρροή στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από πυριτική παιπάλη, ιδιαίτερα για υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης. Στα μίγματα ΣΣ, η μεταβολή του λόγου  $pce/b$  δεν οδηγεί σε ουσιαστική μεταβολή της ειδικής αντίστασης, αν και παρατηρείται μια εξαιρετικά ήπια αύξηση συναρτήσει του λόγου  $pce/b$ .

Γενικώς, η ειδική αντίσταση φαίνεται να μπορεί να προβλεφθεί σε ηλικία 28 ημερών σε μίγματα ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $w/b$  ή  $sf/b$  ή  $mk/\{mk+lp\}$  και σε μίγματα ΣΣ μεταβλητού λόγου  $pce/b$  με σταθερή αναλογία των υπόλοιπων συστατικών. Για την περίπτωση μιγμάτων ΑΣΣ μεταβλητού λόγου  $mk/b$  δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη συσχέτιση.

Από τη σύγκριση μιγμάτων ΑΣΣ και ΣΣ κοινής κοκκομετρίας και λόγου  $w/b$ , παρατηρείται ότι η ειδική αντίσταση είναι ελαφρώς μικρότερη στην περίπτωση του ΑΣΣ, αν και όλα τα μίγματα βρίσκονται, κατά κανόνα, στην ίδια κατηγορία ρυθμού διάβρωσης κατά [ACI 222R \(2001\)](#).

---

## **Βιβλιογραφία**

## Πρότυπα & Κανονισμοί

1. AASHTO T 259. Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA. 1980.
2. AASHTO T 277. Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC, USA. 2007.
3. ACI 116R. Cement and Concrete Terminology. American Concrete Institute. 2005.
4. ACI 201.2R. Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute. 2008.
5. ACI 222.1. Provisional Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Available for Corrosion of Embedded Steel in Mortar and Concrete Using the Soxhlet Extractor. American Concrete Institute. 1996.
6. ACI 222R. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Concrete Institute. 2010.
7. ACI 234R. Guide for the Use of Silica Fume in Concrete. American Concrete Institute. 2006.
8. ACI 237R. Self-Consolidating Concrete. American Concrete Institute. 2007.
9. ACI 318/ 318R. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (318R),. American Concrete Institute. Farmington Hills, Mich, USA. 2008.
10. ACI 363R. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. American Concrete Institute. Detroit, 1992. (reapproved 1997).
11. ACI 408R-03. Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension. American Concrete Institute. USA. 2003.
12. ASTM C 138. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. 2001.
13. ASTM C 403. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. 1999.
14. ASTM C 642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. 1997.
15. ASTM C 1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2009.
16. ASTM C 1218/C 1218M. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. 2008.
17. ASTM C 1240-03a. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM International. 2003.
18. ASTM C 1543. Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding. 2002.
19. ASTM C 1610/ 1610M. Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique. 2010.
20. ASTM C 1611/ 1611M. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. 2009.
21. ASTM C 1621/ 1621M. Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring. 2009.
22. ASTM C 1712. Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self Consolidating Concrete Using Penetration Test. 2009.
23. CEB-FIP MC 2010. fib Bulletin No. 56. FIB Model Code 2010. First complete draft, Volume 1 (chapters 1-6), 318 \_pages, fib Bulletin 55, 2010. ISBN 978-2-88394-95-6. Model Code 2010. First complete draft, Volume 1 (chapters 1-6), 318 \_pages, fib Bulletin 55, 2010. ISBN 978-2-88394-95-6.
24. CEB-FIP MC 90. Committee Euro-International du Beton, CEB-FIB model code 1990, Thomas Telford, London, 1993.
25. DIN 1048-5. Prüfverfahren für Beton - Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Deutsches Institut für Normung. 1991.
26. ECD 86/188/EEC: European Council Directive 188/EEC - Protection of workers from the risks related to exposure to noise at work. May 12, 1986.
27. ECD 89/106/EEC: European Council Directive - Approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products. December 21, 1988.

28. EHE, Spanish code for structural concrete [in Spanish]. Real Decreto 2661/1998, Madrid; December 11, 1998.
29. EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. European Committee for Standardization. 2000.
30. EN 206. Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization. 2013.
31. EN 206-1. Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization. 2000.
32. EN 206-9. Concrete - Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC). European Committee for Standardization. 2009.
33. EN 450. Fly ash for concrete. European Committee for Standardization. 2012
34. EN 934-2. Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures. Definitions, requirements, conformity, marking and labeling. European Committee for Standardization. 2009.
35. EN 1008. Mixing water for concrete. 2002.
36. EN 1097- 6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. European Committee for Standardization. 2000.
37. EN 1992-1-1. Design of concrete structures, Part.1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. 2004.
38. EN 10080. Steel for the reinforcement of concrete. European Committee for Standardization. 2005.
39. EN 12350- 2. Testing fresh concrete - Part 2: Slump Test. European Committee for Standardization. 2009.
40. EN 12350- 8. Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test. European Committee for Standardization. 2010.
41. EN 12350- 9. Testing fresh concrete Part 9: Self-compacting concrete - V-funnel test. European Committee for Standardization. 2010.
42. EN 12350-10. Testing fresh concrete Part 10: Self-compacting concrete - L-box test. European Committee for Standardization. 2010.
43. EN 12350-11. Testing fresh concrete - Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test. European Committee for Standardization. 2011.
44. EN 12350-12. Testing fresh concrete Part 12: Self-compacting concrete - J-Ring test. European Committee for Standardization. 2010.
45. EN 12390- 2. Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests. European Committee for Standardization. 2009.
46. EN 12390- 3. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. European Committee for Standardization. 2009.
47. EN 12390- 4. Testing hardened concrete - Part 4: Compressive strength. Specification for testing machines. European Committee for Standardization. 2009.
48. EN 12390- 5. Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens. European Committee for Standardization. 2009.
49. EN 12390- 6. Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. European Committee for Standardization. 2009.
50. EN 12390- 8. Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure. 2009.
51. EN 12620. Aggregates for concrete. European Committee for Standardization. 2013.
52. EN 12878. Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime. Specifications and methods of test. European Committee for Standardization. 2005.
53. EN 13263- 1:2005 +A1:2009. Silica fume for concrete - Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria. European Committee for Standardization. 2005 / 2009.
54. EN 13263- 2:2005 +A1:2009. Silica fume for concrete - Part 2: Conformity evaluation. European Committee for Standardization. 2005 / 2009.
55. EN 13670. Execution of concrete structures; . European Committee for Standardization. 2009.
56. EN 15167. Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout. Definitions, specifications and conformity criteria. European Committee for Standardization. 2006.
57. ISO 5725-1. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions. 1994.
58. ISO 9001. Quality management systems - Requirements. 2008

