



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Σχολή Μηχανικής και
Τεχνολογίας

Πτυχιακή εργασία

**ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ
ΜΕ ΙΝΕΣ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΚΥΡΙΟΥ
ΟΠΛΙΣΜΟΥ**

Νικόλας Οικονόμου

Λεμεσός, 2020

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ
ΜΕ ΙΝΕΣ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΚΥΡΙΟΥ
ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Νικόλας Οικονόμου

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Νικόλας Κυριακίδης

Λεμεσός, 2020

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Νικόλας Οικονόμου, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικής και Τεχνολογίας του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μου κύριο Νικόλα Κυριακίδη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου μελέτης. Επίσης νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την κυρία Θωμαΐδα Πολυδώρου για την άψογη συνεργασία που είχαμε στα εργαστήρια καθώς και για την υποστήριξη και καθοδήγηση που μας παρείχε σε όλο το διάστημα εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σκυρόδεμα υπέρ υψηλής αντοχής είναι ευρέως γνωστό για τις εφαρμογές του και θεωρείται ως το βέλτιστο, ανθεκτικό υλικό που μπορεί να αντικαταστήσει το συμβατικό σκυρόδεμα λόγω των διακριτών φρέσκων και σκληρών ιδιοτήτων του. Έτσι, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τον μηχανισμό μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ αυτού του σκυροδέματος και του συμβατικού οπλισμού που επιτρέπει τη σύνθετη δράση και των δύο υλικών αλλά και την σύνθεση και τις αντοχές που αναπτύσσει το ίδιο το σκυρόδεμα. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή για την μέθοδο παραγωγής και τον διαχωρισμό του σκυροδέματος σε διάφορα είδη, επίσης εξηγούνται και οι συνθέσεις τους. Έπειτα γίνεται αναφορά στο χάλυβα όσο αφορά τον διαχωρισμό του σε διάφορα είδη βάση τον μέθοδος παραγωγής, μορφή της επιφάνειας και την ολκιμότητα τους. Ωστόσο γίνεται ιστορική ανασκόπηση και για τα δύο υλικά χάλυβας και σκυρόδεμα. Κατόπιν περιγράφεται η μηχανική συμπεριφορά από την συνεργασία του χάλυβα-σκυροδέματος, ορίζεται η έννοια, η σημασία της συνάφειας σε ένα δομικό στοιχείο και αναφέρονται η παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται. Επιπρόσθετα γίνεται αναφορά σε διάφορες μελέτες που έχουν γίνει για συνήθες σκυρόδεμα αλλά και για σκυρόδεμα υπέρ υψηλής αντοχής όσο αφορά την συνάφεια του σκυροδέματος-χάλυβα με διαφορετικές πειραματικές μεθόδους και στη συνέχεια γίνεται αναγραφή των αποτελεσμάτων και τρόπων αστοχίας των δοκιμίων. Σε επόμενο στάδιο γίνεται περιγραφή των εργαστηριακών δοκιμών θλίψης και κάμψης καθώς και η σειρά εργασιών που έγιναν για την κατασκευή των δοκιμίων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και στη συνέχεια αναγραφή των δοσολογιών που ακολουθήθηκαν για κάθε μείγμα σε μορφή πινάκων. Τέλος αναγράφονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές κάμψης και θλίψης για όλα τα δοκίμια σε μορφή πινάκων και εξάγονται συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα υπέρ υψηλής αντοχής, συνάφεια, αγκύρωση, μάτιση, επικάλυψη

ABSTRACT

Ultra high performance concrete is widely known for its applications and is considered the optimal, durable material that can replace conventional concrete due to its distinct fresh and hard properties. Thus, it is important to understand the mechanism of force transfer between this concrete and conventional reinforcement that allows the complex action of both materials as well as the composition and strength that the concrete itself develops. Initially, an introduction is made for the method of production and the separation of concrete into different types, and their compositions are also explained. Then steel is mentioned in terms of its separation into different types based on the method of production, form of the surface and their ductility. However, there is a historical review of both, steel and concrete. Then the mechanical behavior from the cooperation of the steel-concrete is described, the concept is defined, the importance of the relevance to a structural element and the factors from which it is affected are mentioned. In addition, various studies have been reported on conventional concrete but also on ultra high-strength concrete in terms of the relevance of concrete-steel with different experimental methods and then the results and ways of failure of the specimens are recorded. The next step is to describe the laboratory tests of compression and bending as well as the order of work performed to construct the tests performed in the laboratory and then to record the dosages followed for each mixture in the form of tables. Finally, the results of the bending and grief tests for all the tests are recorded in the form of tables and conclusions are drawn.

Keywords: ultra high performance concrete, bond, anchorage, splice length , concrete cover

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xiii
1 Εισαγωγή	1
2 Σκυρόδεμα	2
2.1 Σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής	3
3 Δομικός Χάλυβας	4
4 Συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος	6
4.1 Δύναμη συνάφειας	8
4.1.1 Νόμος τάσης συνάφειας-ολίσθησης για παραμορφωμένες ράβδους ενσωματωμένες σε συμβατικό σκυρόδεμα	8
4.1.2 Διαφορετικοί τύποι δοκιμών συνάφειας	13
4.1.3 Προηγούμενη πειραματική και παραμετρική έρευνα στο UHP-SFRC	16
4.1.3.1 Τρόποι αστοχίας	16
4.1.3.2 Δοκιμές και αποτελέσματα δοκιμών συνάφειας	18
5 Πειραματική διαδικασία	25
5.1 Δοσολογία μιγμάτων	25
5.1.1 Μείγμα Α	25
5.1.2 Μείγμα Β	26
5.1.3 Μείγμα C	27
5.1.4 Μείγμα D	27

5.1.5	Μείγμα Ε.....	28
5.1.6	Μείγμα F.....	28
5.1.7	Μείγμα G.....	29
5.1.8	Μείγμα Η.....	29
5.2	Κατασκευή δοκιμίων.....	30
5.2.1	Διαδικασία δημιουργίας δοκιμίων.....	30
5.2.2	Υλικά και ιδιότητες.....	35
5.3	Εργαστηριακές δοκιμές.....	39
5.3.1	Δοκιμή θλίψης.....	39
5.3.2	Δοκιμή κάμψης.....	40
6	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	41
6.1	Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης.....	42
6.1.1	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Α.....	42
6.1.2	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Β.....	42
6.1.3	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος C.....	42
6.1.4	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος D.....	43
6.1.5	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Ε.....	43
6.1.6	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος F.....	43
6.2	Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης.....	44
6.2.1	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Α.....	44
6.2.2	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Β.....	44
6.2.3	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος C.....	44
6.2.4	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος D.....	45
6.2.5	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Ε.....	45
6.2.6	Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος F.....	45
7	Συμπεράσματα.....	46

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	47
--------------------	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Δυνάμεις συνάφειας σε δοκίμια από δοκιμή τραβήγματος για διαφορετικά d_b και V_f (Schoening and Hegger, 2012)	19
Πίνακας 2: Δοσολογία μείγματος A	25
Πίνακας 3: Δοσολογία μείγματος B	26
Πίνακας 4: Δοσολογία μείγματος C	27
Πίνακας 5: Δοσολογία μείγματος D	27
Πίνακας 6: Δοσολογία μείγματος E.....	28
Πίνακας 7: Δοσολογία μείγματος F.....	28
Πίνακας 8: Δοσολογία μείγματος G	29
Πίνακας 9: Δοσολογία μείγματος H.....	29
Πίνακας 10: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά των ινών (Τριανταφύλλου, 2013).....	38
Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα A.....	42
Πίνακας 12: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα B.....	42
Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα C	42
Πίνακας 14: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα D.....	43
Πίνακας 15: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα E	43
Πίνακας 16: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα F.....	43
Πίνακας 17: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα A	44
Πίνακας 18: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα B	44
Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα C	44
Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα D	45
Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα E.....	45
Πίνακας 22: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα F.....	45

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Δυνάμεις συνάφειας(Κκολός, 2018).....	6
Διάγραμμα 2: Συνθήκες συνάφειας (Κκολός, 2018).....	7
Διάγραμμα 3: Ισορροπία δυνάμεων σε ράβδο ενίσχυσης σε περιβάλλον συνήθους σκυροδέματος (Siakali, 2019).....	8
Διάγραμμα 4: Θεωρητική (γκρίζα γραμμή) και μετρήθηκε (μαύρη γραμμή) τοπικός νόμος συνάφειας-ολίσθησης (Tastani and Pantazopoulou, 2010).....	11
Διάγραμμα 5: Αναλυτική λύση για συμπεριφορά τάσης συνάφειας,(a) με ελαστική συμπεριφορά της ράβδου ενίσχυσης και της συνάφειας (b) ελαστική συμπεριφορά της ενισχυτικής ράβδου και πλαστική συμπεριφορά της συνάφειας (c) πλαστική συμπεριφορά χαλύβδινων ράβδων και της συνάφειας (Tastani and Pantazopoulou, 2013).....	12
Διάγραμμα 6: Έννοια τριβής (Tastani and Pantazopoulou, 2002)	12
Διάγραμμα 7: (a) Δυνάμεις που ενεργούν στη ράβδο στο HPFRC (b) τοπικός νόμος για την τάση ολίσθησης για το HPFRC (Eleftheriou, Tastani and Pantazopoulou, 2017)...	13
Διάγραμμα 8 :Δοκιμή μεταφορά δυνάμεων συνάφειας (Cairns and Plizzari, 2003).....	14
Διάγραμμα 9: (a) Πρότυπο αποτέλεσμα, (b) άκρο δοκιμίου, (c) DTP (Tastani and Pantazopoulou, 2002) και (d) αγκυρωμένο δοκίμιο (Πάνω) δοκίμιο με μάτιση (Κάτω) (ACI Committee 408, 2003)	15
Διάγραμμα 10: Τρόποι αστοχίας σκυροδέματος (Fehling <i>et al.</i> , 2012)	17
Διάγραμμα 11: Σχέση μεταξύ διαφορετικών τύπων αστοχίας σκυροδέματος (Fehling <i>et al.</i> , 2012)	17
Διάγραμμα 12: Ανταπόκριση συνάφειας-ολίσθησης (Lagier <i>et al.</i> , 2016)	20
Διάγραμμα 13: Άμεση ρύθμιση δοκιμής τραβήγματος για τη μέτρηση της διάσπασης συνάφειας και σκυροδέματος (Siakali, 2019).....	21
Διάγραμμα 14: (α) σε κάλυμμα ελεύθερου χώρου (β) μεταξύ οπλισμού (Yuan and Graybeal, 2014).....	22

Διάγραμμα 15: Καμπύλη απόκρισης απόκλισης φορτίου για τις δοκούς (Dagenais and Massicotte, 2012).....	24
Διάγραμμα 16: Υλικά	31
Διάγραμμα 17: Ρευστοποιητές.....	31
Διάγραμμα 18: Ανάμειξη των υλικών	32
Διάγραμμα 19: Ετοιμασία καλουπιών	32
Διάγραμμα 20: Εισαγωγή σκυροδέματος σε καλούπια	33
Διάγραμμα 21: Εξαγωγή δοκιμίων από τα καλούπια	34
Διάγραμμα 22: Υδρεμοτισμός δοκιμίων	34
Διάγραμμα 23: Υδρεμοτισμός δοκιμίων.....	Error! Bookmark not defined.
Διάγραμμα 24: Σχήμα ινών (Τριανταφύλλου, 2013).....	37
Διάγραμμα 25: Μηχανή θλίψης.....	40
Διάγραμμα 26: Μηχανή κάμψης	41

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΤΕΠΑΚ.: Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται όλο και περισσότερο η οικοδόμηση πολύπλοκων και μεγάλων κατασκευών που υπόκεινται σε τεράστιες φορτίσεις, αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να υπάρχουν και τα κατάλληλα υλικά για να μπορούν να στηρίξουν τέτοιου είδους κατασκευή. Ένα από αυτά τα υλικά που είναι ευρέως γνωστό είναι το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής όπου χρησιμοποιείται περισσότερο σε μεγάλες κατασκευές υψηλής σημασίας δηλαδή σε κατασκευές μεγάλου όγκου όπου φιλοξενούν μεγάλο αριθμό πολιτών καθημερινά π.χ. νοσοκομείο, αεροδρόμιο, ουρανοξύστες και άλλου τέτοιου είδους κτήρια.

Βλέποντας λοιπόν τις μεγάλες απαιτήσεις που υπάρχουν στις μέρες μας όσον αφορά τεχνικά έργα στις εποχές, καταλαβαίνουμε πώς σε όλα τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να γίνεται συνεχής μελέτη και βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών με το ελάχιστον δυνατόν κόστος ώστε να παρέχεται το επιθυμητό αποτέλεσμα όσο αφορά τον σχεδιασμό, δηλαδή ένα κτήριο να μπορεί να εξυπηρετεί τον άνθρωπο κατά την περίοδο ζωής του αλλά και για τα φορτία τα οποία σχεδιάστηκε, χωρίς να υπάρξει δημιουργία σοβαρού προβλήματος που πρόκειται να θέσει σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος δοκιμίων ορθογωνικής διατομής από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής οπλισμένο με ίνες χάλυβα σε κάμψη εφαρμόζοντας εγκάρσιο φορτίο στη μέση της δοκού και σε θλίψη εφαρμόζοντας κατανεμημένο φορτίο σε επιφάνεια 40x40mm. Αρχικά θα γίνουν αυτοί οι έλεγχοι ως ότου βρεθεί ένα κάλο μείγμα με τις επιθυμητές αντοχές. Στο επιλεγμένο αυτό μείγμα θα γίνει μια αλλαγή, θα αφαιρεθεί ένα ποσοστό αδρανών και θα προστεθούν θρυμματισμένα ελαστικά και θα επαναληφθούν οι έλεγχοι σε κάμψη και θλίψη. Τέλος αφού πάρουμε τα αποτελέσματα όλων των δοκιμίων θα γίνει μελέτη, σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετο μέρος αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς στη συνάφεια του σκυροδέματος υψηλής αντοχής με τον κύριο οπλισμό βάση μελετών που έχουν γίνει.

2 Σκυρόδεμα

Η ονομασία σκυρόδεμα εμφανίζεται στην γλώσσα μας από τις αρχές του αιώνα, με αυτόν τον όρο εννοούμε σκύρα δηλαδή αδρανή που είναι δεμένα μεταξύ τους με κάποιου είδους πάστα (τσιμεντοπολτός). Γενικότερα με την έννοια αδρανών υλικών συνδεδεμένων με μια κονία και παρόμοια υλικά φαίνεται να χάνονται στα βάθη της ιστορίας, όπως αναφέρει ο κύριος Τριανταφύλλου (2013) σώζονται ακόμα και σήμερα υδραγωγεία από σκυρόδεμα της Ρωμαϊκής εποχής, στοιχείο που δείχνει την ύπαρξη του σκυροδέματος από τον τότε καιρό, στοιχείο που δείχνει την ύπαρξη του από αρχαιοτάτους χρόνους.

