

## **ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ SFRC ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΩΝ(ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΕΩΝ)**

**Ν.Μαρκαντωνάτος-Κ.Δεμαρτίνος**

### **Περίληψη**

*Στην εργασία αυτή ανακεφαλαιώνονται τα σημαντικότερα υλικά, καθώς και οι ιδιότητες τους, που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ινοπλισμένου σκυροδέματος. Κατόπιν, περιγράφονται η σύνθεση και τροποί εφαρμογής του ινοπλισμένου σκυροδέματος, και τελικά παρουσιάζεται μια μελέτη με βάση της θεωρίας της Μηχανικής των Θραύσεων για τη συμπεριφορά του οπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος (SFRC) και την ικανότητα του σε διάτμηση.*

### **1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το σκυρόδεμα που συντίθεται από υδραυλικά τσιμέντα, λεπτόκοκκα η/και χονδρόκοκκα αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες ορίζεται ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών, και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα του χιλιοστού, και διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την αναμίξη των συστατικών του, σε ποσοστό της τάξης του 1-3% κ.ο. Συνήθως παρασκευάζονται από χάλυβα, πολυπροπυλενίου ή γυαλιού, ενώ εφαρμογές βρσκουν και ίνες από άλλα υλικά, όπως ο άνθρακας, η αραμιδίδη, ο πολυεστερας, το ναυλον, και φυσικά υλικά, όπως το ξυλο. Ο βασικός ρολός των ινών στο σκυρόδεμα είναι η αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία (που σχετίζεται με εφελκυστικές τάσεις) και ο περιορισμός γενικά της ρηγμάτσης (π.χ. λόγω συστολής ξήρανσης), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται και (μικρή συνήθως) αύξηση της αντοχής. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστοτητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητας του να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση, που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο απλο. Τα τελευταία χρόνια οι χρήσεις του ΙΝΟ.Σ. έχουν επεκταθεί σε παρά πολλές κατηγορίες έργων πολιτικού μηχανικού λόγω των βελτιωμένων μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του σε σύγκριση με το συμβατικό άοπλο σκυρόδεμα.

### **2.ΥΛΙΚΑ**

#### **2.α.Είδη ινών**

Τυπικές ιδιότητες για διάφορες τεχνητές ίνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα δίνονται στο πίνακα 2.1. Οι πιο διαδεδομένες ίνες σκυροδέματος είναι οι ίνες χάλυβα. Διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία μορφών, όπως αυτές του Σχ.2.1. Αρκετά διαδεδομένες επίσης είναι και οι ίνες πολυπροπυλενίου, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της χημικής τους αδρανείας. Οι ίνες αυτές είναι συνήθως συσσωματωμένες σε ομάδες και όχι μεμονωμένες, για να βελτιώνεται η συνάφεια με το σκυρόδεμα και να διευκολύνεται ο διασκορπισμός τους κατά την αναμίξη. Προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσότητα που κυμαίνεται μεταξύ 0,5-2kg/m<sup>3</sup>. Οι ίνες γυαλιού Ε είναι αρκετά διαδεδομένες και είναι χαμηλού κόστους, αλλά βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι προσβάλλονται από το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Περισσότερο ανθεκτικές στο περιβάλλον αυτό είναι οι ίνες

N.Μαρκαντώνάτος-Κ.Δεμαρτίνο

γαλιού AR, που όμως κοστίζουν αρκετά παραπάνω. Το αρκετά υψηλό κόστος των ινών άνθρακα και αραμιδής έχει εμποδίσει μέχρι σήμερα την ευρεία χρήση τους σε κατασκευές σκυροδεματος, παρόλο που η επίδραση τους στο υλικό έχει ιδιαίτερα ευνοϊκά αποτελέσματα (ιδιαίτερα των ινών άνθρακα).