59. NBR 6118. Brazilian association of technical standards NBR 6118: design of concrete structures [in Portuguese]. Rio de Janeiro. 2003.
60. NT Build 355. Concrete, mortar and cement based repair materials: Chloride diffusion coefficient from migration cell experiments. Nordtest, Finland. 1997.
61. NT Build 443. Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration. Nordtest, Finland. 1995.
62. NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment. Nordtest, Finland. 1999.
63. ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 (ΦΕΚ221.Β.2012). Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. 2009.
64. ΚΤΧ-08. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, Γ.Γ.Δ.Ε, Γ.Δ.Π.Δ.Ε, Κ.Ε.Δ.Ε., 2008.
65. ΣΚ-313. Μέθοδος Ελέγχου Προσδιορισμός του Χρόνου Πήξεως Σκυροδέματος. 1980.

## Οδηγίες

1. ACBM. Self Consolidating Concrete: A White Paper by Researchers at The Center of Advanced Cement Based Materials. Ed. D.A. Lange. 2007.
2. ACI E3-01. Education Bulletin: Cementitious Materials For Concrete. American Concrete Institute. 2001.
3. APMC. Final Report of European Research Project: Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete (TESTING-SCC). ACM Centre, University of Paisley, UK. 2005.
4. Advanced Cement Technologies (ACT), LLC, Concrete Permeability, Technical Bulletin. 2001.
5. CS TR No 62. Concrete Society Technical Report No. 62: Self-compacting Concrete - A Review. ISBN 1904482 19 8. 2005.
6. EFNARC, BIBM, CEMBUREAU, EFCA, ERMCO. European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. 2005.
7. EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. 2002.
8. FHWA-IF-05-016. Silica fume user's manual. Silica Fume Association. US Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2005. <http://www.silicafume.org>
9. fib Bulletin No. 10. Bond of reinforcement in concrete: state-of-art report, CEB-FIP, Lausanne, Switzerland. 2000.
10. GWT-4000. Germann Instruments A/S. GWT-4000: Instruction and Maintenance Manual. 1999.
11. JSCE N. 15. State of the Art-Report on Self-Compacting Concrete, Concrete Engineering Series, n. 15. Japan Society of Civil Engineers. 1996.
12. JSCE N. 93. Recommendation for practical application of self-compacting concrete, Concrete Library, n. 93. Japan Society of Civil Engineers. 1998.
13. PCI TR-6-03. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants (TR-6-03), Precast/Prestressed Concrete Institute. USA. 2003.
14. RILEM Report 23. Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report. 2000.
15. RILEM Report 35. Casting of Self Compacting Concrete. 2006.
16. RILEM Report 38. Durability of Self-Compacting Concrete. 2007.
17. RILEM State-of-the-Art Report. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS. Khayat, K. and De Schutter, G. (Eds.). 2014.
18. RILEM TC. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, RC 6 Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-out Test, 1983, E & FN SpoN; 1994; 218-220.
19. ΣΠΜΕ – Τ.Ο. 5. Τεχνική Οδηγία Νο. 5: Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος. 2014. ISBN: 978-960-99996-5-6 (συλλογικό έργο Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος: Σακελλαρίου Α, Ζέρης Χ, Μαρσέλλος Ν, Βογιατζής Χ, Ζυγούρης Ν, Μπαρδάκης Β, Παπανικολάου Κ, Πιττός Γ, Σφήκας Ι.)

## Βιβλία

1. Advanced Concrete Technology Set. *Advanced Concrete Technology 1: Constituent Materials*. 1st Edition. Ed. J Newman & BS Choo, Butterworth-Heinemann. Elsevier, 2003. ISBN-10: 0-7506-5103-2. 224 p.
2. Aitcin PC. *Binders for Durable and Sustainable Concrete*. Taylor & Francis, London and New York. 2008. ISBN-10: 0-4153-8588-1. 528 p.



3. Broomfield JP. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*. 2nd Edition. CRC Press. 2006. ISBN-10: 0-4153-3404-7. 296 p.
4. Concrete Admixtures Handbook. *Properties, Science, and Technology*. 2nd Edition. Ed. VS Ramachandran. Noyes Publications. Park Ridge, New Jersey, USA. 1995. ISBN-10: 0-8155-1373-9. 1183 p.
5. Gjorv OE. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. CRC Press. 2009. ISBN-10: 0-4154-1408-3. 232 p.
6. Nawy EG. *Fundamentals of high strength high performance concrete*. Harlow: Longman Pub Group. 1996. ISBN-10: 0-4713-8555-7. 464 p.
7. Neville AM. *Properties of concrete*. 4th and Final Edition. Pearson Education Limited. 2004. ISBN-10: 0-2737-5580-3. 846 p.
8. Okamura H, Maekawa K, Ozawa K. *High Performance Concrete*. Gihodo Publishing. 1993.
9. Ramachandran VS, Beaudoin JJ. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, Techniques, and Applications*. Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC. Norwich, New York, USA. 2001. ISBN: 0-8155-1437-9.
10. Siddique R, Khan M.I. *Supplementary Cementing Materials*. Engineering Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN-10: 3-6421-7865-0. 350 p.
11. Σιδερης Κ. *Ανθεκτικότητα Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος*. Τεκδοτική, ΣΕΛΚΑ - 4Μ ΕΠΕ. 2010. ISBN: 978-960-8257-60-3.