Το σκυρόδεμα όπως το ξέρουμε σήμερα άρχισε με την ανακάλυψη του τσιμέντου πρώτα από τον Άγγλο μηχανικό John Smeaton το 1776 και έπειτα στην βιομηχανική του μορφή από τον Άγγλο κατασκευαστή τσιμέντου Joseph Aspdin το 1824, ο οποίος πήρε και διπλώμα ευρεσιτεχνίας για το τσιμέντο Portland. Ακολούθως από οπλισμένο σκυρόδεμα ήρθαν οι βάρκες του Γάλλου επιστήμονα υλικών Joseph-Louis Lambot το 1854 και έπειτα οι γλαστρες του Joseph Monier το 1867, ο οποίος ενίσχυε το σκυρόδεμα με πλέγματα σιδήρου (σχάρα). Ο Joseph Monier ήταν και ο εφευρέτης αυτού του τρόπου ενίσχυσης που στη συνέχεια διαδόθηκε στην ευρώπη ως Σύστημα Μονιέρ.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι το υλικό που επικρατεί την σήμερα ημέρα εδώ και δεκαετίες ως το επικρατέστερο δομικό υλικό για την συντριπτική πλειοψηφία των κατασκευών (κτίρια, γέφυρες κτλ).

Ένα σύννηθες σκυρόδεμα αποτελείται από:

- Άμμος(λεπτόκοκκα αδρανή με διάμετρο κόκκου 0-4mm)
- Σκύρα(χονδρόκοκκα αδρανή με μεγαλύτερη διάμετρο)
- Τσιμέντο
- Νερό

Είδη σκυροδέματος

1) Ως προς το ειδικό βάρος

- Ελαφρύ
- Σύννηθες

- Βαρύ

2)Ως προς τα συστατικά

- Άοπλο σκυρόδεμα
- Οπλισμένο σκυρόδεμα
- Προεντεταμένο σκυρόδεμα
- Ινοπλισμένο σκυρόδεμα
- Ενισχυμένο με πλαστικά
- Υψηλής και υπέρ υψηλής αντοχής

3)Ως προς τις μεθόδους παραγωγής και εφαρμογής

- Εργοταξιακό, χυτό επι τόπου
- Βιομηχανικό, χυτό επι τόπου
- Βιομηχανικό, χυτό στο εργοστάσιο (προκατασκευασμένο σκυρόδεμα)
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Ειδικών συνθέσεων (κυρίως για επισκευές και ενισχύσεις)

2.1 Σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής

Ορισμός: Η Sika (2019) και η Federal Highway Administration (2006) επισημαίνουν ότι το σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής (Ultra-high performance concrete) αναπτύσσει αντοχές σε θλίψη μεγαλύτερες από 150Μρα και ότι επίσης χαρακτηρίζεται από αυξημένη θλιπτική, εφελκυστική και καμπτική αντοχή καθώς και ολκιμότητα σε συνδυασμό με ενισχυμένη ανθεκτικότητα και μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

Η εφεύρεση αυτού του υλικού ως δομικό υλικό άρχισε να πραγματοποιείται αρχές του 19^{ου} αιώνα λόγω της ανάπτυξης της οικοδομικής βιομηχανίας και γενικότερα για την τάση που έχει ο άνθρωπος να δημιουργεί ψηλά και ογκώδη κτήρια με μεγάλα ανοίγματα και ψηλές κολόνες. Σκοπός ήταν εύρεση ενός ανθεκτικού και πιο σταθερού δομικού υλικού όσο αφορά την συμπεριφορά του στο χρόνο ούτως ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τέτοιου είδους κτήρια και υποδομές.

Σύνθεση σκυροδέματος υπέρ υψηλής αντοχής

- Νερό σε χαμηλή αναλογία νερού-τσιμέντου της τάξεως 0.2-0.25 με σκοπό μια αρκετά πυκνή και ισχυρή δομή των προϊόντων ενυδάτωσης έτσι θα γίνει ελαχιστοποίηση των τριχοειδών πόρων και θα επέλθει η αύξηση της ολκιμότητας και η αποφυγή της εύθραυστης αστοχίας
- Χρήση υπερρευστοποιητών για προσαρμογή της εργασιμότητας
- Χρήση ορυκτών προσθέτων(ιπτάμενη τέφρα, σκωρία καμίνου, πυριτική παιπάλη) που δίνουν άλλες ιδιότητες στο σκυρόδεμα όπως μείωση της απαίτησης σε νερό, βελτίωση της εργασιμότητας, μείωση της θερμοκρασίας ενυδάτωσης, στεγανότητα και άλλα πολλά που αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο
- Χρήση χάλυβα ή άλλων ινών για αύξηση της αντοχής σε κάμψη, διάτμηση και να κάνει το σκυρόδεμα αρκετά πιο όλκιμο

Εφαρμογές

- Κτήρια τα οποία έχουν απαιτήσεις υψηλού φόρτου σε πλάκες και υποστρώματα (π.χ. ουρανοξύστες)
- Καταστρώματα και υποστρώματα γεφυρών και σε οποιαδήποτε άλλη κατασκευή η οποία διαθέτει μεγάλα και λεπτά ανοίγματα με απαιτήσεις υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας
- Λεπτότοιχες κελυφωτές κατασκευές
- Λιμενικά έργα όπως αποβάθρες λιμάνια κ.α λόγω της υψηλής του αντίστασης σε διάβρωση

3 Δομικός Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου (Fe) με μικρή περιεκτικότητα άνθρακα (C) περίπου 2,06% κ.β και λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο (Mn), με μικρές ποσότητες θείου (S), φωσφόρου (P), πυριτίου (Si) και οξυγόνου (O). (Βαρδακούλιας, 2012). Η χρήση του χάλυβα ως δομικού υλικού εμφανίζεται με την κατασκευή της γέφυρας στον ποταμό Severn στην Αγγλία το 1779 από χυτοσίδηρο γνωστή και ως Άιρονμπριτζ, μετά από αυτό έγινε περεταίρω χρησιμοποίηση αυτού του υλικού ως δομικό υλικό. Γενικότερα έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή γεφυρών, σιδηροδρόμων, γεφυρών από

σιδηρόδρομο και άλλων κατασκευών όπως η σιδηροδρομική γέφυρα από χυτοσίδηρο στη γραμμή Stockton- Darlington το 1824 στην Αγγλία, η κρεμαστή γέφυρα Menai στην Αγγλία το 1819-1826, η σιδηροδρομική γέφυρα Britannia από πολτοπαγή σίδηρο στην Αγγλία το 1846-1850 έπειτα η κατασκευή του πύργου του Άιφελ στην Γαλλία το 1855 και στη συνέχεια και άλλες κατασκευές.

Σήμερα αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα βιομηχανικά υλικά και ευρέως γνωστό στον κατασκευαστικό τομέα λόγω των υψηλών του επιδόσεων σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα, αυτό έχει καταστήσει τον συνδυασμό των δύο υλικών ως την κορυφαία στην οικοδομική βιομηχανία.

Μεθόδοι παραγωγής:

- Παραγωγή χυτοσιδήρου από αναγωγή μεταλλευμάτων σιδήρου μέσα σε υψικάμινο και έπειτα την μετατροπή του σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου μέσα σε μεταλλάκτη
- Παραγωγή σπογγώδους σιδήρου από αναγωγή μεταλλευμάτων σιδήρου σε στερεά κατάσταση μέσα σε φρεατώδη κλίβανο και έπειτα την μετατροπή του σε χάλυβα μέσα σε κλίβανο ηλεκτρικού τόξου
- Ρευστοποίηση παλαιού σιδήρου (σκραπ) σε κλίβανο ηλεκτρικού τόξου

Υπάρχουν πολλών ειδών δομικοί χάλυβες και διακρίνονται με την:

1) Μέθοδος παραγωγής

- Θερμής έλασης
- Ψυχρής έλασης, ακολουθεί μετά την θερμή έλαση

2) Μορφή της επιφάνειας

- Λεία επιφάνεια με κυκλική διατομή
- Ανάγλυφη επιφάνεια με νευρώσεις (αυτού του είδους παρέχουν υψηλή συνάφεια)
- Έγγλυφή (σκαλωτή) επιφάνεια με αυλακώσεις

3) Ολκιμότητα

- Χαμηλή ολκιμότητα
- Μέση ολκιμότητα

- Υψηλή ολκιμότητα

4) Αντοχή σε διάβρωση

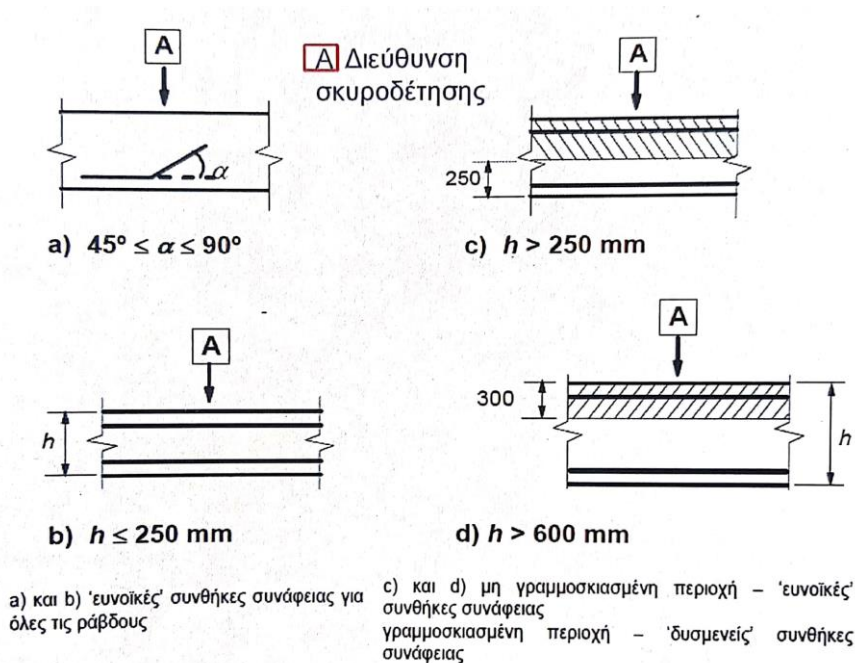
- Κοινοί χάλυβες, που είναι από κράματα σιδήρου με άνθρακα ή από κράματα σιδήρου με άνθρακα και με άλλα κραματικά στοιχεία σε μικρές ποσότητες. Αυτού του τύπου χάλυβες παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή σε διάβρωση
- Ανοξειδωτοί χάλυβες, που είναι από κράματα σιδήρου με χρώμιο σε ελάχιστη ποσότητα, επίσης μπορεί να περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία νικέλιο, μολυβδένιο, τιτάνιο και άλλα. Αυτού του τύπου χάλυβες παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση

4 Συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος

Συνάφεια χαρακτηρίζεται ως η διατμητική αντοχή σε ολίσθηση που έχουν τα δύο υλικά όταν συγκολληθούν η οποία είναι βασική ιδιότητα και σε αυτήν εναπόκειται η συνεργασία του χάλυβα με το σκυρόδεμα. Επίσης το μέγεθος της καθορίζεται από την κατανομή των τάσεων συνάφειας που αναπτύσσονται γύρω από την ράβδο οπλισμού βλ(εικόνα..), όσον αφορά τη φύση των δυνάμεων συνάφειας οφείλονται στην πρόσφυση και την τριβή που δημιουργείται μεταξύ τους. Κατά την σκυροδέτηση οι συνθήκες συνάφειας διακρίνονται σε ευνοϊκές ή μειονεκτικές βλ(εικόνα..).



Διάγραμμα 1: Δυνάμεις συνάφειας(Κκολός, 2018)



Διάγραμμα 2: Συνθήκες συνάφειας (Κκολός, 2018)

Η λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος ως σύνθετο υλικό εξαρτάται από την συνάφεια των υλικών που το αποτελούν (π.χ. ίνες, κύριος οπλισμός) και για την εξασφάλιση της είναι σημαντικό να υπάρξει σωστή διαστασιολόγηση και κατασκευαστική διαμόρφωση των δομικών στοιχείων. Από αυτήν την θα εξαρτηθεί η συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος στο μέλλον όσον αφορά τις αγκυρώσεις, ματίσεις, ρηγματώσεις και τις παραμορφώσεις, επίσης είναι υπεύθυνη για την δυσκαμψία και την ικανότητα απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας. (ΠΕΝΕΛΗΣ & ΚΑΠΠΟΣ, 1990)

Σε μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος οι μεταφορά δυνάμεων γίνεται διαμέσου ενός μηχανισμού όπου οι διαμήκεις αξονικές δυνάμεις του οπλισμού μεταφέρονται στο σκυρόδεμα. Λόγω αυτής της μεταφοράς οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε μια ράβδο μεταβάλλονται κατά το μήκος της. Σε οποιοδήποτε σημείο εμφανίζεται σχετική ολίσθηση η αλλιώς μετατόπιση μεταξύ χάλυβα-σκυροδέματος, οφείλεται στις παραμορφώσεις που διαφέρουν μεταξύ τους και μπορεί να οφείλονται σε ψηλές τοπικές παραμορφώσεις που βρίσκονται σε στρώμα σκυροδέματος πολύ κοντά στον οπλισμό (διεπιφάνεια). Η συνάφεια παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο σε ένα δομικό σύστημα, με την ύπαρξη ικανοποιητικής συνάφειας δηλαδή τα δύο υλικά (χάλυβας-σκυρόδεμα) να

συνεργάζονται σε αρκετά καλό βαθμό, μπορεί να υπάρξει επαρκές ασφάλεια, και παροχή ενός επαρκούς επιπέδου ολκιμότητας. (Μπουγιούκας, 2008)

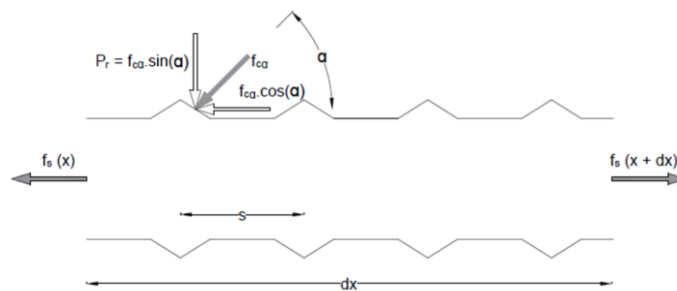
Παράγοντες που επηρεάζουν την συνάφεια

- Η ποιότητα του σκυροδέματος(υψηλής αντοχής σκυρόδεμα- υψηλές τάσεις συνάφειας)
- Η θέση και η κλίση των ράβδων οπλισμού
- Λόγω της εξίδρωσης δημιουργούνται θύλακες νερού γύρω από τις ράβδους στο πάνω μέρος του σκυροδέματος που εξασθενούν την συνάφεια
- Η μορφή επιφάνειας των ράβδων οπλισμού
- Η επίδραση των ψηλών θερμοκρασιών
- Η διείδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα
- Οι αποστάσεις μεταξύ των ράβδων οπλισμού
- Η επικάλυψη οπλισμού

4.1 Δύναμη συνάφειας

4.1.1 Νόμος τάσης συνάφειας-ολίσθησης για παραμορφωμένες ράβδους ενσωματωμένες σε συμβατικό σκυρόδεμα

Η δύναμη της συνάφειας καθορίζεται από τη σχέση συνάφειας-πίεσης-ολίσθησης. Γενικά, λαμβάνεται πειραματικά με τη διεξαγωγή δοκιμών συνάφειας. Το Σχήμα 2-11 παρουσιάζει το Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος της ράβδου ενίσχυσης σε ένταση και τις δυνάμεις που ενεργούν σε αυτό.