Επιθυμητά χαρακτηριστικά των ινών για τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος είναι: μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, που επιτρέπει μεταφορά τάσεων από το σκυροδέμα στις ίνες, λόγος Poisson παρόμοιος με αυτόν του σκυροδέματος, ώστε να μην προκαλείται αποκόλληση των ινών, μεγάλος λόγος μήκους προς διάμετρο (l/d), ώστε η αστοχία των ινών να γίνεται με εξόλκευση και όχι με θραύση, και να αυξάνεται το έργο παραμόρφωσης και όσο το δυνατόν πιο παραμορφωμένη επιφάνεια, ώστε να βελτιώνεται η συνάφεια τους με το σκυροδέμα και να αυξάνεται το φορτίο που απαιτείται για την αποκόλληση και εξόλκευση τους. [2]



σχ. 2.1 τυπικές μορφές ινών χάλυβα

Ίνες	Διαμέτρος (μm)	Μήκος (mm)	Πυκνότητα (Kg/m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> )	Μετρ. Ελαστικ. (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκ. αντοχή (MPa)	Παραμόρφ. θραύσης (%)	Τυπική αναλογία (% κ.ο)
Χάλυβας	100-600	10-60	7,86	200	0,28	700-2000	3,5	0,5-2
Ανοξ. Χαλ.	10-330	10-60	7,86	160	0,28	2100	3	0,5-2
Πολυπρο- πυένιο	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	10	5-65	1,44	70	0,32	2900	2,1	0,5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1,45	135	0,35	2900	2,1	0,5-2
Άνθρακας								
υψηλού E	8	10-50	1,90	380	0,35	1800	0,5	2-12
υψηλής f <sub>t</sub>	9	10-50	1,90	230	0,35	2600	1,2	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

πιν 2.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ

### 1.β. Μηχανικά χαρακτηριστικά ΙΝΟ.Σ.

Η αποτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΙΝΟ.Σ. γίνεται με τη βοήθεια του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης πρότυπου δοκιμίου. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται δυο πιθανά διαγράμματα απόκρισης ΙΝΟ.Σ., ενώ το τρίτο διάγραμμα αναφέρεται στην απόκριση αντιστοίχου δοκιμίου άοπλου σκυροδέματος της ίδιας σύνθεσης.

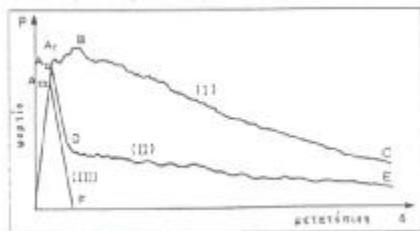
Και τα τρία διαγράμματα διαθέτουν έναν περίπου ελαστικό κλάδο, καθώς η δυσκαμψία του δοκιμίου ελάχιστα επηρεάζεται από τις ίνες. Το τέλος του ελαστικού κλάδου (σημείο Α)

ορίζει την αντοχή πρώτου ρήγματος  $f_{ct}$ , το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται κυρίως από τις ιδιότητες του σκυροδέματος (περιεκτικότητα σε τσιμεντο, διαβαθμιση αδρανων, συντελεστής υδατος-τσιμεντου, περιεκτικότητα αερα, πυκνοτητα κ.λ.π.) και δευτερευόντως από την ποσότητα των ινών. Υψηλά ποσοστά ινών αυξάνουν το όριο αναλογίας, υπό την προϋπόθεση της καλής διαβάθμισης των αδρανών και της επαρκούς συμπίκνωσης του αναμειγματος. Η αύξηση, όμως, αυτή δεν είναι τόσο σημαντική, ώστε να δικαιολογεί τη δαπάνη της χρήσης ινών.

Μετά το πρώτο ρήγμα, το ΙΝΟ.Σ. με υψηλό ποσοστό ινών (I) παρουσιάζει μικρή βελτίωση αντοχής μέχρι το σημείο B που ορίζει την οριακή αντοχή του. Αντίθετα, το δοκίμιο (II) με χαμηλό ποσοστό ινών καθώς και το δοκίμιο (III) του άοπλου σκυροδέματος δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη βελτίωση αντοχής, η οριακή δηλαδή αντοχή τους συμπίπτει με την αντοχή του πρώτου ρήγματος. Για μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζεται πτώση του αναλαμβανόμενου φορτίου (φθινοντες κλαδοι στο σχήμα 1.2), διαφορετικής όμως ταχύτητας για κάθε δοκίμιο. Στο δοκίμιο (I) η πτώση είναι ομαλή και οδηγεί σε πλαστικού τύπου αστοχία (κλάδος B-C), στο δοκίμιο (III) είναι απότομη και οδηγεί σε ψαθυρού τύπου αστοχία (κλάδος A<sub>III</sub>-F), ενώ στο δοκίμιο (II) είναι ενδιάμεσου τύπου, καθώς μεσολαβεί ένα πτωτικό άλμα (κλάδος A<sub>II</sub>-D) και κατόπιν εξελίσσεται ομαλά (κλάδος D-E) υπό μικροτερο, όμως, φορτίο έναντι του δοκιμίου (I).