### Άρθρα σε Επιστημονικά Περιοδικά

1. Abadjiev P, Panayotov K, Petrov SI. Influence of condensed silica fume as admixture to concrete on the bond to the reinforcement. *Construction & Building Materials* 1993;7(1):41-44.
2. Ahmad SH, Shah SP. Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete. *PCI Journal* 1985;30(6):92-119.
3. Almeida Filho FM, Barragán BE, Casas JR, El Debs ALHC. Hardened properties of self-compacting concrete — A statistical approach. *Construction & Building Materials* 2010;24:1608-1615. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2010.02.032](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.032)
4. Almeida Filho FM, Barragán BE, Casas JR, El Debs ALHC. Variability of the bond and mechanical properties of self-compacting concrete. *IBRACoN Structures and Materials Journal* 2008;1(1):31-57.
5. Almeida Filho FM, El Debs MK, El Debs ALHC. Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests. *Materials and Structures* 2008a; 41:1073-1089.
6. Anagnostopoulos N, Sideris KK, Georgiadis A. Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures. *Materials and Structures* 2009;42:1393-1405. doi: [10.1617/s11527-008-9459-6](https://doi.org/10.1617/s11527-008-9459-6)
7. Aslani F, Nejadi S. Bond Behavior of Reinforcement in Conventional and Self-Compacting Concrete. *Advanced Structural Engineering - An International Journal* 2012a;15(12):2033-2051.
8. Aslani F, Nejadi S. Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study. *Construction & Building Materials* 2012b;36:330-347. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.04.034](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.034).
9. Assié S, Escadeillas G, Waller V. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. *Construction & Building Materials* 2007;21:1909-1917. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034)
10. Audenaert K, Yuan Q, De Schutter G. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. *Construction & Building Materials* 2010;24:396-402. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2009.07.003](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.07.003)
11. Badogiannis E, Kakali G, Dimopoulou G, Chaniotakis E, Tsivilis S. Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. *Cement & Concrete Composites* 2005;27:197-203.
12. Badogiannis E, Papadakis VG, Chaniotakis E, Tsivilis S. Exploitation of poor Greek kaolins: Strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value. *Cement & Concrete Research* 2004;34:1035-1041.
13. Badogiannis E, Tsivilis S. Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Composites* 2009;31:128-133.
14. Bamonte P, Gambarova PG. A study on the mechanical properties of self-compacting concrete at high temperature and after cooling. *Materials and Structures* 2012;45:1375-1387. doi: [10.1617/s11527-012-9839-9](https://doi.org/10.1617/s11527-012-9839-9)

15. Boel V, Audenaert K, De Schutter G, Heirman G, Vandewalle L, Desmet B, Vantomme J. Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash. *Materials and Structures* 2007;40:507-516. doi:10.1617/s11527-006-9159-z
16. Brooks JJ, Megat Johari MA. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement & Concrete Composites* 2001;23:495-502.
17. Brower L, Ferraris C. Comparison of Rheometers, *Concrete International* 2003;25(8):41-47.
18. Cairns J, Plizzari GA. Towards a harmonized European bond test. *Materials and Structures* 2003;36:498-506.
19. Castel A, Vidal T, Viriyametanont K, François R. Effect of Reinforcing Bar Orientation and Location on Bond with Self-Consolidating Concrete. *ACI Structural Journal* 2006;103(4):559-567.
20. Chan Y-W, Chen Y-G, Liu Y-S. Effect of Consolidation on Bond of Reinforcement in Concrete of Different Workabilities. *ACI Materials Journal* July-August 2003;100(4).
21. Chan Y-W, Chen Y-S, Liu Y-S. Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete. *ACI Structural Journal* 2003;100(4):490-498.
22. D'Ambrosia MD, Lange DA. Self-Consolidating Concrete: The Good, the Bad and the Ugly. *Structure Magazine* 2007;48-50.
23. Daoud A, Lorrain M, Elgonnoui M. Pull-out behaviour of reinforcement embedded in self-compacting concrete (in French). *Materials and Structures* 2002;35:395-401.
24. De Oliveira L.A.P, De Castro Gomes J.P, Pereira C.N.G. Study of sorptivity of self-compacting concrete with mineral additives. *Journal of Civil Engineering and Management* 2006;12(3):215-220.
25. Desnerck P, De Schutter G, Taerwe L. Bond behaviour of reinforcing bars in self-compacting concrete: experimental determination by using beam tests. *Materials and Structures* 2010b;43:53-62.
26. Dinakar P, Babu KG, Santhanam M. Mechanical properties of high-volume fly ash self-compacting concrete mixtures. *Structural Concrete* 2008;9(2):109-16.
27. Ding JT, Li Z. Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete, *ACI Materials Journal* Jul-Aug. 2002;99(4):393-398.
28. Domone PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites* 2007;29:1-12.
29. Dunham MR, Rush AS, Hanson JH. Effects of Induced Vibrations on Early Age Concrete. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2007;21(3):179-184.
30. Domone PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites* 2007;29:1-12.
31. Esfahani MR, Lachemi M, Kianoush MR. Top-bar effect of steel bars in self-consolidating concrete. *Cement & Concrete Composites* 2008;30:52-60.
32. Ezeldin A, Balaguru P. Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal* 1989;86(5):515-524.
33. Fares H, Noumowe A, Remond S. Self-consolidating concrete subjected to high temperature: Mechanical and physicochemical properties. *Cement & Concrete Research* 2009;39:1230-1238. doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.001
34. Fares H, Remond S, Noumowe A, Cousture A. High temperature behaviour of self-consolidating concrete: Microstructure and physicochemical properties. *Cement & Concrete Research* 2010;40:488-496. doi:10.1016/j.cemconres.2009.10.006
35. Felekoglu B, Türkel S, Baradan B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment* 2007;42(4):1795-1802.
36. Ferraris C. Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. *Journal of Research of NIST* 1999;104(5):461-478.
37. Foroughi A, Dilmaghani S, Famili H. Bond strength of reinforcement steel in self-compacting concrete. *International Journal of Civil Engineering* 2008;6(1):24-33.
38. Gjörv OE, Monteiro PJM, Mehta PK. Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond. *ACI Materials Journal* 1990;87(6):573-580.
39. Güneyisi E, Gesoğlu M, Mermerdaş K. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. *Materials and Structures* 2008;41:937-949. doi: 10.1617/s11527-007-9296-z
40. Güneyisi E, Gesoğlu M, Özturan T, Özbay E. Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age. *Construction & Building Materials* 2009;23:469-481.