Διάγραμμα 3: Ισορροπία δυνάμεων σε ράβδο ενίσχυσης σε περιβάλλον συνήθους σκυροδέματος (Siakali, 2019)

Γράφεται η ισορροπία των δυνάμεων που δρουν στη ράβδο σε εφελκυσμό κατά μήκος ενός μικρού μήκους συνάφειας dx :

$$-f_s(x) \cdot A_b + f_s(x + dx) \cdot A_b - f_{c\alpha} \cos(\alpha) \cdot \frac{dx}{s} \pi D_b = 0$$

$$\frac{f_s(x) + df_s(x) - f_s(x)}{dx} \cdot A_b \cdot dx - f_{c\alpha} \cos(\alpha) \cdot \frac{dx}{s} \pi D_b = 0$$

$$\frac{df_s(x)}{dx} \cdot \pi \cdot \frac{D_b^2}{4} - \frac{f_{c\alpha} \cos(\alpha)}{s} \cdot \pi D_b = 0 ; \text{ where } \frac{-f_{c\alpha} \cos \alpha}{s} = f_b$$

Έτσι, η εξίσωση (2.11) δείχνει ότι η δύναμη της συνάφειας είναι άμεσα ανάλογη με τη διακύμανση της δύναμης εφελκυσμού της ράβδου σε ένα τμήμα dx :

$$\frac{df_s(x)}{dx} = \frac{-4}{D_b} f_b(x) \quad (2.11)$$

Στους κωδικούς σχεδίασης, υπάρχουν διαθέσιμες μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης μιας ενισχυτικής ράβδου για την ανάπτυξη της τάσης απόδοσης σε συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτές οι εξισώσεις βασίζονται στην Εξίσωση (2.12) υποθέτοντας μια μέση και ομοιόμορφη κατανομή της τάσης των δεσμών σε όλο το μήκος της μελέτης:

$$\int_0^{l_b} dx = \int_0^{f_y} \frac{df \times D_b}{4 \times f_b} \quad (2.12)$$

Επομένως, το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης για την απόδοση της ράβδου ενίσχυσης παρουσιάζεται στην Εξίσωση (2.13):

$$l_b = \frac{D_b \times f_y}{4 \times f_b} \quad (2.13)$$

Παρ' όλα αυτά, η παραδοχή της σταθερής μέσης τάσης της συνάφειας ισχύει μόνο όταν η συμπεριφορά της ράβδου ενίσχυσης είναι ελαστική (γραμμική μεταβολή της τάσης

του χάλυβα) και σε μικρό μήκος αγκύρωσης καθώς οι τάσεις διάτμησης στο κάλυμμα από σκυρόδεμα είναι περιορισμένες. Επομένως, συνιστήθηκαν αριθμητικές εξισώσεις του νόμου ολίσθησης συνάφειας-τάσης σχετικά με ενισχυμένο χάλυβα ενσωματωμένο σε συμβατικό σκυρόδεμα για τον προσδιορισμό της διακύμανσης της τάσης ράβδου, της τάσης σύνδεσης και της ολίσθησης ράβδου ξεκινώντας από το φορτωμένο άκρο της ράβδου ενίσχυσης που διαδίδεται σε ολόκληρο το εξεταζόμενο μήκος αγκύρωσης (Tastani and Pantazopoulou, 2013). Βασίζονται στην Εξίσωση (2.11) και στην εξίσωση συμβατότητας που παρουσιάζεται στην Εξίσωση (2.14):

$$\frac{ds(x)}{dx} = -[\varepsilon_s(x) - \varepsilon_{ct}(x)] \quad (2.14)$$

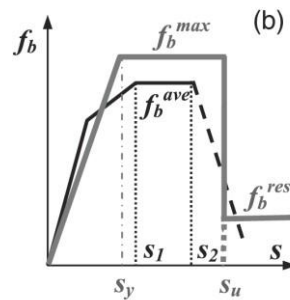
Τρεις βασικές υποθέσεις δόθηκαν για την επίλυση αυτών των εξισώσεων. Πρώτον, οι τάσεις στο σκυρόδεμα θεωρήθηκαν αμελητέες σε σύγκριση με τις τάσεις στη ράβδο ενίσχυσης λόγω των κακών εφελκυστικών ιδιοτήτων τους. Αυτό οδηγεί στην εξίσωση συμβατότητας που παρουσιάζεται στην Εξίσωση (2.15):

$$\frac{ds(x)}{dx} = -[\varepsilon_s(x)] \quad (2.15)$$

Δεύτερον, οι ράβδοι ενίσχυσης χαρακτηρίζονταν από συμπεριφορά ελαστο-πλαστικού. Τρίτον, ο τοπικός νόμος συνάφειας-τάση ολίσθησης αντιπροσωπεύει μια λειτουργία αποτυχίας διάσπασης-τραβήγματος που παρουσιάζεται από την γκριζα γραμμή στο Σχήμα 2-12. Ελήφθη με τη διεξαγωγή έρευνας μιας σειράς δοκιμών άμεσης απόσυρσης για κανονικές ράβδους ενίσχυσης ενσωματωμένες σε συμβατικό σκυρόδεμα όπου η σχέση τοπικής συνάφειας-τάση ολίσθησης απεικονίζει τη μαύρη γραμμή με μια συντηρητική μέση τάση συνάφειας (Tastani and Pantazopoulou, 2010). Ωστόσο, η γκριζα γραμμή παρουσιάζει τον υποτιθέμενο νόμο τοπικής συνάφειας-τάσης ολίσθησης χωρισμένο σε ένα αρχικό ελαστικό τμήμα έως τη μέγιστη τάση συνάφειας fb_{max} για μια σχετική ολίσθηση s_y . Στο τέλος της ελαστικής φάσης, σχηματίζεται ένα οροπέδιο της μέγιστης τάσης συνάφειας. Μόλις η σχετική ολίσθηση φτάσει την απόσταση μεταξύ

των νευρώσεων s_u , η δύναμη της συνάφειας πέφτει για να φθάσει σε μια υπολειμματική τάση f_b^{res} που ορίζεται από την τοπική αστοχία της συνάφειας.

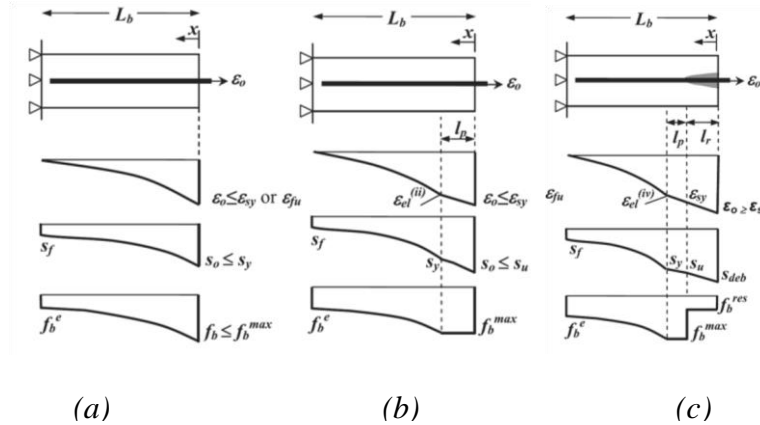
Στη συνέχεια, ο μόνος μηχανισμός μεταφοράς δύναμης γνωστός ως «τριβή» εμφανίζεται μεταξύ των άκρων των νευρώσεων και της διαμορφωμένης κυλινδρικής επιφάνειας του σκυροδέματος (Tastani and Pantazopoulou, 2010).



Διάγραμμα 4: Θεωρητική (γκρίζα γραμμή) και μετρήθηκε (μαύρη γραμμή) τοπικός νόμος συνάφειας-ολίσθησης (Tastani and Pantazopoulou, 2010)

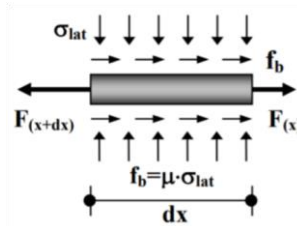
Το Σχήμα 2-13 παρουσιάζει την υπολογισμένη λύση της κατάστασης της τάσης συνάφειας που επιτυγχάνεται με την επίλυση των προηγουμένως περιγραφέντων διαφορικών εξισώσεων, χρησιμοποιώντας το νόμο συνάφειας-ολίσθησης που απεικονίζεται από την γκριζα γραμμή στο Σχήμα 2-12. Η απόκριση χωρίζεται κυρίως σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο που παρατηρείται στο Σχήμα 2-13 (α) αντιπροσωπεύει τη γραμμική ελαστική συμπεριφορά τόσο της ράβδου ενίσχυσης όσο και την τάση συνάφειας. Το δεύτερο στάδιο στο Σχήμα 2-13 (b) καθορίζει τον τρόπο αποτυχίας επιδείνωσης της συνάφειας. Εάν παρέχεται επαρκές μήκος αγκύρωσης, η τάση συνάφειας εισέρχεται στην πλαστική φάση, επιτρέποντας στη ράβδο να βιώνει υψηλότερες πιέσεις με ολίσθηση. Ως εκ τούτου, το μήκος αγκύρωσης L_b βιώνει από το φορτωμένο άκρο έως ένα συγκεκριμένο πλαστικό μήκος l_p μια πλαστική κατανομή της μέγιστης τάσης συνάφειας f_b^{max} ενώ παραμένει ελαστικό κατά μήκος του υπόλοιπου μήκους αγκύρωσης ($L_b - l_p$). Στην τρίτη φάση, η ράβδος ενίσχυσης και η συνάφεια εισέρχονται στην πλαστική φάση μαζί σε όλο το μήκος απόδοσης ή αποκόλλησης l_r . Σε

αυτό το μήκος, η τάση συνάφειας μειώνεται ώστε να φθάσει στο f_b^{res} όταν χρησιμοποιούνται παραμορφωμένες ράβδους (Tastani and Pantazopoulou, 2013).



Διάγραμμα 5: Αναλυτική λύση για συμπεριφορά τάσης συνάφειας, (a) με ελαστική συμπεριφορά της ράβδου ενίσχυσης και της συνάφειας (b) ελαστική συμπεριφορά της ενισχυτικής ράβδου και πλαστική συμπεριφορά της συνάφειας (c) πλαστική συμπεριφορά χαλύβδινων ράβδων και της συνάφειας (Tastani and Pantazopoulou, 2013)

Οι Tastani και Pantazopoulou (2002) μελέτησαν την επίδραση της ακτινικής κατάστασης της τάσης στη διαμήκη συνιστώσα συσχετίζοντάς τα με έναν συντελεστή τριβής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-14 και παρουσιάζονται στην Εξίσωση (2.16):

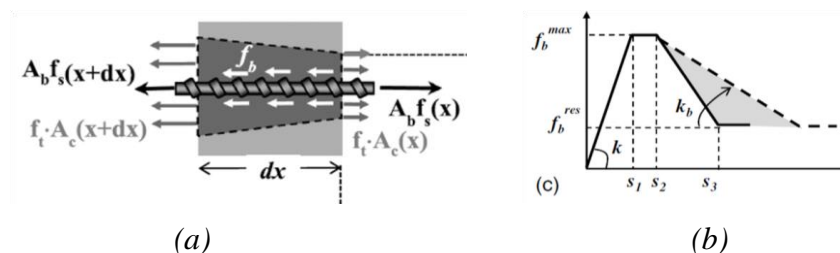


Διάγραμμα 6: Έννοια τριβής (Tastani and Pantazopoulou, 2002)

$$f_b^{max} = \frac{2 \mu}{\pi} \sigma_n + f_{adh} \quad (2.16)$$

Αρκετά πειράματα έχουν προταθεί στο παρελθόν για να χαρακτηριστούν οι τοπικοί νόμοι της τάσης συνάφειας-ολίσθησης σχετικά με ενισχυμένο χάλυβα ενσωματωμένο

σε συμβατικό σκυρόδεμα για τη διευκόλυνση του βελτιωμένου σχεδιασμού του δομικού σκυροδέματος. Ωστόσο, το μοντέλο συνάφειας βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη όσον αφορά το UHP-SFRC. Στην πραγματικότητα, οι εξισώσεις τάση συνάφειας-ολίσθησης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-13 δεν είναι έγκυρες για το HPFRC, δεδομένου ότι η υπόθεση της εξίσωσης παραμόρφωσης συμβατότητας δεν μπορεί να εφαρμοστεί επειδή η εφελκυστική τάση για αυτό το νέο σκυρόδεμα δεν μπορεί να παραμεληθεί. Πρόσφατα προτάθηκε μια μαθηματική λύση για το ECC για να επισημανθούν οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο αριθμητικών μοντέλων (Eleftheriou et al., 2017). Πρώτον, η παραμόρφωση συμβατότητας που χρησιμοποιείται δίνεται στην Εξίσωση (2.14) χωρίς καμία απλοποίηση. Δεύτερον, η ισορροπία των δυνάμεων για το μελετημένο στοιχείο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-15 (α) περιλαμβάνει τις δυνάμεις της μήτρας του σκυροδέματος. Το τελευταίο παρουσιάζει τη συμπεριφορά τάσης εφελκυσμού-καταπόνησης του HPFRC όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1 με μια αρχική γραμμική ελαστική απόκριση $\sigma_f = E_c \cdot \epsilon_{ct}$. Αυτή η αντοχή εφελκυσμού παραμένει σταθερή έως την μέγιστη πίεση. Τέλος, η υποτιθέμενη κατάσταση της τάσης της συνάφειας τροποποιείται στη φάση μετά την αιχμή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-15 (β) επισημαίνοντας την παρουσία σκληρότητας της συνάφειας. Ωστόσο, αυτή η λύση περιορίζεται στην ελαστική συμπεριφορά των ράβδων ενίσχυσης από χάλυβα.