Αντίθετα από το συμβατικά οπλισμένο σκυροδεμα, η αστοχία προκαλείται κατά κανόνα από την εξολκευση και όχι από τη διαρροή των ινών, η τάση των οποίων υπό το μέγιστο φορτίο είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από την τάση διαρροής τους. Ενώ, όμως, τις περισσότερες φορές η εξολκευση είναι φαινόμενο ψαθυρού χαρακτήρα, η συνεχής άνοδος του ρήγματος σε καμπτομενα στοιχεία και η συνακόλουθη ενεργοποίηση και εξολκευση νέων ινών οδηγούν σε σταδιακή (και όχι απότομη) πτώση αντοχής με την αύξηση των μετατοπίσεων, φαινόμενο δηλαδή που εμπεριέχει πλαστικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνήθως αποτιμώνται ποσοτικά με την ενέργεια που απορροφάται μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή μετατοπίσης, δηλαδή με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μέχρι την υπόψη μετατοπίση. Πειραματικά στοιχεία αποδεικνύουν ότι η ενέργεια που απορροφάται μέχρι την πλήρη αποδιοργάνωση του δοκιμίου είναι 10-40 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του άοπλου δοκιμίου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η ιδιότητα αυτή του ΙΝΟ.Σ. να απορροφά σημαντική ενέργεια αποτελεί τον κύριο λόγο ανάπτυξης και χρήσης του ΙΝΟ.Σ. σε περιπτώσεις όπου το άοπλο σκυροδεμα θεωρείται ανεπαρκές λόγω αδυναμίας να προσφέρει έστω και στοιχειώδη πλαστιμότητα, ενώ το συμβατικά οπλισμένο σκυροδεμα, που διαθέτει βέβαια επαρκή πλαστιμότητα, είναι δύσκολο η δαπανηρό να εφαρμοστεί.

Συμπερασματικά λοιπόν, για δεδομένη σύνθεση σκυροδέματος, η μορφή αστοχίας εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό, τη γεωμετρία, την κατανομή και τις συνθήκες σνάφειας των ινών με το σκυροδεμα. Οι τελευταίες εξαρτώνται τόσο από τη μορφή των ινών (κυρίως από τη διαμόρφωση των ακρών τους αλλά και από το λόγο μορφής, δηλαδή το λόγο μήκους προς διάμετρο ίνας) όσο και από τη σύνθεση του σκυροδέματος. Εξαιτίας των πολλών παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα είναι φανερό ότι είναι δύσκολη η θεωρητική προσέγγιση πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ΙΝΟ.Σ. Για το λόγο αυτό προς το παρόν χρησιμοποιούνται θεωρητικά προσομοιώματα τόσο από τη μηχανική των θραύσεων όσο και από τη θεωρία των σύνθετων υλικών, υποβοηθούμενα όμως απαραίτητα από πειραματικά στοιχεία.



Σχ 2.2 Σημαντικά χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης κατά το πρότυπο ASTM C 1018-89

### 1.γ.Δείκτες μηχανικής συμπεριφοράς

Όπως προαναφερθηκε, το πλέον χαρακτηριστικό μέγεθος προς αποτίμηση είναι η ενέργεια που απορροφάται κατά την κάμψη ενός δομικού στοιχείου μέχρι μια συγκεκριμένη μετατόπιση. Ενδιαφέρουσες επίσης, αλλά δευτερεύουσας σημασίας είναι η αντοχή πρώτου ρήγματος και η οριακή αντοχή σε κάμψη. Για τις ανάγκες της προτυποποίησης των απαιτήσεων θεσπίστηκαν διάφοροι δείκτες μηχανικής συμπεριφοράς, οι συνηθέστεροι από τους οποίους σχολιάζονται παρακάτω.