41. Güneyisi E, Mermerdaş K. Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin. *Materials and Structures* 2007;40:1161-1171. doi:10.1617/s11527-007-9258-5
42. Hall C, Tse TKM. Water Movement in Porous Building Materials - VII. The Sorptivity of Mortars. *Building and Environment* 1986;21(2):113-118.
43. Hall C, Yau MHR. Water Movement in Porous Building Materials - IX. The Water Absorption and Sorptivity of Concretes. *Building and Environment* 1987;22(1):77-82.
44. Harajli MH, Hout M, Jalkh W. Local bond stress-slip behaviour of reinforcing bars embedded in plain and fibre concrete, *ACI Materials Journal* 1995;92(4):343-353.
45. Harajli MH. Development/splice strength of reinforcing bars embedded in plain and fiber reinforced concrete. *ACI Structural Journal* 1994;91(5):511-520.
46. Hassan AAA, Hossain KMA, Lachemi M. Bond strength of deformed bars in large reinforced concrete members cast with industrial self-consolidating concrete mixture. *Construction & Building Materials* 2010a;24:520-530.
47. Hassan AAA, Lachemi M, Hossain KMA.. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement & Concrete Composites* 2012a;34(6):801-807. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013
48. Hausmann DA. Steel corrosion in concrete. How does it occur? *Journal of Materials Protection* 1967;19-23.
49. Hedegaard S, Hansen T. Water permeability of fly ash concretes. *Materials and Structures* 1992;25:381-387.
50. Helincks P, Boel V, De Corte W, De Schutter G, Desnerck P. Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity. *Engineering Structures* 2013;48:121-132. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.08.035
51. Hertz KD. Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures. *ACI Materials Journal* 1992;89(4):345-347.
52. Hossain KMA, Lachemi M. Bond Behavior of Self-Consolidating Concrete with Mineral and Chemical Admixtures. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 2008;20(9):608-616.
53. Hueste M.B.D, Chompreda P, Trejo D, Cline DBH, Keating PB. Mechanical properties of high-strength concrete for prestressed members. *ACI Structural Journal* 2004;101(4):457-465.
54. Hulshizer AJ. Acceptable Shock and Vibration Limits for Freshly Placed and Maturing Concrete, *ACI Materials Journal* 1996;93(6):1-10.
55. Kanellopoulos A, Petrou M.F, Ioannou I. Durability performance of self-compacting concrete. *Construction & Building Materials* 2012;37:320-325.
56. Khan MI, Siddique R. Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling* 2011;57:30-35. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.09.016
57. Khayat KH, Manai K, Trudel A. In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal* 1997;94(6):491-500.
58. Kwan AKH, Zheng W, Ng IYT. Effects of Shock Vibration on Concrete, *ACI Materials Journal* 2005;102(6):405-413.
59. Leemann A, Münch B, Gasser P, Holzer L. Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete. *Cement and Concrete Research* 2006;36:1425-1433.
60. Li Z, Ding Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cement & Concrete Research* 2003;33:579-584.
61. Madandoust R, Mousavi SY. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction & Building Materials* 2012;35:752-760. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109
62. Melo KA, Carneiro AMP. Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. *Construction & Building Materials* 2010;24:1529-1535.
63. Mohamed HA. Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. *Ain Shams Engineering Journal* 2011;2:79-86. doi:10.1016/j.asej.2011.06.001
64. Nehdi M, Pardhanb M, Koshowskic S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. *Cement and Concrete Research* 34 2004;34:2103-2112.
65. Nunes S, Figueiras H, Sousa Coutinho J, Figueiras J. SCC and conventional concrete on site: Property assessment (Caracterização das propriedades do betão em elementos produzidos com BAC e betão convencional), *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2009;2(1):25-36.
66. Oh BH, Kim SH. Realistic Models for Local Bond Stress-slip of Reinforced Concrete under Repeated Loading. *Journal of Structural Engineering* 2007;133(2):216-224.

67. Okamura H, Ouchi M. Self-Compacting Concrete (Invited Paper). *Journal of Advanced Concrete Technology* 2003;1(1):5-15.
68. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* 1992;7:1564-1579.
69. Olokun FA. Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete. *ACI Materials Journal* 1991;88(3):32-39.
70. Oragun CO, Jirsa JO, Breen JE. A reevaluation of test data on development length and splices. *ACI Journal* 1977;74(3):114-122.
71. Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of the AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *Construction & Building Materials* 1993;7(4).
72. Papadakis VG. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement & Concrete Research* 2000;30.
73. Parra C, Valcuende M, Gómez F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction & Building Materials* 2011;25:201-207. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037
74. Persson B. Chloride migration coefficient of self-compacting concrete. *Materials and Structures* 2004b;37:82-91.
75. Persson B. Fire resistance of self-compacting concrete, SCC. *Materials and Structures* 2004a;37:575-584.
76. Poon CS, Kou SC, Lam L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction & Building Materials* 2006;20:858-865.
77. Pop I, De Schutter G, Desnerck P, Onet T. Bond between powder type self-compacting concrete and steel reinforcement. *Construction & Building Materials* 2013;41:824-833. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.029
78. Qian X, Li Z. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research* 2001;31:1607-1611.
79. Ramezani-pour AA, Bahrami Jovein H. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction & Building Materials* 2012;30:470-479.
80. Rashad AM. A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. *Construction & Building Materials* 2013;44:487-495.
81. Reda Taha MM, El-Dieb AS, Shrive NG. Sorptivity: a reliable measurement for surface absorption of masonry brick units. *Materials and Structures* 2001;34:438-445.
82. Reinhardt HW, Stegmaier M. Self-Consolidating Concrete in Fire. *ACI Materials Journal* 2006;103(2).
83. RILEM TC 116-PCD. RILEM Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete. *Materials and Structures* 1999;32(4):178-179.
84. RILEM TC 178-TMC. RILEM Technical Recommendation: Testing and Modelling Chloride Penetration In Concrete: Analysis of total chloride content in concrete. *Materials and Structures*, 2002;35:583-585.
85. RILEM TC 205-DSC. Final report of RILEM Technical Committee 205-DSC: Durability of self-compacting concrete. *Materials and Structures* 2008;41:225-233. doi: 10.1617/s11527-007-9319-9
86. Romer M. Recommendation of RILEM TC 189-NEC: Non-destructive evaluation of the concrete cover. *Materials and Structures* 2005;38:895-906.
87. Ruiz M, Muttoni A, Gambarova P. Analytical Modeling of the Pre- and Postyield Behavior of Bond in Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering* 2007;133(10):1364-1372.
88. Russell HG. ASTM Test Method for Static Segregation Resistance of SelfConsolidating Concrete Inc. *HPC Brige Views* 2010;60.
89. Sabir BB, Wild S, Bai J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement & Concrete Composites* 2001;23:441-454.
90. Sfikas IP, Badogiannis EG, Trezos KG. Rheology and mechanical characteristics of Self-Compacting Concrete mixtures containing Metakaolin. *Construction & Building Materials* 2014;64:121-129. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.048