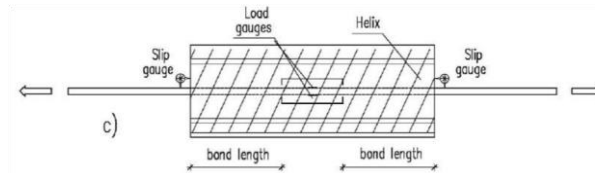


Διάγραμμα 7: (α) Δυνάμεις που ενεργούν στη ράβδο στο HPFRC (β) τοπικός νόμος για την τάση ολίσθησης για το HPFRC (Eleftheriou, Tastani and Pantazopoulou, 2017)

4.1.2 Διαφορετικοί τύποι δοκιμών συνάφειας

Οι δοκιμές για την συνάφεια χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Ο πρώτη είναι τύπου «μεταφοράς» που φαίνεται στο Σχήμα 2-16 όπου η ράβδος ενίσχυσης τραβιέται

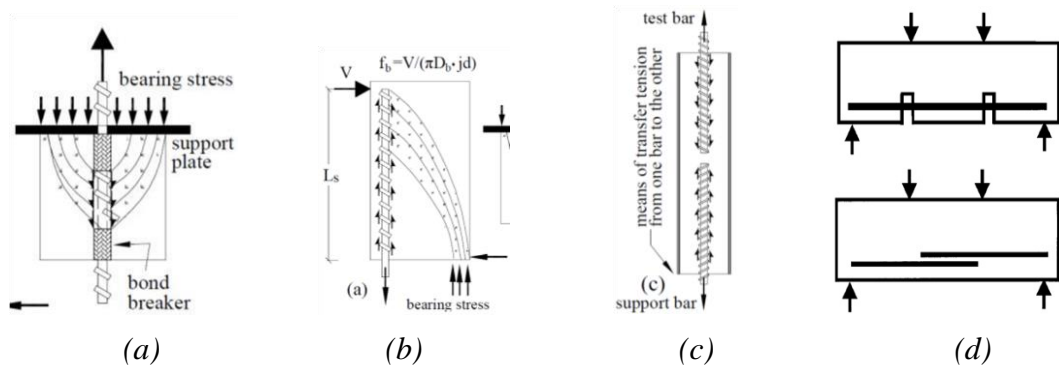
και από τα δύο άκρα και η συνάφεια μετράται έμμεσα με τη χρήση μετρητών τάσης τοποθετημένων στη ράβδο ενίσχυσης ή στο σκυρόδεμα που είναι μια περίπλοκη διαδικασία (Cairns and Plizzari, 2003).



Διάγραμμα 8 : Δοκιμή μεταφορά δυνάμεων συνάφειας (Cairns and Plizzari, 2003)

Το δεύτερο είναι το τεστ «αγκύρωσης ή ανάπτυξης» όπου το ένα άκρο της ράβδου ενίσχυσης είναι ενσωματωμένο στο σκυρόδεμα και το άλλο άκρο τραβιέται. Η ισχύς της συνάφειας υπολογίζεται άμεσα εφαρμόζοντας εξωτερική ισορροπία. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες από τις πειραματικές δοκιμές που διεξάγονται βασίζονται σε αυτήν την αρχή. Αρχικά, το τυπικό "pullout test" (SPT) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-17 (α) χρησιμοποιήθηκε ως επί το πλείστον για την απλή εφαρμογή του, αλλά παρατηρήθηκαν δύο βασικά μειονεκτήματα. Ο σχηματισμός τάσεων συμπίεσης μεταξύ του στηρίγματος και της επιφάνειας της ράβδου ενίσχυσης λόγω των συνθηκών στήριξης, τοποθετώντας το περιβάλλον σκυρόδεμα σε συμπίεση, ενώ το κάλυμμα από σκυρόδεμα βρίσκεται σε τάση στα μέλη κάμψης RC. Έτσι, το αποτέλεσμα της εγκάρσιας ρωγμής δεν λαμβάνεται υπόψη (ACI Committee 408, 2003). Το δεύτερο μειονέκτημα είναι μια υπερεκτίμηση των τιμών αντοχής της συνάφειας που δημιουργούνται από την αστοχία απόσυρσης, καθώς το κάλυμμα από σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο κάλυμμα (Cairns και Plizzari, 2003). Το Σχέδιο 2-17 εισάγει τη δοκιμή συνάφειας ενός άκρου γνωστή ως δοκιμή «εκκεντρικού τραβήγματος» όπου τόσο η ράβδος ενίσχυσης όσο και το περιβάλλον σκυρόδεμα τοποθετούνται σε ένταση που δείχνει την πραγματική κατάσταση τάσης. Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται σπάνια λόγω της ανάγκης για επαρκή εγκάρσια ενίσχυση για την αποφυγή πρόωρης αστοχίας διάτμησης αντί για διαχωρισμό. Μια άμεση δοκιμή έλξης (DPT) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-17 (γ) έχει χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική δοκιμή όπου η ράβδος και το περιβάλλον σκυρόδεμα τοποθετούνται και οι δύο σε τάση (Tastani και Pantazopoulou, 2002). Η κατάσταση της πίεσης της συνάφειας σε όλο το αναπτυγμένο μήκος καθορίστηκε με

βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών. Παρά τα πλεονεκτήματά του, το DPT είναι δύσκολο να εκτελεστεί, δεδομένου ότι απαιτεί τέλεια ευθυγράμμιση των πιασμένων άκρων του δείγματος. Μια άλλη εναλλακτική λύση που προτιμάται από τα εργαστήρια είναι το πρότυπο «Τεστ τεσσάρων σημείων κάμψης συνάφειας» όπως το δείγμα αγκύρωσης συνάφειας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-17 (δ) (Επάνω) και το δείγμα μάτισης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-17 (δ) (Κάτω). Απεικονίζουν την πραγματική κατάσταση που εμφανίζεται στα μέλη της κάμψης, με την κατανομή των τάσεων κατά μήκος της διατομής τους. Το αγκυρωμένο δείγμα βασίζεται στην επιλογή ενός συγκολλημένου μήκους μαζί με τη δημιουργία μιας κύριας κάμψης. Αυτή η δοκιμαστική εγκατάσταση, με την παρουσία των στηριγμάτων, αποδείχθηκε ότι αυξάνει την αντοχή του δεσμού. Το δείγμα συναρμογής της συνάφειας θεωρείται το πιο απλό και αξιόπιστο τεστ για τη ρύθμιση. Χρησιμοποιήθηκε συνήθως για την ανάπτυξη των περισσότερων κωδικών σχεδίασης (Cairns και Plizzari, 2003).



Διάγραμμα 9: (a) Πρότυπο αποτέλεσμα, (b) άκρο δοκιμίου, (c) DTP (Tastani and Pantazopoulou, 2002) και (d) αγκυρωμένο δοκίμιο (Πάνω) δοκίμιο με μάτιση (Κάτω) (ACI Committee 408, 2003)

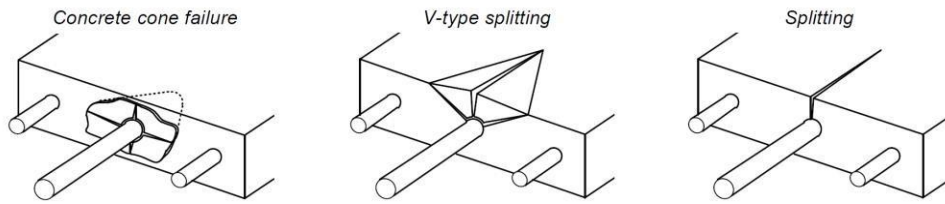
Μια πρόσφατη τροποποίηση του αγκυρωμένου δείγματος συνάφειας προτάθηκε όπου το μήκος συνάφειας αναπτύσσεται στην περιοχή σταθερής ροπής. Η εγκατάσταση επιτρέπει τον επαναπροσαρμοσμένο υπολογισμό της ανεπτυγμένης δύναμης στη ράβδο ενίσχυσης μέσω της ισορροπίας του δείγματος, από την οποία εκτιμάται η συνάφεια κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης. Ο συγγραφέας μελέτησε τη συμπεριφορά της συνάφειας για ένα HPFRC, όπου τα δείγματα δοκιμής απέτυχαν σε ολίσθηση παρά με διαχωρισμό (Tastani et al., 2016a).

4.1.3 Προηγούμενη πειραματική και παραμετρική έρευνα στο UHP-SFRC

Η αντοχή της συνάφειας εξαρτάται από τις ιδιότητες της μήτρας του σκυροδέματος (σύνθεση, εργασιμότητα και μηχανικές ιδιότητες), τη γεωμετρία και την ιδιότητα της ράβδου ενίσχυσης (διάμετρος, γεωμετρία νευρώσεων, αντοχή εφελκυσμού), το καθεστώς φόρτισης (καθεστώς φόρτισης και ρυθμός) και τέλος οι παράμετροι του συστήματος (επικάλυψη σκυροδέματος, περιορισμός, η θέση των ενισχυτικών ράβδων). Επίσης, τα συστατικά και οι μηχανικές ιδιότητες του UHP-FRC έχουν θετική επίδραση στην αντοχή της συνάφειας μεταξύ των ενισχυτικών ράβδων και του περιβάλλοντος σκυροδέματος σε αντίθεση με εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος. Δεδομένου ότι το UHPC έχει μόνο λεπτά αδρανή, η επίδραση που επιφέρουν ο συνδυασμός των αδρανών μειώνεται. Στην πραγματικότητα, δηλώθηκε ότι η εξάλειψη του χονδροειδούς αδρανούς θα μπορούσε να αλλάξει τον τρόπο αστοχίας από την απόσυρση σε διαχωρισμό για μικρή επικάλυψη (Holschemacher et al., 2004). Ωστόσο, η τάση συνάφειας είναι πιο σημαντική για το UHPC από ό, τι για το κανονικό σκυρόδεμα, λόγω της πυκνής μήτρας που δεσμεύεται στενά μεταξύ του χάλυβα και του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Αυτό το καινοτόμο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από όλκιμη ικανότητα μετά την πρώτη ρωγμή σε τάση, επιτρέποντάς του να διατηρήσει μεγαλύτερες τάσεις εφελκυσμού που αναπτύσσονται στην επικάλυψη του σκυροδέματος που περιβάλλει την ράβδο ενίσχυσης. Έτσι, με βάση την εξίσωση (2.16), επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές της συνάφειας.

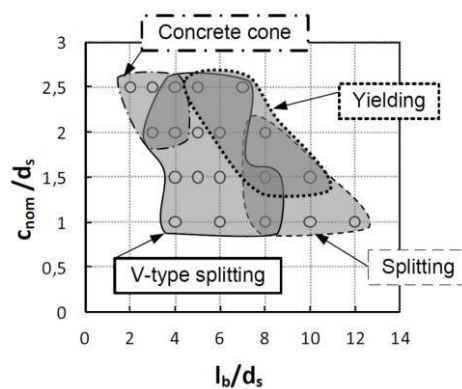
4.1.3.1 Τρόποι αστοχίας

Σύμφωνα με μια δοκιμή απόσυρσης σε ράβδους ενίσχυσης διαμέτρου 12 mm ενσωματωμένοι σε μπλοκ UHPC με κλάσμα ογκομετρικής ίνας 1,5%, τρεις τρόποι αστοχίας παρατηρήθηκαν στο σκυρόδεμα (Fehling et al., 2012). Το Σχήμα 2-18 απεικονίζει την κωνική αστοχία του σκυροδέματος, τη διάσπαση τύπου ν και την αστοχία σχισίματος. Αναφέρθηκε επίσης ότι στο τέλος του συνδεδεμένου μήκους, αναπτύχθηκε εγκάρσια ρωγμή.



Διάγραμμα 10: Τρόποι αστοχίας σκυροδέματος (Fehling *et al.*, 2012)

Η μελέτη περιλάμβανε επίσης την ανάλυση της επικάλυψης του σκυροδέματος που κυμαίνεται από 1db έως 2.5db και το μήκος ενσωμάτωσης ξεκινώντας από 2db έως 12db για τον καθορισμό των τρόπων αστοχίας (Fehling *et al.*, 2012). Κατά συνέπεια, αναπτύχθηκε μια συσχέτιση μεταξύ του διαφορετικού τρόπου αστοχίας και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-19. Ο ερευνητής επεσήμανε ότι η κωνική αστοχία οδηγεί σε μια εύθραυστη διακλάδωση μετά την κορυφή, ενώ η αστοχία διαχωρισμού και η διάσπαση είναι πιο όλκιμες (Fehling *et al.*, 2012).



Διάγραμμα 11: Σχέση μεταξύ διαφορετικών τύπων αστοχίας σκυροδέματος (Fehling *et al.*, 2012)

Ο τέταρτος τρόπος αστοχίας που παρατηρείται σε αυτό το τεστ συνάφειας είναι η απόδοση ή η ρήξη της ράβδου ενίσχυσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-19 που συμβαίνει όταν εφαρμόζονται μεγάλες επικαλύψεις σκυροδέματος και μήκη αγκύρωσης.

4.1.3.2 Δοκιμές και αποτελέσματα δοκιμών συνάφειας

Μια από τις πρώτες δοκιμές συνάφειας στο UHPC πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία με τη διεξαγωγή μιας τυπικής δοκιμαστικής δοκιμής σε δείγματα RILEM για τη μελέτη της συμπεριφοράς των συμβατικών ράβδων ενίσχυσης (διάμετρος 10 mm) για μήκος ενσωμάτωσης 1,5 φορές τη διάμετρο της ράβδου (15 mm) και επικάλυψη 4,5 cm. Διαφορετικοί ρυθμοί φόρτωσης, που κυμαίνονταν μεταξύ 0,001 mm / s και 0,1 mm / s εφαρμόστηκαν για πολλά μίγματα UHPC σε διαφορετικές ηλικίες. Πρώτον, η ισχύς της συνάφειας και η ακαμψία αυξήθηκαν με το χρόνο, όπου η ισχύς της συνάφειας έφτασε τα 60-70 MPa σε 56 ημέρες. Η αύξηση της αντοχής με το χρόνο παρατηρήθηκε ιδιαίτερα όταν προστίθεται ιπτάμενη τέφρα αντί για πυριτική παιπάλη. Επιπλέον, οι χαμηλοί ρυθμοί φόρτωσης οδηγούν σε μια πιο απότομη καμπύλη ανόδου τάσης συνάφειας-ολίσθησης και μια πιο επίπεδη κατηφόρα μετά την κορυφή. Ωστόσο, ο ρυθμός φόρτισης και η ολίσθηση αυξάνονται αναλογικά (Holschemacher et al., 2004). Το 2012, πραγματοποιήθηκε μια συνέχεια της δοκιμής τραβήγματος στα ίδια δείγματα, ενώ κυμαινόταν το κάλυμμα από σκυρόδεμα μεταξύ 4,5 και 2 cm. Παρατηρήθηκε ότι η σχέση τάσης συνάφειας- ολίσθησης ήταν παρόμοια και για τα δύο καλύμματα σκυροδέματος για την προ-αιχμή, ενώ παρουσίαζε μια πιο απότομη μείωση στη μετα-αιχμή για τη μικρότερη επικάλυψη στο σκυρόδεμα. Η μέγιστη τάση της συνάφειας ήταν ελαφρώς υψηλότερη για επικάλυψη 4,5 cm ίσο με 65 MPa σε σύγκριση με 58 MPa για επικάλυψη 2 cm (Weisse and Holschemacher, 2012). Η ίδια δοκιμή τραβήγματος πραγματοποιήθηκε σε ράβδους ενίσχυσης 14 mm και 20 mm ενσωματωμένα σε UHPC για δύο ογκομετρικά κλάσματα από χαλύβδινες ίνες ($V_f = 1\%$ και 2%) με το ίδιο μήκος αγκύρωσης 1,5db και επικάλυψη 4,5db. Σημειώνεται επίσης ότι το μέγιστο μέγεθος αδρανών είναι περίπου 5 mm. Όλα τα δείγματα απέτυχαν από το τράβηγμα εκτός από εκείνο με ράβδο 20 mm και 1% από χαλύβδινες ίνες. Ωστόσο, το τελευταίο έφτασε τις υψηλότερες τιμές αντοχής συνάφειας 86 MPa σε σύγκριση με 77 MPa για υψηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες 2% ή 67 MPa για μικρότερη διάμετρο ράβδου 14 mm όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-3. Για ράβδο ενίσχυσης 14 mm, η αύξηση του μήκους αγκύρωσης από 1,5db σε 2db για την ίδια περιεκτικότητα σε ογκομετρικές ίνες $V_f = 1\%$ δεν επηρέασε την ισχύ συνάφειας των 67 MPa (Schoening και Hegger, 2012).