#### -Αμερικανικά πρότυπα

Απο ιστορική αποψη, ο πρώτος δείκτης ενεργειακής συμπεριφοράς προτάθηκε από τον Henegar. Ο δείκτης αυτός, που υιοθετήθηκε από την επιτροπή ACI 544 και αναφέρεται σε πρότυπα δοκίμια δοκού, ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφάται για μετατόπιση 1,9mm (0.075in) προς την ενέργεια που αντιστοιχεί στο πρώτο ρήγμα. Στην πρόταση αυτή μπορούν να εντοπιστούν δυο αδύνατα σημεία:

α) Ο δείκτης είναι σχετικά ευαίσθητος ιδίως ως προς τον παρανομαστή του, επειδή από πειραματική άποψη υπάρχει αντικειμενική δυσκολία ακριβούς καθορισμού του σημείου ρηγματώσεως. Η αδυναμία αυτή αναφέρεται τόσο στο μέγεθος του φορτίου ρηγματώσεως, που δεν συμπίπτει πάντα με το οριακό φορτίο, όσο και στην ακρίβεια των οργάνων μέτρησης της αντίστοιχης μετατόπισης, που είναι της τάξης μερικών εκατοστών το χιλιοστού.

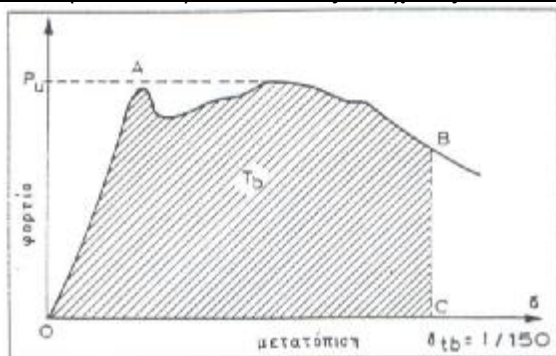
β) Το όριο μετατόπισης των 1,9mm είναι αυθαίρετο και σχετικά μεγάλο, 30 φορές περίπου μεγαλύτερο από τη μετατόπιση ρηγματώσεως. Στην πραγματικότητα, το όριο μετατόπισης δεν πρέπει να είναι σταθερό, αλλά να καθορίζεται με βάση τις απαιτήσεις λειτουργικότητας κάθε έργου. Βελτίωση του παραπάνω δείκτη αποτελεί η πρόταση του πρότυπου ASTM C 1018-89. Στην πρόταση αυτή περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής δοκιμίων, καθορίζεται η γεωμετρία τους, η ταχύτητα φόρτισης και ο μετρητικός εξοπλισμός, παρέχονται οδηγίες για τον προσδιορισμό του σημείου ρηγματώσεως και ορίζονται διάφοροι δείκτες για την αξιολόγηση της απόκρισης του δοκιμίου.

#### -Ιαπωνικό πρότυπο

Το πρότυπο JCI-SF4 καθορίζει δυο δείκτες συμπεριφοράς:

α) Την οριακή αντοχή  $f_u$  (και όχι την αντοχή πρώτου ρήγματος) που ορίζεται ως η ορθή τάση υπό το μέγιστο φορτίο  $P_u$ .

β) Την ισοδύναμη τάση  $f_s$  (equivalent flexural strength) που ορίζεται ως η τάση υπό το μέσο φορτίο έως μετατόπιση ίση προς το 1/150 του ανοίγματος  $l$  της δοκού. Παρά το όνομα της, η στη αυτή υποκρύπτει ένα ενεργειακό μέγεθος, καθώς το μέσο φορτίο ισούται με το εμβαδόν OABC προς το μήκος 1/150 (σχήμα 2.3).



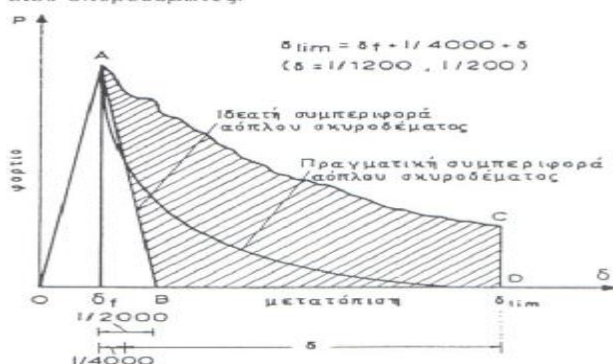
Σχ 2.3 Ορισμός δεικτών σύμφωνα με τον κανονισμό JCI-SF4

Είναι φανερό ότι το ιαπωνικό πρότυπο είναι απαλλαγμένο από τις επιπτώσεις της ανακρίβειας των μετρήσεων στις πολύ μικρές μετατοπίσεις, έχει όμως το μειονέκτημα ότι η ισοδύναμη τάση αναφέρεται σε πολύ μεγάλη μετατόπιση, π.χ. για τυπικές δοκούς ανοίγματος  $l=450\text{mm}$  η οριακή μετατόπιση είναι  $3\text{mm}$ . Κατά συνέπεια δεν είναι σε θέση να περιγράψει απαιτήσεις λειτουργικότητας που αντιστοιχούν σε μικρές μετατοπίσεις.