91. Sfikas IP, Kanellopoulos A, Trezos KG, Petrou MF. Durability of similar Self-Compacting Concrete batches produced in two different EU Laboratories. *Construction & Building Materials* 2013a;40:207-216. doi: 0.1016/j.conbuildmat.2012.09.100
92. Sfikas IP, Trezos KG. Effect of composition variations on bond properties of Self-Compacting Concrete specimens. *Construction & Building Materials* 2013;41:252-262. 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.094
93. Siddique R, Klaus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science* 2009;43:392-400.
94. Sideris KK. Mechanical characteristics of self-consolidating concretes exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials In Civil Engineering*. 2007;19(8):648-654.
95. Sideris KK, Manita P. Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures. *Construction & Building Materials* 2013;41:296-302. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.093
96. Sirivivatnanon V, Khatri RP. Characterising chloride penetration resistance of concrete. *Durability of Building Materials and Components* 1999;8(1):386-397.
97. Song HW, Pack SW, Nam SH, Jang JC, Saraswathy V. Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. *Construction & Building Materials* 2010;24:315-321.
98. Söylev TA, François R. Effects of bar-placement conditions on steel-concrete bond. *Materials and Structures* 2006;39:211-220.
99. Sukumar B, Nagamani K, Raghavan RS. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction & Building Materials* 2008;22:1394-1401.
100. Tang L, Nilsson L-O. Chloride Diffusivity in High Strength Concrete. *Nordic Concrete Research* 1991;162-170.
101. Topçu B.I, Uygunoğlu T. Effect of aggregate type on properties of hardened selfconsolidating lightweight concrete (SCLC). *Construction & Building Materials* 2010;24:1286-1295.
102. Trezos KG, Sfikas IP, Pasiog CG. Influence of water-to-binder ratio on top-bar effect and bond variation across length in Self-Compacting Concrete specimens, *Cement & Concrete Composites* 2014;48:127-139. 2014. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.012
103. Uysal M, Yilmaz K, Ipek M. The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. *Construction & Building Materials* 2012;27:263-270.
104. Uysal M. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. *Construction & Building Materials* 2012;26:701-706. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.077
105. Valcuende M, Parra C, Balasch S. A discussion of the paper “Top-bar effect of steel bars in self-consolidating concrete (SCC) by M. Reza Esfahani, M. Lachemi, M. Reza Kianoush. *Cement & Concrete Composites* 2008;30:1020.
106. Valcuende M, Parra C. Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes. *Construction and Building Materials* 2009;23:162-170.
107. Vilanova A, Fernandez-Gomez J, Landsberger GA. Evaluation of the mechanical properties of self compacting concrete using current estimating models - Estimating the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture of selfcompacting concrete. *Construction & Building Materials* 2011;25:3417-3426. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.033
108. Wilson MA, Carter MA, Hoff WD. British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. *Materials and Structures* 1999;32:571-578.
109. Wong S, Wee T, Swaddiwudhipong S, Lee S. Study of water movement in concrete. *Magazine of Concrete Research* 2001;53:205-220.
110. Yerlici VA, Özturan T. Factors Affecting Anchorage Bond Strength in High-Performance Concrete. *ACI Structural Journal* 2000;499-507.
111. Zhu W, Bartos PJM. Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 2003;33:921-926.
112. Zhu W, Sonebi M, Bartos PJM. Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete. *Materials and Structures* 2004;37:442-448.
113. Παπανικολάου Κ. Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα: Μία Καινοφανής Τεχνολογία. *Σκυρόδεμα* 2006;2.
114. Σακελλαρίου Α. Ευρωπαϊκό Πρότυπο Σκυροδέματος EN 206-1: Μια νέα Αντίληψη για το σκυρόδεμα. *Σκυρόδεμα & Χάλυβας* 2008.