Πίνακας 1: Δυνάμεις συνάφειας σε δοκίμια από δοκιμή τραβήγματος για διαφορετικά d_b και V_f (Schoening and Hegger, 2012)

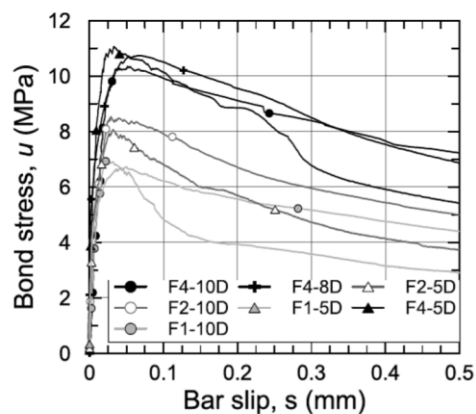
Test		PO1	PO2	PO3	PO4	PO5	PO6
\emptyset	[mm]	20	14	20	14	20	14
steel fibre content	[% p.v.]	1	1	2	1	-	-
l_b	[mm]	30	21	30	28	30	21
$f_{cm,cube150}$	[MPa]	184	179	186	177	136	142
f_{cm}	[MPa]	163	139	141	123	116	116
$f_{ctm,fl}$	[MPa]	10	10	18	9	9*	9*
τ	[MPa]	86	67	77	67	64	53
$\tau/f_{cm,cube}$	[-]	0.47	0.37	0.41	0.38	0.47	0.38
τ/f_{cm}	[-]	0.53	0.48	0.55	0.54	0.55	0.46

Μια άλλη τυπική δοκιμή τραβήγματος διεξήχθη σε ένα μπλοκ 200 mm UHPC (αντοχή σε θλίψη 154 MPa) για ράβδους ενίσχυσης 12, 16 και 20 mm ενσωματωμένα κατά μήκος ενός τυπικού μήκους αγκύρωσης 5db όπου όλες οι χαλύβδινες ράβδοι έσπασαν. Έτσι, προτάθηκαν μικρότερα μήκη αγκύρωσης των 2, 3 και 4db για την ράβδο 16 mm. Για ένα μήκος αγκύρωσης 3db, η τάση συνάφειας ήταν περίπου 55 MPa όπου το δείγμα απέτυχε κάπως σε ρήξη συνάφειας και χάλυβα (Vitek et al., 2013).

Συνοψίζοντας, η τυπική δοκιμή τραβήγματος έδινε μη ρεαλιστικές τιμές υψηλής αντοχής συνάφειας όπου το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης για τη μέτρηση της τάσης συνάφειας ήταν 1,5db αντί της τυπικής τιμής 5db για να αποφευχθεί η αστοχία της ράβδου ενίσχυσης. Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα αυτού του τύπου δοκιμής, παρατηρήθηκε ότι η ισχύς της συνάφειας εξαρτάται από τη διάμετρο της ράβδου. Ωστόσο, επηρεάζεται ελαφρώς από την επικάλυψη σκυροδέματος. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και βασίστηκε σε πολλά πειράματα, η τυπική δοκιμή αποσύρσεως δεν μπόρεσε να προβλέψει την επίδραση των ινών και τη συμβολή των συγκεκριμένων ιδιοτήτων στην αντοχή σε συνάφεια (Harajli et al., 2002).

Διεξήχθη μια δοκιμή άμεσης εφελκυστικής τάσης σε ράβδους ενίσχυσης 25 mm και 35 mm σε UHP-FRC για κλάσμα ογκομετρικής ίνας ($l_f = 10$ mm, $\phi_f = 0,2$ mm) 1-2% (μήκη μάτισης 5, 10 και 18db) και 4% (μήκη μάτισης 5, 8, 10, 12 και 18db) διατηρώντας παράλληλα μια επικάλυψη 1,2db (30 mm). Τα περισσότερα από τα δείγματα απέτυχαν με αστοχία διαχωρισμού ενώ μερικά απέτυχαν από την απόδοση

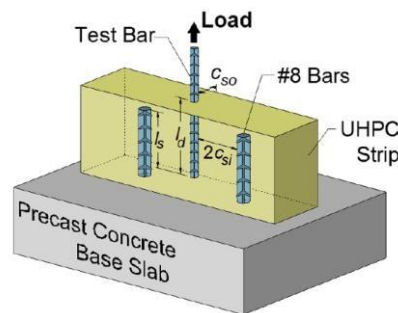
των ενισχυτικών ράβδων όταν το μήκος αγκύρωσης έφτασε τα 12db (για db = 25 mm) και 18db (για db = 35 mm). Ο τρόπος της αστοχίας δεν παρουσιάζει θρυμματισμένο σκυρόδεμα μεταξύ των νευρώσεων, ενώ η απόδοση της ράβδου ενίσχυσης θα μπορούσε να ακολουθηθεί με ρωγμές σχισίματος ή να παρουσιάζει μόνο μια καθαρή συμπεριφορά σκλήρυνσης της καταπόνησης του χάλυβα. Μπορεί να φανεί ότι η μέση ισχύς της συνάφειας για όλες τις διαφορετικές τιμές των συνδέσεων και της διαμέτρου της ράβδου ήταν περίπου 10-11 MPa για $V_f = 4\%$, 8 MPa για $V_f = 2\%$ και 6 MPa για $V_f = 1\%$. Ωστόσο, μεγαλύτερα μήκη αγκύρωσης όπως 18db οδηγούν στη μείωση των τάσεων συνάφειας (Lagier et al., 2015). Για μήκος ματίσματος 8db, η τάση συνάφειας θεωρήθηκε τοπικά ομοιόμορφη μετά τη μέτρηση των τάσεων κατά μήκος του ματίσματος. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαλύβδινες ίνες από 1% σε 4% για τα μήκη αγκύρωσης 5, 8 και 10db σχετικά με μια ράβδο ενίσχυσης 25 mm, οδηγεί στην αύξηση της αντοχής της συνάφειας κατά 47% όπου η τάση της ράβδου έφτασε τα 400 MPa ως μπορεί να φανεί στη μετρούμενη σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-20 (Lagier et al., 2016).



Διάγραμμα 12: Ανταπόκριση συνάφειας-ολίσθησης (Lagier et al., 2016)

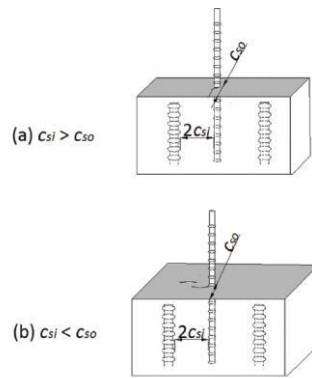
Το Σχήμα 2-21 παρουσιάζει τη διάταξη δοκιμής μήκους συρραφής που πραγματοποιήθηκε σε ράβδο ενίσχυσης (db = 15.875 mm) ενσωματωμένη σε δύο τύπους UHP-FRC με 2% κοντές χαλύβδινες ίνες. Εξετάστηκαν διαφορετικά μήκη μάτισης (4db, 6db, 8db και 10db) με επικάλυψη 2db και απόσταση ράβδου 4db σχετικά με σκυρόδεμα με $f_c = 97,4$ MPa. Αποδείχθηκε ότι η τάση της ράβδου είναι γραμμικά

ανάλογη με την αύξηση του μήκους του ματίσματος. Για αυτήν τη ρύθμιση δοκιμής, η γραμμή απέδωσε για μήκος αγκύρωσης $6d_b$. Επιπλέον, επιλέχθηκαν διαφορετικές επικαλύψεις σκυροδέματος για 120 ράβδους και μήκος αγκύρωσης $l_d = 6d_b$ για δύο διαφορετικές αντοχές σκυροδέματος ($f_c = 134 \text{ MPa}$ και $f_c = 93 \text{ MPa}$). Η τάση της ράβδου αυξάνεται όταν οι τιμές του σκυροδέματος ήταν υψηλότερες. Αυτή η αύξηση παρατηρήθηκε για UHP-FRC με μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη. Για το UHP-FRC με $f_c = 93 \text{ MPa}$, η τάση της ράβδου αυξήθηκε από 600 MPa έως 650 MPa όταν η πλευρική επικάλυψη πήγε από $2d_b$ σε $3,5d_b$. Ωστόσο, στην περίπτωση του σκυροδέματος με $f_c = 134 \text{ MPa}$, η τάση συνάφειας δεν παρουσίασε καμία αλλαγή για πλευρική επικάλυψη $2d_b$ ενώ έφτασε τα 800 MPa για καθαρή επικάλυψη $= 3,5d_b$ (Yuan and Graybeal, 2014).



Διάγραμμα 13: Άμεση ρύθμιση δοκιμής τραβήγματος για τη μέτρηση της διάσπασης συνάφειας και σκυροδέματος (Siakali, 2019)

Επιπλέον, το μοτίβο σχισίματος εξαρτάται από την πλευρική επικάλυψη σκυροδέματος και το διάκενο. Ο διαχωρισμός σκυροδέματος μπορεί να συμβεί στο κάλυμμα ελεύθερου χώρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-22 (α) ή στο σκυρόδεμα μεταξύ των ράβδων ενίσχυσης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-22 (β). Επιπλέον, αναφέρθηκε ότι όταν οι παρακείμενες ράβδοι ενίσχυσης βρίσκονται μακριά από τη βοηθητική ράβδο, δεν παρεμβαίνουν πλέον στην αντοχή της συνάφειας που εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του σκυροδέματος (Yuan and Graybeal, 2014).



Διάγραμμα 14: (α) σε κάλυμμα ελεύθερου χώρου (β) μεταξύ σπλισμού (Yuan and Graybeal, 2014)

Οι τροποποιημένες δοκιμές τραβήγματος πραγματοποιήθηκαν σε UHPC με συμβατικές ράβδους ενίσχυσης (13, 16 και 19 mm) για τρία διαφορετικά μήκη αγκύρωσης που κυμαίνονται μεταξύ 4db και 8db. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η τάση συνάφειας μειώνεται όταν αυξάνεται το μήκος αγκύρωσης. Σημειώθηκε ότι η ράβδος με τη μικρότερη διάμετρο 13 mm ξεπέρασε την αντοχή της για να φθάσει σε αστοχία για όλα τα μήκη αγκύρωσης. Ωστόσο, το δείγμα με τη ράβδο ενίσχυσης 16 mm απέτυχε με το διαχωρισμό και την ανάπτυξη τάσης συνάφειας περίπου 16,7 MPa με μήκος μάτισης 4,8db και 2% Vf. Το δείγμα με ενισχυτική ράβδο 19 mm αντιμετώπισε κωνική αστοχία (Alkaysi and El-tawil, 2016). Έτσι, πραγματοποιήθηκε μια νέα δοκιμή τραβήγματος στο (M13) με A615 βαθμού 60 και (M22) με A615 βαθμού 80 ράβδους ενσωματωμένα σε UHPC για διαφορετικά ματισμένα μήκη (6db έως 10db) και επικάλυψεις (1db έως 3.5db). Τα περισσότερα από τα δείγματα απέτυχαν με τη λειτουργία διαχωρισμού εκτός από τα δείγματα με υψηλή επικάλυψη 3,5db και μικρό μήκος αγκύρωσης 6db που παρουσίασε κωνική αστοχία. Ήταν προφανές ότι η ράβδος ενίσχυσης θα μπορούσε να αποδώσει σε δύο περιπτώσεις: όταν το μήκος μάτισης είναι 8db με υψηλή επικάλυψη από σκυρόδεμα 3db ή όταν το μήκος αγκύρωσης είναι 10db με μικρή επικάλυψη από σκυρόδεμα 1.8db. Επιπλέον, η τάση της ράβδου αυξάνεται με το μήκος ανάπτυξης. ένα δείγμα με επικάλυψη 2db ανέπτυξε τάση ράβδου 280 MPa για μήκος μάτισης 6db σε σύγκριση με 480 MPa για μήκος αγκύρωσης 10db. Επιπλέον, παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση της τάσης συνάφειας με την αύξηση της επικάλυψης. Για μήκος αγκύρωσης 6db, η τάση ράβδου που αναπτύχθηκε κατά την αστοχία απο συνάφεια παρέμεινε στα

280 MPa για επικάλυψη 1,6db και 2db. Έτσι, παρατηρήθηκε μια ελαφρά αύξηση της τάσης συνάφειας από 1,6db (11 MPa) έως 2db (12MPa) (Ronanki et al., 2016).

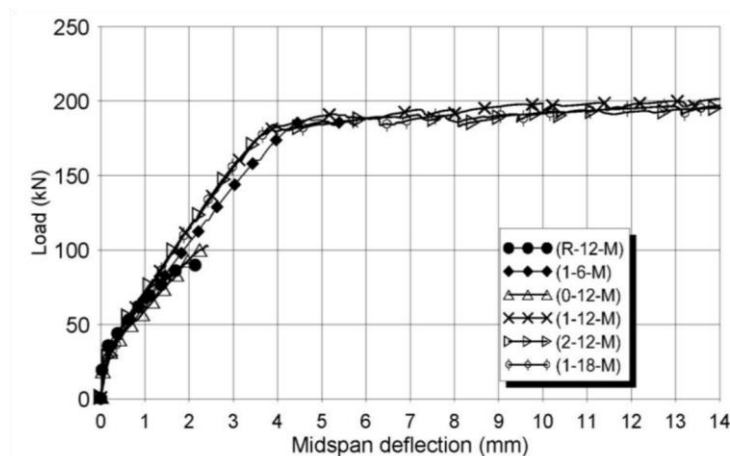
Ο Haber πραγματοποίησε το ίδιο πείραμα όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2-21 για διαφορετικούς τύπους εμπορικών UHPC με μια τυπική ράβδο ενίσχυσης (M16) & Gr.120) και τα μήκη αγκύρωσης κυμαίνονται μεταξύ 8db έως 10db. Ο τρόπος αστοχίας διερευνήθηκε ανάλογα με το κλάσμα όγκου ινών χάλυβα. όπου ξεκίνησε με μια μεγάλη ρωγμή διαχωρισμού για $V_f = 2,5\%$ και πολλαπλές μικρές ρωγμές διαχωρισμού για $V_f = 3,5\%$ και τέλος μια κωνική αστοχία για $V_f = 4,5\%$ (Haber et al., 2018).