#### -Γερμανικό πρότυπο

Το γερμανικό πρότυπο, όπως εξάλλου και άλλα ευρωπαϊκά πρότυπα, καθορίζει με περισσότερο αντικειμενικό τρόπο το φορτίο και τη μετατόπιση πρώτου ρηγματός. Επιπλέον, προτείνει έναν ενδιαφέροντα δείκτη, ο οποίος προσπαθεί να αντικατοπτρίσει κυρίως τη πρόσφορα των ινών στην απορρόφηση ενέργειας μετά το πρώτο ρήγμα. Η ισοδύναμη τάση υπολογίζεται όπως και στο ιαπωνικό πρότυπο, αφού όμως πρώτα έχει εξαιρεθεί η ενέργεια του αντιστοίχου άοπλου σκυροδέματος.

Έτσι (σχήμα 2.4), υπολογίζεται ενέργεια OACD που απορροφάται από το δοκίμιο μέχρι μια ορισμένη μετατόπιση  $\delta_{lim}$  και κατόπιν αφαιρείται η ενέργεια OAB του αντιστοίχου δοκιμίου από άοπλο σκυροδέμα που, κατά παραδοχή, συμπεριφέρεται ως διγραμμικό υλικό με φθίνοντα κλάδο. Κατόπιν, υπολογίζεται το ισοδύναμο φορτίο  $P_{eq} = (εμβ. BACD / \delta)$  και η αντίστοιχη ισοδύναμη τάση. Με το τρόπο αυτό εξουδετερώνεται ο βαρύνων της μετατόπισης ρηγματώδης στον ορισμό διάφορων δεικτών, δεν απαιτείται η κατασκευή προσθέτων δοκιμίων άοπλου σκυροδέματος και επιπλέον, με κατάλληλη επιλογή της μετατόπισης  $\delta$ , μπορεί κανείς να επικεντρώσει το ενδιαφέρον του σε συγκεκριμένα όρια λειτουργικότητας.



Σχ 2.4 Απορρόφηση ενέργειας κατά το γερμανικό πρότυπο

#### -Πρόταση της EFNARC

Ενώ οι παραπάνω δείκτες ορίζουν ως πρότυπα δοκίμια τα δοκίμια δοκών, η πρόταση της EFNARC ορίζει δοκίμια πλακών με το σκεπτικό ότι οι κύριες εφαρμογές του ΙΝΟ.Σ. αναφέρονται σε επιφανειακά στοιχεία και κατά συνέπεια είναι ορθότερο να αποτιμώνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους σε αντίστοιχα δοκίμια. Επιπλέον, οι ίνες συνεισφέρουν σε τουλάχιστον δυο διευθύνσεις, ενώ τα δοκίμια δοκών λαμβάνουν υπόψη τη λειτουργία κατά μια μόνο διευθύνση. Σημαντικό είναι επίσης, το γεγονός ότι μειώνεται η συμμετοχή των

διατμητικών παραμορφώσεων που στα δοκίμια δοκών είναι αξιόλογη λόγω μικρού σχετικά ανοίγματος διατμησης. Τα δοκίμια που ορίζονται είναι πλάκες επιφάνειας 0,60x0,60m και πάχους 0,10m που εδράζονται περιμετρικά σε ελευθέρως στρεπτές στηρίξεις ανοίγματος 0,50m και φορτίζονται με φορτίο στο μέσον τους, κατανεμημένο σε επιφάνεια 0,10x0,10m. Η αποτίμηση των δοκιμίων γίνεται με τον υπολογισμό της ενέργειας που αντιστοιχεί σε μετατόπιση του μέσου ίση προς 25mm, δηλαδή ίση προς το 1/20 του ανοίγματος λ της πλάκας.

### Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών

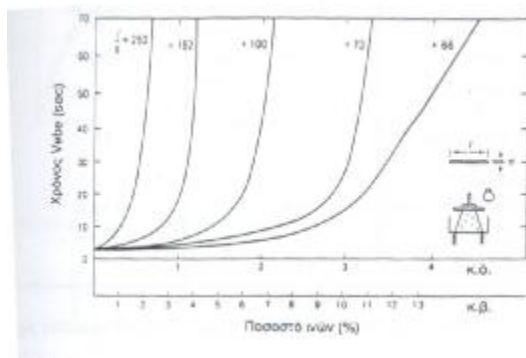
Από την παρουσίαση και το σχολιασμό των κυριότερων δεικτών της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- α) Οι μέχρι σήμερα προταθέντες δείκτες δεν έχουν κοινή βάση, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μη συγκρίσιμα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά του ΙΝΟ.Σ.
- β) Οι δείκτες, που χρησιμοποιούν ως βασική παράμετρο τη μετατόπιση πρώτου ρηγματος, έχουν σημαντική πιθανότητα ανακρίβειων, ιδιαίτερα μάλιστα όταν για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται συγχρόνως μικρή σχετικά τιμή της οριακής μετατόπισης.
- γ) Η χρήση δοκιμίων πλακών έναντι των δοκιμίων δοκών φαίνεται ότι είναι περισσότερο ρεαλιστική για τις συνήθεις εφαρμογές της πράξης.
- δ) Ανεξάρτητα από τον υπό προσδιορισμό δείκτη, κυρίως όμως για τον προσδιορισμό δεικτών με βασική παράμετρο τη μετατόπιση πρώτου ρηγματος, απαιτείται συγχρόνως εξοπλισμός υψηλής ακρίβειας μετρήσεων για μεγάλο φάσμα μετατοπίσεων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη συνεκτίμηση της ενδοτικότητα των στηρίξεων που μερικές φορές είναι σχετικά σημαντική. [1]

## 3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ

### 3.α. Συνθεση

Η χρήση ινών στο σκυρόδεμα επιφέρει γενικά μείωση της εργασιμότητας, που είναι ανάλογη του ποσοστού ινών. Η σημαντική μείωση της ρευστότητας του νωπού σκυροδεματος, ακόμα και για μικρά ποσοστά ινών, είναι χαρακτηριστική, αρκεί να αναφερθεί ότι ποσοστό ινών χάλυβα ή γυαλιού γύρω στο 1,5% κ.ο. μπορεί να μειώσει την καθίσει από 200mm σε 25mm, χωρίς όμως να μειώνεται αναλογικά και η ευκολία διασταύρωσης ή συμπυκνώσεως. Γι αυτό η δόκιμη καθίσει θεωρείται ακατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας του σκυροδεματος, ενώ πιο κατάλληλη θεωρείται η δόκιμη Vebe. Η επίδραση του λόγου (l/d) και του ποσοστού ινών χάλυβα στο χρόνο Vebe δίνεται στο Σχ.3.1.



Σχ 3.1 Επίδραση ποσοστού ινών και λόγου μήκους προς διάμετρο στο χρόνο Vebe

Είναι σαφές ότι αύξηση των παραμέτρων αυτών έχει δυσμενή αποτελέσματα για την εργασιμότητα, ενώ όπως προαναφέρθηκε βελτιώνει τη μηχανική συμπεριφορά. Επίσης έχει

αποδειχθεί ότι, τουλάχιστον για ίνες χαλύβα, λόγοι (l/d) πάνω από 100 προκαλούν αλληλεμπλοκές ινών και συσσωματώσεις που επιφέρουν ανομοιογένεια στη μάζα του σκυροδέματος, γιαυτό και πρέπει να αποφευχθούν. Γενικά ο λόγος (l/d=100) καθώς και το ποσοστό ινών 2% κ.ο. θεωρούνται άνω όρια για τις ίνες χάλυβα.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του ΙΝΟ.Σ. είναι η αύξηση του μέγιστου κόκκου αδρανών, που δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20mm. Τέλος, οι απαιτήσεις για καλή εργασιμότητα περιλαμβάνουν τη χρήση προσθέτων (π.χ. αερακτικά, ρευστοποιητικά), την αύξηση της ποσότητας τσιμεντοπολτού και τη χρήση ινών που είναι κολλημένες μεταξύ τους (ανά ομάδες των 10-30) με υδατοδιαλυτή κολλά.