## Ανακοινώσεις σε Συνέδρια & Ημερίδες

1. Audenaert K, Boel V, De Schutter G. *Chloride Migration in Self Compacting Concrete*. 5th International Conference ConSec'07. Tours, France. June 4-6, 2007.
2. Audenaert K, Boel V, De Schutter G. *Chloride penetration in self compacting concrete by cyclic immersion*. 1st International Symposium On Design, Performance And Use Of Self-Consolidating Concrete. 2005. p.355-362.
3. Audenaert K, De Schutter G. *Chloride penetration in self compacting concrete*. 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik, Iceland. August 17-20, 2003. pp. 818-825.
4. Audenaert K, De Schutter G. *Water permeability of self compacting concrete*. International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur, Editor(s): J. Weiss, K. Kovler, J. Marchand, and S. Mindess, RILEM Publications SARL. 2004. doi: [10.1617/2912143926.076](https://doi.org/10.1617/2912143926.076)
5. Bache HH. *Densified Cement/Ultra-Fine Particle-Based Materials*. 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Ontario, Canada. 1981.
6. Badogiannis EG, Trezos KG, Sfikas IP. *Thermal profile of Self-Compacting Concrete mixtures incorporating metakaolin*. 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete. Paris, France. Sept 2-4, 2013.
7. Boel V, Helinckx P, Desnerck P, De Schutter G. *Bond behaviour and Shear Capacity of Self-Compacting Concrete*. In Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. Proceedings of SCC2010 RILEM Conference (Eds K.H. Khayat and D. Feys). Montreal, Canada. September 26-29, 2010. Springer, New York 2010;355-366.
8. Bui VK, Montgomery DG, Hinczak I, Turner, K. *Rapid Testing Methods for Segregation Resistance and Filling Ability of Self-Compacting Concrete*. Advances in Concrete Technology. Proceedings of the 4th CANMET/ACI/JCI International Conference, SP-179 (Ed. V. M. Malhotra). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 1998. pp. 85-103.
9. Bui VK, Shah SP. *Rapid Methods for Testing Quality of Fresh Self-Consolidating Concrete*. 1st North American Conference on the Design and Use of SCC, Chicago, Illinois. November 12-13, 2002. pp. 311-316.
10. Cussigh F, Sonebi M, De Schutter G. *Segregation Measurement on Fresh Self-Compacting Concrete*. Proceedings of the 3rd International Symposium on SCC, Reykjavik, Iceland, August 2003.
11. Daczko JA, Kurtz MA. *Development of High-Volume Coarse Aggregate Self-Compacting Concrete*. Proceedings of the 2nd International Symposium on SCC, Oct. 23-25, 2001. Tokyo, Japan.
12. Desnerck P, De Schutter G, Taerwe L. *A local bond stress-slip model for reinforcing bars in self-compacting concrete*. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures- B. H. Oh, et al. (eds), Korea Concrete Institute, Seoul, 2010a. ISBN 978-89-5708-181-5.
13. Gagne R, Pigeon M, Aïtcin PC. *Deicer salt scaling resistance of high performance concrete*. Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, SP-122, ACI. 1989.
14. Gibbs JC, Zhu W. *Strength of Hardened Self-Compacting Concrete*. Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, 1999;199-209.
15. Hassan AAA, Lachemi M, Hossain KMA. *Effect of Metakaolin on the Rheology of Self-Consolidating Concrete*, In Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete (Eds: K.H. Khayat and D. Feys), RILEM Bookseries 1, 2010. doi: [10.1007/978-90-481-9664-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9664-7_9)
16. Heirman G, Vandewalle L, Boel V, Audenaert K, De Schutter G, D'Hemricourt J, Desmet B, Vantomme J. *Chloride penetration and carbonation in selfcompacting concrete*. Proceedings of the Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning. Ed. Kovler K. 2006. RILEM Publications S.A.R.L. ISBN: 2-912143-89-6. pp. 13-23
17. Koning G, Holschemacher K, Dehn, F, Weisse D. *Self-Compacting Concrete Time Development of Material Properties and Bond Behavior*. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, (Eds K. ozawa Ozawa and M. ouchiOuchi), Tokyo. 2001;507-516.
18. Loser R, Leemann A. *Chloride resistance of conventionally vibrated concrete and self-compacting concrete*. 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, September 3-5, 2007.
19. Lorrain M, Daoud A. *Bond in Self-Compacting Concrete*. Bond in Concrete: from Research to Standards, Proceedings of the 3rd International Symposium, Nov. 2002;529-536.

20. Nagataki S, Kawai T, Fujiwara H. *State of the Art Report on SCC in Japan* (Keynote paper), Kamal H. Khayat • Dimitri Feys (Eds.) Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, Volume II, Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, 26-29 September 2010
21. Nilsson L, Ngo MH, Gjörv OE. *High-performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg*. Proceedings Vol. 2, 2nd International Conference on Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading, ed. O.E. Gjörv, K. Sakai and N. Banthia, E & FN Spon, London and New York; 1998;1193-1198.
22. Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M, Okamura H. (1989). *Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*. Proceedings of the 2nd East-Asia & Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), 1, 445-450.
23. Ožbolt J, Lettow S, Kožar I. *Discrete Bond Element for 3D Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*. In Balázs-Bartos-Cairns-Borosnyói (eds), Proceedings of the 3rd International Symposium: Bond in Concrete - from research to standards. Budapest: University of Technology and Economics. 2002.
24. Perumal K, Sundararajan R. *Effect of partial replacement of cement with silica fume on the strength and durability characteristics of high performance concrete*. 29th Conference on Our World In Concrete & Structures: 25 - 26 August 2004, Singapore
25. Roper H, Baweja D. (1991). *Carbonation-Chloride Interactions and their influence on corrosion rates of steel in concretes*. 2nd International Conference on Durability of Concrete. CANMET/ACI, SP 123-11, V.M. Malhotra Editor, Montreal, Canada.
26. Schiessl A, Zilch K. *The Effects of the Modified Composition of SCC on Shear and Bond Behavior*. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, (Eds K. ozawa and M. ouchi), Tokyo, oct. 2001;501-506.
27. Sellevold EJ, Nilsen T. *Condensed Silica Fume in Concrete: A World Review, Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Ed. VM Malhotra. CANMET, Ottawa, Canada, 1987. pp. 165-243.
28. Sellevold EJ, Radjy FF. 1983. *Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete: Water Demand and Strength Development, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete*. Proceedings of the First CANMET/ACI International Conference, SP-79, V. M. Malhotra, ed, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, pp. 677-694.
29. Sfikas I, Kanellopoulos A, Trezos K, Petrou M. *Reproducibility of Self-Compacting Concrete batches between two different EU laboratories*, Proceedings of the fib Symposium: Concrete Structures for Sustainable Community, 11-14 June 2012, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
30. Sfikas IP, Badogiannis EG, Trezos KG. *The effect of silica fume and metakaolin on Self-Compacting Concrete durability*. 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete. Paris, France. Sept 2-4, 2013.
31. Sfikas IP, Kanellopoulos A, Trezos KG, Petrou MF. *Comparison of bond properties of similar Self-Compacting Concrete mixtures cast in two different EU laboratories*, 5th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production. Chicago, IL, USA. May 12-15, 2013.
32. Sfikas IP, Kanellopoulos A, Trezos KG, Petrou MF. *Reproducibility of Self-Compacting Concrete batches between two different EU laboratories*, fib Symposium: Concrete Structures for Sustainable Community. Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, Sweden. June 11-14, 2012.
33. Sfikas IP, Trezos KG. *Impact of water to binder ratio and silica fume content on bond properties of self-compacting concrete cube specimens*, 4th International Symposium: Bond, Anchorage, Detailing (BIC 2012), fib, RILEM. University of Brescia, Italy. June 17-20, 2012.
34. Sonebi M, Bahadoru-Jahromi A, Bartos P. 2003. *Development & Optimisation of Medium Strength Self-Compacting Concrete by Using Pulverised Fly Ash*. Proceedings of the 3rd Symposium on SCC, Reykjavik, Iceland, Aug. 18-20, pp. 311-322.
35. Sonebi M, Bartos PJM. 2001. *Performance of Reinforced Columns Cast with Self-Compacting Concrete*. Recent Advances in Concrete Technology, Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference, SP-200, V. M. Malhotra, ed, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, pp. 415-431.
36. Struble L. *Self Consolidating Concrete*. CEAT Brown Bag Seminar, Civil and Environmental Engineering University of Illinois. 2007.
37. Sonebi M, Bartos PJM. *Bond Behavior and Pull-off Test of Self Compacting Concrete*. Bond in Concrete: From Research to Standards, Proceedings of the 3rd International Symposium, Nov. 2002;511-519.