Μαζί με την άμεση δοκιμή μήκους ματίσματος, πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές συνάφειας για τη μελέτη της αντοχής της συνάφειας και των τρόπων αστοχίας σε σύγκριση με τις άλλες δοκιμές. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή φορτίου τρίτου σημείου σε πλάκες που παρουσίαζαν μια ράβδο σύνδεσης 10 M ενισχυτικών ράβδων στην περιοχή σταθερής ροπής με την παραλλαγή του μήκους μάτισης μεταξύ 18 mm (1.8db) με παρουσία ενίσχυσης διάτμησης και 26 mm (2,6 db) χωρίς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μήτρα σκυροδέματος περιείχε χονδροειδή αδρανή 2/5 mm και η επικάλυψη ήταν 2 cm. Αποδείχθηκε ότι οι πλάκες με σημαντικό μήκος μάτισης 26 mm και εγκάρσια ενίσχυση ενισχύουν την απόδοση των διαμήκων ράβδων συνοδευόμενων από ρωγμή σκυροδέματος στην περιοχή εφελκυσμού. Ωστόσο, παρουσιάστηκε αστοχία λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στη ζώνη συμπίεσης με μέση εκτροπή να φτάνει τα 23 mm. Παρ'όλα αυτά, η συντομότερη περιστροφή 18 mm χωρίς ενίσχυση διάτμησης απέτυχε με τη διάσπαση συνάφειας κατά μήκος του στυπιοθλίπτη με εκτροπή 18 mm (Weisse and Holschemacher, 2012).

Μια άλλη δοκιμή συνάφειας πραγματοποιήθηκε με μήκος ματίσματος περίπου 6db κάτω από κάμψη τεσσάρων σημείων (M19) και (M22) A615 βαθμού 80 bar για μια σαφές επικάλυψη 1 και 1,5 ίντσες. Ωστόσο, οι δοκοί απέτυχαν από διάτμηση πριν από την αστοχία σε συνάφεια λόγω της λεπτομέρειας του δείγματος (Ronanki et al., 2016).

Τέλος, διεξήχθησαν τεστ τεσσάρων σημείων συνάφειας σε κάμψη ($V_f = 3\%$) με διάμετρο ράβδου ενίσχυσης 25 mm και 35 mm με μήκος μάτισης 6db, 12db και 18db στην περιοχή σταθερής ροπής. Οι δοκοί γεμίστηκαν με UHPC σε ένα μικρό τμήμα της τομής υπό τάση. Αποδείχθηκε ότι το μήκος μάτισης 6db με βάθος επισκευής 1db οδηγεί

σε αστοχία διαχωρισμού. Ωστόσο, αναφέρθηκε ότι αυτό το υλικό θα μπορούσε να καθυστερήσει ή να εξαλείψει αυτόν τον τρόπο αστοχίας για μήκη μάτισης μεγαλύτερα από 12db. Σε αυτήν την περίπτωση, για μήκος ματίσματος 12db και 18db όλες οι ράβδοι ενίσχυσης απέδωσαν και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν μπορούσαν να φτάσουν σε αστοχία. Το Σχήμα 2-23 δείχνει την καμπύλη απόκρισης των δοκών που εμφανίζει μια όλκιμη συμπεριφορά που φτάνει ένα μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο 200 kN για ελάχιστο επισκευασμένο βάθος 1db (Dagenais and Massicotte, 2012).



Διάγραμμα 15: Καμπύλη απόκρισης απόκλισης φορτίου για τις δοκούς (Dagenais and Massicotte, 2012)

Ως σύνοψη όλων των πειραμάτων που συζητήθηκαν προηγουμένως, διεξήχθησαν τρεις τύποι δοκιμών στο UHP-SFRC: τυπική απόσυρση, άμεση απόσπαση σύνδεσης και δοκιμή συναρμογής δοκού. Για την τυπική δοκιμή τραβήγματος, η ισχύς της συνάφειας ήταν εξαιρετικά υψηλή, φτάνοντας τα 60 MPa όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όπου το μήκος αγκύρωσης έπρεπε να μειωθεί στα 1,5db για να αποφευχθεί η αστοχία των ράβδων ενίσχυσης. Όσον αφορά τη δοκιμή άμεσης σύνδεσης, η ισχύς της συνάφειας ήταν περίπου 10-11 MPa. Επιπλέον, και οι δύο δοκιμές απέδειξαν ότι η χρήση του UHPC μειώνει αποτελεσματικά το μήκος μάτισης που απαιτείται για την απόδοση της ράβδου ενίσχυσης: σε τυπικές δοκιμές αποσύρσεως το μήκος μάτισης θα μπορούσε να φτάσει μέχρι τα 2,5db, ενώ για τις δοκιμές άμεσης απόσπασης ήταν περίπου 6db. Αυτό επιτρέπει μια τεράστια βελτίωση για τους μελλοντικούς κώδικες σχεδιασμού, δεδομένου ότι επιτρέπει ολόκληρη την ανάπτυξη της αντοχής της ράβδου ενίσχυσης.

Από τη γνώση του συγγραφέα, δεν πραγματοποιείται δοκιμή συνάφειας σε αγκυρωμένη δοκό στο UHP-FRC για τη μελέτη της ισχύος της συνάφειας. Σε αυτό το πλαίσιο, ο συγγραφέας διεξήγαγε αυτήν τη δοκιμαστική διάταξη για να μελετήσει τα αποτελέσματα αυτού του τύπου δοκιμής συνάφειας και να εμπλουτίσει τη βάση δεδομένων δοκιμής συνάφειας για το UHP-SFRC.

5 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική αυτή διαδικασία περιλαμβάνει την δημιουργία δοκιμίων με διαφορετικά μίγματα που θα ελεγχθούν σε κάμψη εφαρμόζοντας εγκάρσιο φορτίο στη μέση της δοκού και σε θλίψη εφαρμόζοντας κατανεμημένο φορτίο σε επιφάνεια 4x4cm. Σκοπός αυτού του πειράματος είναι η εύρεση ενός μίγματος που θα επιφέρει τις πιο ψηλές αντοχές τόσο σε κάμψη τόσο και σε θλίψη από τα άλλα δοκίμια και στη συνέχεια να γίνει αφαίρεση ενός ποσοστού των αδρανών και πρόσθεση ανακυκλωμένων ελαστικών με μέγεθος κόκκων 0.5-4mm στο συγκεκριμένο δείγμα. Τέλος να εξαχθούν συμπεράσματα και παρατηρήσεις όσο αφορά την μηχανική τους συμπεριφορά.

5.1 Δοσολογία μιγμάτων

Κάθε μείγμα από τα ακόλουθα προορίζεται για δημιουργία 6 δοκιμίων ορθογωνικής διατομής 4x4cm και μήκους 12cm εκτός από τα μείγματα G και H που προορίζονται για δημιουργία 3 κυλινδρικών δοκιμίων το καθένα διαμέτρου 15cm και ύψους 30cm. Εδώ σημειώνεται ότι τα μείγματα G και H υπολογίστηκαν από επιλογή που είχαμε μετά από αποτελέσματα που βγήκαν από τα δοκίμια με το μείγμα C.

5.1.1 Μείγμα A

Πίνακας 2: Δοσολογία μείγματος A

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	1.2300	
Άμμος	1.1366	
Σκωρία υψικαμίνου	0.6155	

Πυριτική παιπάλη	0.2052	
Ύνες χάλυβα μήκους 12mm	0.1664	
Ύνες χάλυβα μήκους 15mm	0.1664	
Ρευστοποιητής (TSIRCO SCA-FLO 43H)	0.0204	
Νερό	0.4099	+ 0.105 = 0.5149 σύνολο

5.1.2 Μείγμα Β

Πίνακας 3: Δοσολογία μείγματος Β

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	1.2300	
Άμμος	1.1366	
Σκωρία υψικαμίνου	0.6155	
Πυριτική παιπάλη	0.2052	
Ύνες χάλυβα μήκους 12mm	0.1664	
Ύνες χάλυβα μήκους 15mm	0.1664	
Ρευστοποιητής (TSIRCO SCA-FLO 43HR)	0.0204	+0.011 = 0.0314 σύνολο
Νερό	0.4099	+0.02 = 0.4299 σύνολο

5.1.3 Μείγμα C

Πίνακας 4: Δοσολογία μείγματος C

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	1.2300	
Άμμος	1.1366	
Σκωρία υψικαμίνου	0.6155	
Πυριτική παιπάλη	0.2052	
Ύνες χάλυβα μήκους 12mm	0.1664	
Ύνες χάλυβα μήκους 15mm	0.1664	
Ρευστοποιητής (OPTIMA G91)	0.0204	+0.011+0.011=0.0424 σύνολο
Νερό	0.4099	+0.023 = 0.4329 σύνολο

5.1.4 Μείγμα D

Πίνακας 5: Δοσολογία μείγματος D

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	1.2300	
Άμμος	1.1366	
Σκωρία υψικαμίνου	0.6155	
Πυριτική παιπάλη	0.2052	
Ύνες χάλυβα μήκους 12mm	0.1664	
Ύνες χάλυβα μήκους 15mm	0.1664	
Ρευστοποιητής (TSIRCO SCA-FLO 43H)	0.0204	0.030 σύνολο
Νερό	0.4099	

5.1.5 Μείγμα E

Πίνακας 6: Δοσολογία μείγματος E

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	1.2300	
Άμμος	1.1366	
Σκωρία υψικαμίνου	0.6155	
Πυριτική παιπάλη	0.2052	
Ύνες χάλυβα μήκους 12mm	0.1664	
Ύνες χάλυβα μήκους 15mm	0.1664	
Ρευστοποιητής (OPTIMAG91)	0.0204	0.050 σύνολο
Νερό	0.4099	

5.1.6 Μείγμα F

Πίνακας 7: Δοσολογία μείγματος F

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	1.2300	
Άμμος	1.1366	
Σκωρία υψικαμίνου	0.6155	
Πυριτική παιπάλη	0.2052	
Ύνες χάλυβα μήκους 12mm	0.1664	
Ύνες χάλυβα μήκους 15mm	0.1664	
Ρευστοποιητής (VISCOCRETE ULTRA-350)	0.0204	0.051 σύνολο
Νερό	0.4099	

5.1.7 Μείγμα G

Πίνακας 8: Δοσολογία μείγματος G

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	3.621	
Άμμος	3.343	
Σκωρία υψικαμίνου	1.8103	
Πυριτική παιπάλη	0.604	
Ίνες χάλυβα μήκους 12mm	0.49	
Ίνες χάλυβα μήκους 15mm	0.49	
Ρευστοποιητής (OPTIMAG91)	0.0625	0.147 σύνολο
Νερό	1.206	

5.1.8 Μείγμα H

Πίνακας 9: Δοσολογία μείγματος H

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Σημειώσεις
Τσιμέντο	3.621	
Άμμος	2.006	
Ανακυκλωμένα ελαστικά	0.491	
Σκωρία υψικαμίνου	1.8103	
Πυριτική παιπάλη	0.604	
Ίνες χάλυβα μήκους 12mm	0.49	
Ίνες χάλυβα μήκους 15mm	0.49	

Ρευστοποιητής (OPTIMA G91)	0.0625	0.17 σύνολο
Νερό	1.206	+0.115= 1.311 σύνολο

5.2 Κατασκευή δοκιμίων

Για την πειραματική διερεύνηση όσο αφορά την αντοχή και την συμπεριφορά του σκυροδέματος υψηλής αντοχής οπλισμένο με ίνες κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο ΧΑΝΙ του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δοκίμια από 8 συνολικά διαφορετικά μείγματα σκυροδέματος. Χρησιμοποιήσαμε καλούπια ορθογωνικών διαστάσεων 4cm x 4cm και μήκους 12cm και κυλινδρικών διαστάσεων 15cm διαμέτρου και 30cm ύψους, με τις δοσολογίες τους να αναγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2.1 Διαδικασία δημιουργίας δοκιμίων

Η διαδικασία ξεκινάει με την προσθήκη των υλικών αφού έχουν ζυγιστεί σε δοχείο όπου πρόκειται να αναμειχθούν. Γίνεται προσθήκη όλων των αδρανών υλικών έκτος από τις χαλύβδινες ίνες οι οποίες θα προστεθούν σε μεταγενέστερο στάδιο.

Πραγματοποιείται η ανάμιξη τους προσθέτοντας σταδιακά το νερό και έπειτα τον ρευστοποιητή. Στη συνέχεια αφού ομογενοποιηθεί το μείγμα προσθέτουμε και τις ίνες ή τα ελαστικά ή και τα δύο μαζί όπου υπάρχουν με σταδιακό ρυθμό και περιμένουμε μέχρι να αναμειχθούν ομοιόμορφα μέσα στο μείγμα μας. Τέλος γίνεται η εισαγωγή του μείγματος μέσα στα καλούπια-μήτρες, έχοντας λαδώσει προηγουμένως τα καλούπια με σκοπό την ευκολότερη εξαγωγή των δοκιμίων από αυτά μετά την σκλήρυνση τους. Την επόμενη μέρα σκληρύνονται αρκετά τα δοκίμια και γίνεται η εξαγωγή τους από τα καλούπια και στην συνέχεια ο υδρεμποτισμός τους μέσα σε βαρέλι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μείγμα.