38. Sonebi M, Bartos PJM. *Hardened SCC and its Bond with Reinforcements*. Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, 1999. pp. 275-290.
39. Tanahashi I, Ohgishi S, Ono H, Mizutani K. *Evaluation of durability for concrete in terms of watertightness by permeability coefficient test results*. Proceedings of the Katherine and Bryant Mather international conference on concrete durability, Atlanta 1987, SP 100-13, pp. 187-206.
40. Thrane LN, Pade C, Idzerda C, Kaasgaard M. *Effect of Rheology of SCC on Bond Strength of Ribbed Reinforcement Bars*. In Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. Proceedings of SCC2010 RILEM Conference, Montreal, Canada, September 26-29, 2010 (Eds K.H. Khayat and D. Feys) Springer, New York, 2010. pp. 367-378.
41. Trezos KG, Badogiannis EG, Sfikas IP, Makris KE, Smargianaki DN. *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin*. 5th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete innovation, application, and production, Chicago, IL, USA, May 12–15 2013.
42. Trezos KG, Sfikas IP, Palmos MS, Sotiropoulou EK. *Top-Bar Effect in Self-Compacting Concrete Elements*. Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. RILEM Bookseries. K.H. Khayat and D. Feys (eds.), Volume 1, 2010, pp 355-366. Proceedings of the 6th International RILEM Symposium for Self-Consolidating Concrete (SCC2010), Montreal, Canada, DOI: 10.1007/978-90-481-9664-7\_30, 26-29 September 2010. Βραβείο Θωμαΐδειου Ιδρύματος.
43. Trezos KG, Sfikas IP, Pavlou DI. *Water Permeability of Self Compacting Concrete*. 3rd fib International Congress & Exhibition: Think Globally, Build locally. Vol.6:5155-5164. Washington, DC. May 29- June 2, 2010.
44. Trezos KG, Sfikas IP. *Residual bond stress of Self-Compacting Concrete specimens after high temperature treatment*. RILEM Publications S.A.R.L. Rilem Proceedings Pro 90. Nicolas Roussel and Hela Bessaies-Bey (eds.). 2013. pp. 163-170. 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, Paris, France, Sept 2-4 2013. ISBN: 978-2-35158-137-7, eISBN 978-2-35158-138-4
45. Walraven J. *Self Compacting Concrete: Properties, Development and Code Recommendations* (Keynote paper), Kamal H. Khayat & Dimitri Feys (Eds.) Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, Volume II, Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, 26-29 September 2010
46. Wang G, Zheng J. *Bond behaviors of self-compacting concrete*. In: Yu Z, Shi C, Khayat KH, Xie Y, editors. Proceedings of 1st international symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete. China: Changsha, 2005. p. 465-71.
47. Zhu W, Quinn J, Bartos PJM. *Aspects Of Durability Of Self Compacting Concrete*. 9th International Conference on Durability of Materials and Components. Rotterdam (Netherlands), 2002.
48. Zhu W, Trtik P, Bartos PJM. *Evaluation of elastic modulus at interfacial transition zone in reinforced concrete by a microindentation technique*. 6th International Symposium on Brittle Matrix Composites, Eds: Brandt, AM, Li, VC and Marshall, IH, Warsaw, 2000. pp. 317-325.
49. Αποστολόπουλος Χ, Παπαδάκης ΕΓ, Δεμής Σ. *Διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και της επακόλουθης υποβάθμισης λόγω διάβρωσης οπλισμού από τη δράση χλωριόντων*. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23 Οκτωβρίου 2009. Πάφος, Κύπρος.
50. Βογιατζής Χ. *Αυτοσυμπυκνουμενο Σκυροδεμα, Εφαρμογες - λυσεις & προβληματα*. Ημερίδα Ελληνικού Τμήματος Σκυροδέματος για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. 7 Μαΐου 2008, ΤΕΕ, Αθήνα.
51. Γεωργίου Κ. *ΑΣΣ και ελληνική πραγματικότητα. Λύσεις με ΑΣΣ στην Ελλάδα από INTERMPIETON Δ.Υ*. Ημερίδα Ελληνικού Τμήματος Σκυροδέματος για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. 7 Μαΐου 2008, ΤΕΕ, Αθήνα.
52. Παπανικολάου ΚΓ, Τριανταφύλλου ΑΧ. *Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα: Ανασκόπηση, Ιδιότητες και Προοπτικές στην Ελλάδα*. 14ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως 2003.
53. Παπανικολάου Κ. *Το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα στην Ελληνική πραγματικότητα, νέες εξελίξεις, τάσεις και προοπτικές*. Ημερίδα Ελληνικού Τμήματος Σκυροδέματος για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. 7 Μαΐου 2008, ΤΕΕ, Αθήνα.
54. Σίδερης ΚΚ, Κυριτσάς Σ, Χανιωτάκης Ε. *Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με ελληνικά υλικά*. 14ο Συνέδριο Σκυροδέματος. Κως 2003.



55. Τελωνιάτη Δ. *Η διεθνής εμπειρία από τη χρήση Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος δείχνει το δρόμο και στην Ελλάδα*. Ημερίδα Ελληνικού Τμήματος Σκυροδέματος για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. 7 Μαΐου 2008, ΤΕΕ, Αθήνα.
56. Τρέζος Κ, Σφήκας Ι, Παύλου Δ. *Μελέτη Ιδιοτήτων Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος. Πάφος, Κύπρος. ΤΕΕ. 2009.
57. Τρέζος Κ, Σφήκας Ι. *Διερεύνηση Ιδιοτήτων Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών & Στοιχείων. Αθήνα. ΤΕΕ. 2008.