Διάγραμμα 16: Υλικά



Διάγραμμα 17: Ρευστοποιητές



Διάγραμμα 18: Ανάμειξη των υλικών



Διάγραμμα 19: Ετοιμασία καλουπιών

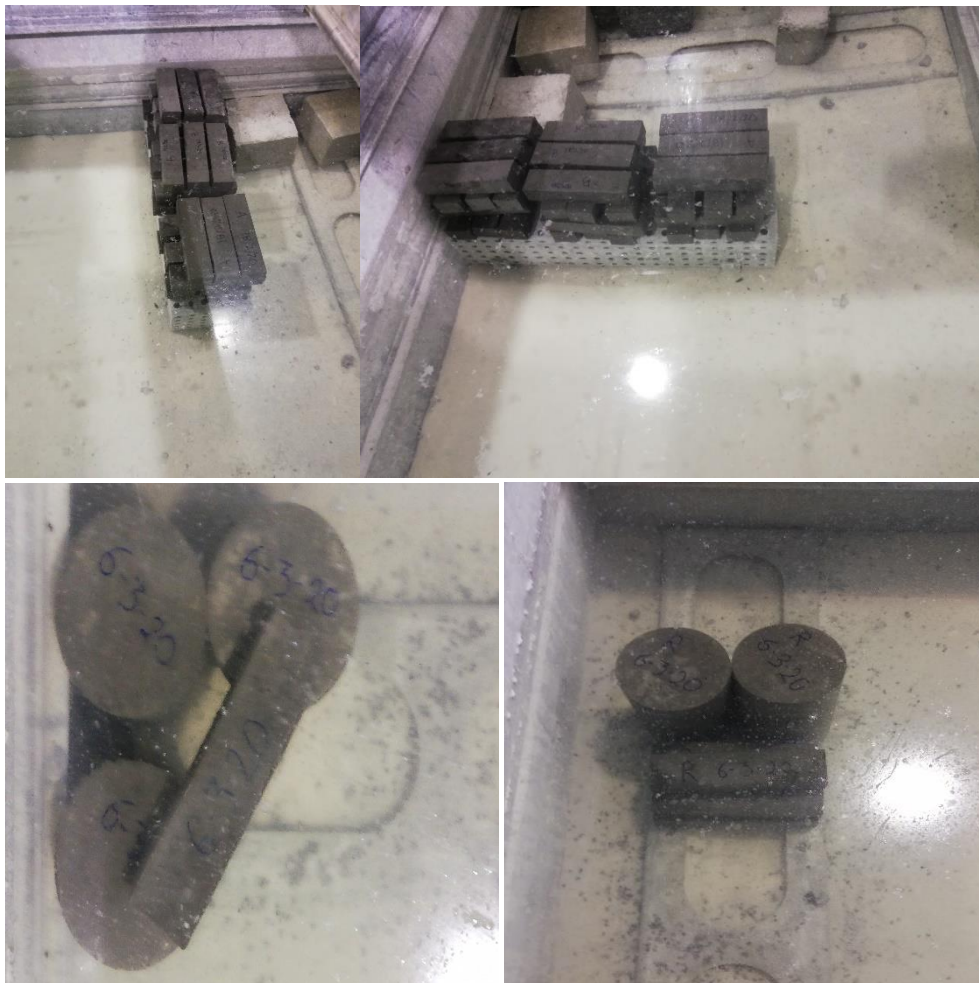


Διάγραμμα 20: Εισαγωγή σκυροδέματος σε καλούπια





Διάγραμμα 21: Εξαγωγή δοκιμίων από τα καλούπια



Διάγραμμα 22: Υδρεμοτισμός δοκιμίων

5.2.2 Υλικά και ιδιότητες

Τσιμέντο Portland EN 197-1 CEM I 52.5 N

Πρότυπο EN 197-1: Σε αυτό το πρότυπο υπάρχει διαδικασία για την μέτρηση της αντοχής σε θλίψη κυβικών δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος πλευράς 40μμ έτσι ώστε να γίνει η κατάταξη του τσιμέντου στις εξής κατηγορίες 32.5, 42.5 και 52.5, με υποκατηγορία N (κανονικής πρώιμης αντοχής) ή R (υψηλής πρώιμης αντοχής). (Τριανταφύλλου, 2013)

Τύπος CEM I: Παράγεται από άλεσμα κλίνκερ το οποίο είναι προϊόν από ψήσιμο ασβεστόλιθου και αργίλου (πρώτες ύλες για παρασκευή κύριων συστατικών του τσιμέντου) με δευτερεύοντα συστατικά(π.χ. φυσική ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία καμίνου, πληρωτικά) σε ποσοστό μέχρι 5% κ.β. (Τριανταφύλλου, 2013)

Άμμος

Είναι αδρανή μικρού μεγέθους τα οποία κατηγοριοποιούνται με τον μέγιστο κόκκο να μην ξεπερνά τα 4mm. Λεπτόκοκκα αδρανή μπορούν να παραχθούν είτε με φυσικές αποσαθρώσεις πετρωμάτων, είτε με σύνθλιψη πετρωμάτων, είτε από επεξεργασία βιομηχανικά παραγόμενων μετάλλων και είναι αποτελούν βασικά συστατικά για την παραγωγή δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα. (Καζαντζίδη, 2016)

Σκωρία υψικαμίνου

Λεπτόκοκκο προϊόν το οποίο παράγεται από την κατεργασία σιδηρομεταλλεύματος σε κλίβανο. Κόκκοι σκωρίας με διάμετρο μικρότερη των 10μm βοηθούν στην ανάπτυξη αντοχής μέχρι τις 28 ημέρες, κόκκοι διαμέτρου 10-45μm παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη αντοχής σε μεγαλύτερες ηλικίες και μεγαλύτεροι κόκκοι ενυδατώνονται πιο δύσκολα. (Τριανταφύλλου, 2013)

Σύμφωνα με την χημική εταιρία BASF (2015) παρέχει στο σκυρόδεμα:

- αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων
- αντίσταση στη προσβολή θεικών
- αντίσταση στην επίθεση από αλκάλια
- αντίσταση στην ενανθράκωση

Ανακυκλωμένα ελαστικά

Λεπτοί κόκκοι από ανακυκλωμένα ελαστικά μεγέθους 0.5-4mm όπου με την προσθήκη τους στο μίγμα αναμένεται η μείωση της αντοχής και ταυτόχρονα η αύξηση της πλαστικότητας και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Πυριτική παιπάλη

Προϊόν από πολύ λεπτούς κόκκους της τάξης του 0.1μm το οποίο δημιουργείται από την οξείδωση και συμπύκνωση ατμών διοξειδίου πυριτίου σε βιομηχανίες πυριτικών μετάλλων και σιδηροπυριτικών κραμάτων. (Τριανταφύλλου, 2013)

Σύμφωνα με την εταιρία TSIRCON (2011) υπάρχουν τα εξής ωφέλη:

- Ισχυρότερο και πυκνότερο σκυρόδεμα
- Το σκυρόδεμα θα δείξει αυξημένες ιδιότητες αντίστασης έναντι χλωριδίων, θεικών, οξέων, γδαρσίματος, παγετού και καταστροφικών αντιδράσεων αλκαλίων πυριτίου.
- Μείωση της διαπερατότητας
- Αντίσταση σε διείσδυση ιόντων χλωριδίου
- Αντίσταση στη διάβρωση
- Αντίσταση σε θειικά άλατα
- Χημική αντίσταση
- Αντίσταση αλκαλικού πυριτίου
- Αντίσταση στην τριβή

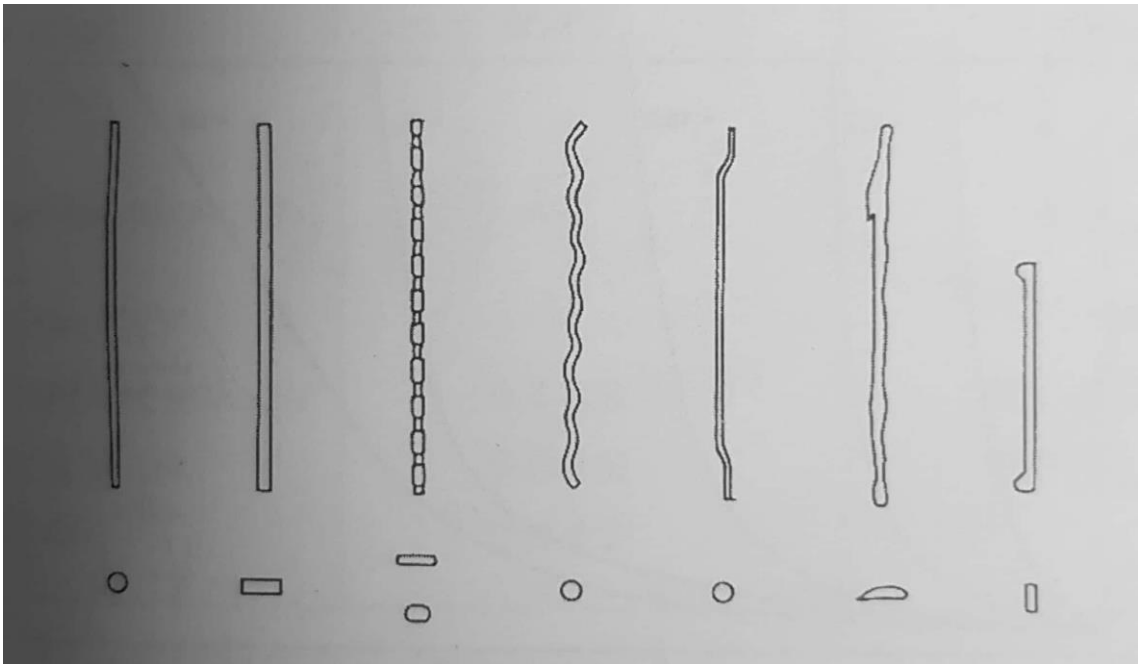
Χαλύβδινές ίνες

Οι χαλύβδινές ίνες είναι οι πιο διαδεδομένες λόγω κόστους και της εμπειρίας που υπάρχει σε αυτές. Υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία μορφών, διατίθενται σε μήκος 12-60mm και με διάμετρο 0.1-0.6mm και η ποσότητα που προστίθεται στο σκυρόδεμα είναι της τάξης των $10-60kg/m^3$. (Τριανταφύλλου, 2013)

Όπως αναφέρει η Κορδή (2012) το σχήμα τους μπορεί να είναι:

- Επίπεδες
- Με γαντζωτά άκρα
- Κυματοειδείς
- Με κωνικά άκρα

- Πτυχωτές, με τομή κυκλική, τετραγωνική ή ακανόνιστη



Διάγραμμα 23: Σχήμα ινών (Τριανταφύλλου, 2013)

Επίσης όσον αφορά τις ιδιότητες των χαλύβδινων ινών είναι οι εξής:

- Αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος
- Μετατροπή ψαθυρού υλικού σε πλαστικό.
- Μείωση της ρειγμάτωσης
- Η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 700 – 2000 MPa.
- Έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 200 GPa

Πίνακας 10: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά των ινών (Τριανταφύλλου, 2013)

Ίνες	Διάμετρος (μm)	Μήκος (mm)	Πυκνότητα (kg/m ³ ×10 ³)	Μέτρο ελαστικ. (GPa)	Λόγος Poisson (-)	Εφελκυστ. αντοχή (MPa)	Παραμορφ. θραύσης (%)	Τυπική αναλογία (% κ.ό.)
Χάλυβας	100-600	10-60	7.86	200	0.28	700-2000	3.5	0.5-2
Ανοξ. χάλ.	10-330	10-60	7.86	160	0.28	2100	3	0.5-2
Πολυπρο- πυλένιο	500-4000	15-75	0.90	3-8	0.30-0.45	400-700	8-25	0.2-1.2
Γυαλί E	8-12	10-50	2.54	72-75	0.25	3500	4.8	2-8
Γυαλί AR	8-12	10-50	2.27	70-76	0.25	2000-3500	3-4.6	2-8
Κέβλαρ 29	12	5-65	1.44	70	0.32	2900	4	0.5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1.45	135	0.32	2900	2.1	0.5-2
Άνθρακας υψηλού E υψηλής f _t	8 9	10-50 10-50	1.90 1.90	380 230	0.35 0.35	1800 2600	0.5 1.2	2-12 2-12
Νάυλον	5-200	5-50	1.14	1-5	0.40	750-900	16-20	0.1-6
Ξύλο	100-5000	5-50	1.50	50-75	0.2-0.4	700-1000	1-2	2-4

Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μήκος (l): 12mm και 15mm,
- Διάμετρος (d): 0.2mm,
- Λόγος μορφής (l/d): 60 και 75 αντίστοιχα
- Εφελκυστική αντοχή: ~ 2000 MPa
- Σχήμα: Επίπεδες

Υπερρυστοποιητές

Είναι μία ειδική κατηγορία χημικών πρόσμικτων που δρουν επιφανειακά και αυξάνουν την ρευστότητα 3-4 φορές παραπάνω από τα συνηθισμένα ρευστοποιητικά μειώνοντας το νερό ανάμειξης που χρειάζεται κατά 20-25% χωρίς να υπάρξει απώλεια ρευστότητας. Επίσης δημιουργούν μια ευρεία διασπορά των κόκκων τσιμέντου και κατ'

επέκταση γρηγορότερη ενυδάτωση του τσιμέντου με αποτέλεσμα την ταχεία πήξη και σκλήρυνση. Τέλος λόγω αυτής της εξαιρετικής διασποράς σκυροδέματα με υπερρρευστοποιητές δίνουν αυξημένες αντοχές. (Τριανταφύλλου, 2013)

Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής υπερρρευστοποιητές:

- TSIRCO-FLO-SCA 43H
- TSIRCO SCA-FLO 43HR
- OPTIMA G91
- VISCOCRETE ULTRA-350

-Όλοι οι ρευστοποιητές, είναι μειωτές νερού υψηλής εμβέλειας με βάση πολυκαρβοξυλικά πολυμερή, οι οποίοι μπορούν να μειώσουν το νερό ανάμειξης που χρειάζεται έως και 40%.

5.3 Εργαστηριακές δοκιμές

5.3.1 Δοκιμή θλίψης

Στην δοκιμή θλίψης τα δοκίμια μας με διαστάσεις 40x40x1200 mm θα ελεγχθούν στο πόσο φορτίο αντέχουν σε θλίψη τα οποία τοποθετούνται στο κέντρο των μεταλλικών πλακών της μηχανής. Αρχικά γίνεται επιβολή θλιπτικού φορτίου 20kN και στη συνέχεια γίνεται αύξηση με σταθερό ρυθμό μεταβολής 0.6Μρα ανα δευτερόλεπτο σύμφωνα με το πρότυπο BS1881-119. Καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής η μηχανή καταγράφει την επιβολή φορτίου σε σχέση με το χρόνο, η μηχανή σταματάει εκεί που έρχεται η θραύση του δοκιμίου, παρουσιάζοντας στην οθόνη το μέγιστο φορτίο και την μέγιστη αντοχή.



Διάγραμμα 24: Μηχανή θλίψης

5.3.2 Δοκιμή κάμψης

Στην δοκιμή κάμψης τα δοκίμια μας με διαστάσεις 40x40x1200 mm θα τοποθετηθούν στη μηχανή κάμψης όπου το κάθε δοκίμιο θα στηρίζεται αμφιέρειστα με την κάθε στήριξη να απέχει 20mm από τα άκρα της δοκού και το επιβαλλόμενο σημειακό φορτίο να εφαρμόζεται σε απόσταση 6cm από τις στηρίξεις, δηλαδή στο κέντρο του κάθε δοκιμίου. Αρχικά γίνεται επιβολή σημειακού φορτίου 200N και στη συνέχεια γίνεται αύξηση με σταθερό ρυθμό μεταβολής 0.6Μρα ανα δευτερόλεπτο σύμφωνα με το πρότυπο BS1881-118. Καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής η μηχανή καταγράφει την επιβολή του σημειακού φορτίου σε σχέση με το χρόνο, η μηχανή σταματάει εκεί που έρχεται η θραύση του δοκιμίου, παρουσιάζοντας στην οθόνη την γραφική παράσταση σημειακό φορτίο- χρόνος. Στη συνέχεια υπολογίζεται η καμπτική αντοχή με την εξίσωση:

$$F_{cf} = \frac{Fxl}{d_1xd_2^2}$$

Όπου

F είναι το φορτίο θραύσης σε N

d_1 και d_2 είναι το πλάτος και το ύψος του δοκιμίου(πλευρικές διαστάσεις)

l είναι η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων σε mm



Διάγραμμα 25: Μηχανή κάμψης

6 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης και θλίψης σε μορφή πινάκων για δοκίμια με μείγμα A,B,C,D,E και F. Τα αποτελέσματα των δοκιμών με μείγμα A, B και C είναι στις 28 ημέρες, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών με μείγμα D, E και F είναι στις 14 ημέρες για να υπάρξει μια προγνωστική εικόνα των αντοχών τους.