## Διάφορες Εργασίες

1. Barbosa MTG. *Evaluation of the behavior of the bond in ordinary and high strength concrete* (in Portuguese). Doctoral Thesis. COPPE/UFRJ. 2001.
2. Bartos PJM, Sonebi M, Tamimi A. *Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests*. Report of RILEM Committee TC-145-WSM, RILEM Publications S.A.R.L. Paris, 2002. 127 pp.
3. Burg RG, Ost BW. *Engineering properties of commercially available highstrength concretes*. Research and development bulletin - RD104T. Skokie-Illinois: Portland Cement Association. 1992.
4. Collepardi M, Corradi M. *Influence of Naphtalene-Sulfonated Polymer Based Superplasticizers on the Strength of Ordinary and Lightweight Concretes*. American Concrete Institute, Special Publication SP 62-16, pp.315-336. 1979.
5. De Schutter G. *Guidelines for testing fresh Self-Compacting Concrete*. European Research Project: Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete (TESTING-SCC) 2005.
6. Ferraris C, Brower L. *Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at LCPC* (Nantes, France) in October 2000, NISTIR 6819, Sept. 2001.
7. Gold SJ, Shirvill AJ. *Effects of metakaolin on concrete strength*. Laboratory Report 22 RMC Readymix Limited. 1992.
8. Hackley VA, Ferraris CF. *The Use of Nomenclature in Dispersion Science and Technology*. NIST Recommended Practice Guide, SP 960-3. 2001.
9. Huang Z, Engström B, Magnusson J. *Experimental investigation of the bond and anchorage behaviour of deformed bars in high strength concrete*. Report 94:4, Chalmers University of Technology, Chalmers; 1996.
10. Kim MY, Yang EI, Yi ST. *Evaluation of Chloride Penetration Characteristics using a Colorimetric Method in Concrete Structures*, Transactions, SMiRT 19, Toronto; 2007.
11. Largent, R. *Research Bulletin*. Liaisons LCPC, France. 1978.
12. Lee NP, Chisholm DH. *Durability of Reinforced Concrete Structures Under Marine Exposure in New Zealand*. BRANZ Study Report 145. BRANZ Ltd, Judgeford, New Zealand. 2005.
13. Maekawa K, Ozawa K. *Development of SCC's prototype* (in Japanese). Self-Compacting High-Performance Concrete, Social System Institute, pp. 20-32. 1999.
14. Papadakis VG. *Supplementary cementing materials in concrete- Activity, durability, and planning*. Final Report to European Commission, Project No. ERBFMBICT961387. Danish Technological Institute, Taastrup. January 1999.
15. Rooney M. *Assessment of the Properties of Fresh Self-Compacting Concrete with Reference to Aggregate Segregation*. PhD thesis. University of Paisley, Paisley, Scotland, 2002. 347 pp.
16. Shirvill AJ. *Mix design of metakaolin concrete, an interim report*. Laboratory Report 23, RMC Readymix Limited. 1992.
17. Stanish KD, Hooton RD, Thomas MDA. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*. FHWA Contract DTFH61-97-R-00022 Prediction of Chloride Penetration in Concrete. 1997.
18. Tang L. *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction*. PhD thesis, report P-96:6. Chalmers University of Technology, Gothenburg. 1996.
19. Taylor PC, Whiting DA, Nagi MA. *Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review*. PCA R&D Serial No. 2169, Portland Cement Association. 1999.
20. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. Report No. 4. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden. 1982.
21. Whiting D. *Rapid determination of the Chloride Permeability of Concrete*. Report No. Fhwa/RD-81/119, Portland Cement Association, NTS B No. 82140724, Aug. 1981.
22. Αναγνωστόπουλος Ν.Α. *Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα ΑΣΣ παρασκευασμένων με ελληνικά υλικά*. Διδακτορική Διατριβή. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. 2009.

23. Βούκια Δ. *Διαπερατότητα Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος με μετακαολίνη*. Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών. Επιβλέπων: Ε.Γ. Μπαδογιάννης, Λεκτ. ΕΜΠ. 2013.
24. Γεωργιάδης Α.Σ. *Βελτιστοποίηση σχεδιασμού, παραγωγής και χρήσης μειγμάτων ΑΣΣ σε βιομηχανική κλίμακα στην Ελλάδα*. Διδακτορική Διατριβή. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. 2010.
25. Μακρής ΕΚ, Σμαργιανάκη ΝΔ. *Η επίδραση του μετακαολίνη στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες και στην ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2012.
26. Μπαλατζή Σ. *Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος - Διείσδυση χλωριόντων*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2010.
27. Μπαδογιάννης Ε. *Αξιοποίηση καολινών στην τεχνολογία σκυροδέματος*. Διδακτορική Διατριβή. ΕΜΠ, Αθήνα. 2002.
28. Ορφανόπουλος Κ. *Συνάφεια Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος και επιρροή αθέλητων μετακινήσεων ράβδων οπλισμού κατά τη νωπή φάση του σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2012.
29. Πάλμος Μ, Σωτηροπούλου Ε. *Θέματα Αντοχής και Συνάφειας καθ' ύψος στο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2010.
30. Πάσιος Χ. *Συνάφεια Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2011.
31. Παύλου Δ. *Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2008.
32. Παύλου Δ. *Χαρακτηριστικά ρεολογίας και ανθεκτικότητας αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2010.
33. Στρογγύλης Χ. *Οδηγός στεγανοποίησης: τριχοειδής απορρόφηση και εξήγηση του μηχανισμού ανιούσας υγρασίας*. 2008. [http://monosimacon.blogspot.com/2008\\_11\\_01\\_archive.html](http://monosimacon.blogspot.com/2008_11_01_archive.html)
34. Στύλος Α. *Συνάφεια Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος με Χάλυβα Οπλισμού*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επιβλέπων: Κ.Γ. Τρέζος, Επικ. Καθ. ΕΜΠ. 2011.
35. Σφήκας Ι. *Τεχνολογία Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή Εργασία, εκπονηθείσα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο του Δ.Μ.Π.Σ. «Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών», επιβλέπων: Επικ. Καθ. Κ. Τρέζος, Αθήνα (Βαθμ. 10/10). Βραβείο Θωμαΐδειου Ιδρύματος. 2007.