6.1 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

6.1.1 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Α

Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα Α

Δοκίμια	Φορτίο θραύσης F(kN)	Καμπτική αντοχή Fcf(Mpa)
1A	9,56	17,9
2A	4,73	8,9
3A	7,13	13,4
4A	9,71	18,2
5A	17,72	33,2
6A	13,70	25,7

Μέσος Όρος φορτίου θραύσης F(kN)	10,43
Μέσος Όρος καμπτικής αντοχής Fcf(Mpa)	19,5

6.1.2 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Β

Πίνακας 12: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα Β

Δοκίμια	Φορτίο θραύσης F(kN)	Καμπτική αντοχή Fcf(Mpa)
7B	14,72	27,6
8B	13,78	25,8
9B	11,25	21,1
10B	14,33	26,9
11B	12,00	22,5
12B	15,50	29,1

Μέσος Όρος φορτίου θραύσης F(kN)	13,60
Μέσος Όρος καμπτικής αντοχής Fcf(Mpa)	25,5

6.1.3 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος C

Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα C

Δοκίμια	Φορτίο θραύσης F(kN)	Καμπτική αντοχή Fcf(Mpa)
13C	4,42	8,3
14C	14,50	27,2
15C	12,97	24,3
16C	13,55	25,4
17C	11,35	21,3
18C	12,70	23,8

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	11,58
Μέσος Όρος καμπτικής αντοχής F _{cf} (Mpa)	21,7

6.1.4 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος D

Πίνακας 14: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα D

Δοκίμια	Φορτίο θράυσης F(kN)	Καμπτική αντοχή F _{cf} (Mpa)
19D	11,00	20,6
20D	15,15	28,4

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	13,08
Μέσος Όρος καμπτικής αντοχής F _{cf} (Mpa)	24,5

6.1.5 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος E

Πίνακας 15: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα E

Δοκίμια	Φορτίο θράυσης F(kN)	Καμπτική αντοχή F _{cf} (Mpa)
21E	11,45	21,5
22E	13,05	24,5

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	12,25
Μέσος Όρος καμπτικής αντοχής F _{cf} (Mpa)	23,0

6.1.6 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος F

Πίνακας 16: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη με μείγμα F

Δοκίμια	Φορτίο θράυσης F(kN)	Καμπτική αντοχή F _{cf} (Mpa)
23F	14,15	26,5
24F	10,60	19,9

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	12,38
Μέσος Όρος καμπτικής αντοχής F _{cf} (Mpa)	23,2

6.2 Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης

6.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Α

Πίνακας 17: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα Α

Δοκίμια	Φορτίο θραύσης F(kN)	Θλιπτική αντοχή f_c (Mpa)
1A	156,904	98,065
2A	104,446	65,279
3A	109,510	68,444
4A	109,198	68,249
5A	172,148	107,593
6A	123,736	77,335

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	129,324
Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής f_c (Mpa)	80,827

6.2.2 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος Β

Πίνακας 18: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα Β

Δοκίμια	Φορτίο θραύσης F(kN)	Θλιπτική αντοχή F_{cf} (Mpa)
7B	219,128	136,955
8B	216,521	135,326
9B	210,795	131,747
10B	142,743	89,214
11B	246,373	153,983
12B	226,118	141,324

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	210,280
Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής f_c (Mpa)	131,425

6.2.3 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος C

Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα C

Δοκίμια	Φορτίο θραύσης F(kN)	Θλιπτική αντοχή F_{cf} (Mpa)
13C	236,985	148,116
14C	202,627	126,642
15C	277,728	173,580
16C	260,173	162,608
17C	239,098	149,436
18C	238,769	149,231

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	242,563
Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής f_c (Mpa)	151,602

6.2.4 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος D

Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα D

Δοκίμια	Φορτίο θράυσης F(kN)	Θλιπτική αντοχή F_{cf} (Mpa)
19D	165,514	103,446
20D	199,341	124,588

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	182,428
Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής f_c (Mpa)	114,017

6.2.5 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος E

Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα E

Δοκίμια	Φορτίο θράυσης F(kN)	Θλιπτική αντοχή F_{cf} (Mpa)
21E	190,920	119,325
22E	230,133	143,833

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	210,527
Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής f_c (Mpa)	131,579

6.2.6 Αποτελέσματα δοκιμών μείγματος F

Πίνακας 22: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη με μείγμα F

Δοκίμια	Φορτίο θράυσης F(kN)	Θλιπτική αντοχή F_{cf} (Mpa)
23F	180,381	112,738
24F	174,265	108,916

Μέσος Όρος φορτίου θράυσης F(kN)	177,323
Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής f_c (Mpa)	110,827

7 Συμπεράσματα

- Εάν παρέχεται επαρκές μήκος αγκύρωσης, η τάση συνάφειας εισέρχεται στην πλαστική φάση, επιτρέποντας στη ράβδο να βιώνει υψηλότερες πιέσεις με ολίσθηση
- Αυτό το καινοτόμο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από όλκιμη ικανότητα
- Η ισχύς της συνάφειας και η ακαμψία αυξάνονται με το χρόνο
- Η αύξηση της αντοχής με το χρόνο παρατηρήθηκε ιδιαίτερα όταν προστίθεται ιπτάμενη τέφρα αντί για πυριτική παιπάλη
- Η ισχύς της συνάφειας εξαρτάται από τη διάμετρο της ράβδου. Ωστόσο, επηρεάζεται ελαφρώς από την επικάλυψη σκυροδέματος
- Μεγαλύτερα μήκη αγκύρωσης οδηγούν στη μείωση των τάσεων συνάφειας
- Η τάση της ράβδου αυξάνεται όταν οι τιμές του σκυροδέματος είναι υψηλότερες
- Παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση της τάσης συνάφειας με την αύξηση της επικάλυψης
- Σύμφωνα με δοκιμές η χρήση του UHPC μειώνει αποτελεσματικά το μήκος μάτισης που απαιτείται για την απόδοση της ράβδου ενίσχυσης: σε τυπικές δοκιμές αποσύρσεως το μήκος μάτισης θα μπορούσε να φτάσει μέχρι τα 2,5db, ενώ για τις δοκιμές άμεσης απόσυρσης ήταν περίπου 6db
- Το σκυρόδεμα υπέρ υψηλής αντοχής παρουσιάζει πυκνότερη δομή λόγω των πολύ λεπτών υλικών και χημικών προσθέτων που το αποτελούν
- Το σκυρόδεμα υπέρ υψηλής αντοχής αντιστέκεται σε διείδυση ιόντων χλωριδίου, στη διάβρωση, σε θειικά άλατα κτλ. και κατά συνέπεια δεν αλλοιώνεται εύκολα το σκυρόδεμα και ο χάλυβας στο χρόνο με αποτέλεσμα να παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά συνάφειας των δύο υλικών σε σχέση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα
- Ράβδοι με τραχεία επιφάνεια έχουν καλύτερη συνάφεια
- Σκυροδέματα μεγαλύτερων αντοχών εκδηλώνουν μεγαλύτερες τάσεις συνάφειας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ACI Committee 408 (2003) *ACI 408R-03 Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension*, American Concrete Institute.
2. Alkaysi, M. and El-tawil, S. (2016) ‘Bond between Ultra-High Performance Concrete and Steel Bars’, c, pp. 1–10.
3. BASF. (2015). *MasterLife SLG 100*. Retrieved April 18, 2020.
4. British standard. (1983). *Testing concrete -Part 118: Method for determination of flexural strength* . Retrieved April 15, 2020.
5. BSI Standards Publication. (2011). *Testing concrete – Part 119: Method for determination of compressive strength using portions of beams broken in flexure (equivalent cube method)*. Retrieved April 15, 2020.
6. Cairns, J. and Plizzari, G. A. (2003) ‘Towards a harmonised European bond test’, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. doi: 10.1617/13887.
7. Dagenais, M. A. and Massicotte, B. (2012) ‘Tension lap slices strengthened with ultra high performance fibre reinforced concrete’, *8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities (BEFIB 2012)*, pp. 198–208. Available at:
http://www.rilem.org/gene/main.php?base=500218&id_publication=419&id_pier=8627
8. Eleftheriou, T. E., Tastani, S. P. and Pantazopoulou, S. J. (2017) ‘Development of Reinforcing Bars in SRCC Matrix: Modeling and Interpretation’, *Journal of Structural Engineering (United States)*. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001845.
9. Federal Highway Administration. (2006). *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*. Retrieved April 24, 2020, from
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/06103/chapt1.cfm#int>
10. Fehling, E., Lorenz, P. and Leutbecher, T. (2012) ‘Experimental Investigations on Anchorage of Rebars in UHPC’, *Proceeding of Hipermat 2012. Third International Symposium on UHPC and Nanotechnology of High Performance Constructions Materials*, pp. 1–8.
11. Haber, Z. B., De la Varga, I. and Graybeal, B. A. (2018) ‘Properties and Behavior of UHPC-Class Materials’, (February).

12. Harajli, M., Hamad, B. and Karam, K. (2002) 'Bond-slip Response of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Concrete', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), pp. 503–511. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(503).
13. Holschemacher, K., Klotz, S. and Weiße, D. (2004) 'Bond of Reinforcement in Ultra HighStrength Concrete', in *Ultra High Performance Concrete (UHPC) Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. doi: 10.14359/14489.
14. Lagier, F., Massicotte, B. and Charron, J. P. (2015) 'Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC', *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.009.
15. Lagier, F., Massicotte, B. and Charron, J. P. (2016) 'Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension', *Cement and Concrete Composites*. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.004.
16. MacGregor, J., & Wight, J. (2005). *Reinforced concrete mechanics and design* (4th ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
17. Ronanki, V. S., Valentim, D. B. and Aaleti, S. (2016) 'Development length of reinforcing bars in UHPC: An experimental and analytical investigation', *First International Interactive Symposium on UHPC*, 4, pp. 1–9. doi: 10.21838/uhpc.2016.85.
18. Saikali, E. R. (2019). Bond Behaviour of Steel Reinforcing Bars Embedded in Ultra-High-Performance Steel Fiber Reinforced Concrete.
19. Schoening, J. and Hegger, J. (2012) 'Lapped splices in UHPC joints', (2003), pp. 687–694.
20. Schmidt, M., & Fehling, E. (2005). *Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe*. ACI Special publication, 228, 51-78.
21. Tastani, S. P. *et al.* (2016) 'The effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on bond of reinforcing bars in strain resilient cementitious composites', *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(2), pp. 214–223. doi: 10.1007/s11709-016-0332-3.
22. Tastani, S. P. and Pantazopoulou, S. J. (2010) 'Direct Tension Pullout Bond Test: Experimental Results', *Journal of Structural Engineering*, 136(6), pp. 731–743. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943541X.0000159.
23. Tastani, S. P. and Pantazopoulou, S. J. (2013) 'Reinforcement and Concrete Bond: State Determination along the Development Length', *Journal of Structural Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000725.
24. Tastani, S. and Pantazopoulou, S. (2002) 'Experimental evaluation of the direct tension-pullout bond test', in *Bond in concrete from research to standards*.
25. TSIRCON. (2011). *TSIRCO-MICROSILICA*. Retrieved April 18, 2020.

26. Vitek, J. L., Coufal, R. and Čítek, D. (2013) 'UHPC - Development and testing on structural elements', in *Procedia Engineering*. doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.033.
27. Weisse, D. and Holschemacher, K. (2012) 'Behaviour of lap splices in ultra high strength concrete', (Figure 1), pp. 695–702.
28. Yuan, J. and Graybeal, B. A. (2014) 'Bond Behavior of Reinforcing Steel in Ultra-High Performance Concrete', *Engineering Structures*, 1(6), pp. 228–235. doi: 10.1159/000331754.
29. Βαρδακούλιας, Ι. Κ. (2012). *Μελέτη μεταλλικής πεζογέφυρας* (Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012).
30. Κατσαϊδώνης, Α. Γ., Κυρίτσης, Θ. Α., & Χατζηβασιλείου, Α. Α. (2005). *Συμπεριφορά κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε ακραίες συνθήκες σεισμού και πυρκαγιάς*.
31. Κκολός, Α. (2018). Μάθημα 1: Εισαγωγή. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός.
32. Κκολός, Α. (2018). Μάθημα 2: Χαρακτηριστικά του χάλυβα. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός.
33. Καζαντζίδη, Δ. (2016). *Επίπτωση των αργιλικών προσμίξεων άμμου σκυροδέματος στις μηχανικές ιδιότητές του*. (Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016).
34. Κορδή, Ρ. (2014). *Πειραματική διερεύνηση θλιπτικής και καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος*. (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014).
35. Μαρκεσίνη, Β. (2017). *Βέλτιστος σχεδιασμός δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα έως και υπέρ-υψηλής αντοχής/απόδοσης*. (Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017).
36. Μπουγιούκας, Ι. Γ. (2008). *Πειραματική διερεύνηση της συνάφειας ράβδων οπλισμού σκυροδέματος σε μονότονη φόρτιση* (Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008).
37. Μηλιώνης, Π., & Σίνγκ, Τ. (2016). *Πειραματική και θεωρητική, με την χρήση ANSYS, διερεύνηση της αντοχής σε κάμψη ινοπλισμένων δοκών με διαφορετικό ύψος και ποσοστό ινών*. (Πτυχιακή εργασία, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τ.Τ. 2016).
38. ΠΕΝΕΛΗΣ, Γ., & ΚΑΠΠΙΟΣ, Α. (1990). *ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ*. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΖΗΤΗ.

39. Sika. (2019). *Παραγωγή σκυροδέματος περισσότερα από 100 χρόνια ανθεκτικότητας*. Retrieved April 23, 2020, from https://grc.sika.com/dms/getdocument.get/9418ea7a-e9fd-3e03-a542-ae3ffb2b833/HE_00434_More%20than%20100%20Years%20of%20Durability_gr.pdf
40. Τριανταφύλλου, Α. (2013). *Δομικά Υλικά* (10th ed.). Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
41. *Χάλυβας*. El.wikipedia.org. (2020). Retrieved 26 April 2020, from <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82>.