Ο πίνακας 3.1 δίνει το εύρος τυπικών αναλογιών σύνθεσης ινοπλισμένου σκυροδέματος, βάσει των Αμερικανικών Προδιαγραφών (ACI 544.1R-82). Για σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα δίνεται ο πίνακας 3.2, που δείχνει ότι για δεδομένο λόγο N/T η απαιτούμενη ποσότητα τσιμεντοπολτού είναι μεγαλύτερη στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο. Γενικά, σε σύγκριση με το άοπλο, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει περισσότερο τσιμεντο, μεγαλύτερο ποσοστό λεπτών αδρανών και χονδρά αδρανή με μικρότερο κόκκο. Για κάθε τύπο ινών η βέλτιστη σύνθεση προσδιορίζεται με διαδοχικές δοκιμές, φορτίζοντας να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής, εργασιμότητας και ανθεκτικότητας σε διάρκεια. [2]

	Μέγιστος κόκκος 10mm	Μέγιστος κόκκος 20 mm
τσιμέντο(kgr/m <sup>3</sup> )	350-580	290-500
Λόγος N/T	0,35-0,45	0,40-0,50
% Λόγος προς χονδρά αδρανή	45-60	45-55
Εγκλωβισμένος αέρας (%)	4-7	4-6
ποσοστό ινών (%)		
παραμορφ. ίνες χάλυβα	0,4-0,9	0,3-0,8
λείες ίνες χάλυβα	0,9-1,8	0,8-1,6
ίνες γυαλιού	0,3-1,2	

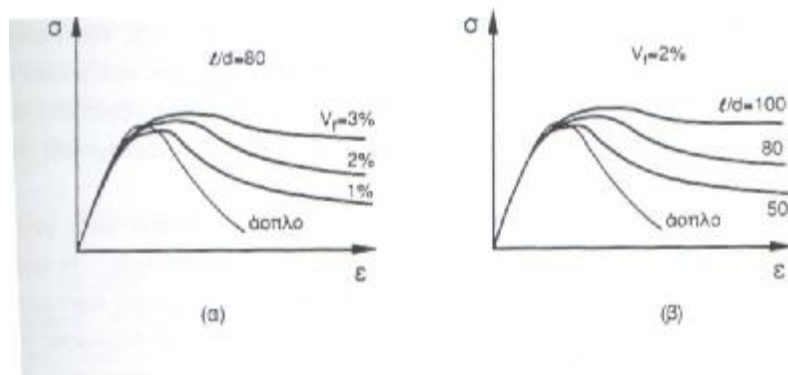
Πιν 3.1 ενδεικτικές αναλογίες σύνθεσης χαλυβο-ινοπλισμένου σκυροδέματος

Υλικό	άοπλο σκυρ.	ινοπλ. σκυρ
τσιμέντο	440	510
νερό(N/T=0.45)	200	230
λεπτά αδρανή	850	750
χονδρά αδρανή	670	600
ίνες χάλυβα 2% κ.ο		150

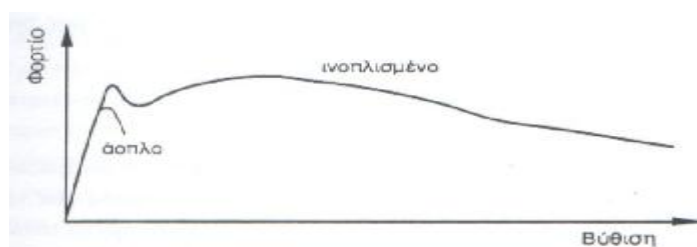
Πιν 3.2 Συγκριτική σύνθεση ινοπλισμένου και άοπλου σκυροδέματος (kgr/m<sup>3</sup>)

### 3.β.Ιδιότητες

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η αύξηση αντοχής του σκυροδέματος λόγω προσθήκης ινών είναι μικρή. Η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται από ελάχιστα έως καθόλου (μάλιστα μπορεί και να μειωθεί όταν προκαλείται σημαντική μείωση της εργασιμότητας), ενώ οι αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη αυξάνονται λίγο περισσότερο. Η ευεργετική δράση των ινών αφορά βασικά τη δυσθραυστικότητα, που αυξάνεται με το ποσοστό των ινών και το λόγο l/d. Χαρακτηριστικά της επίδρασης των ινών στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι τα αποτελέσματα των Σχ.3.2-3.3, που αφορούν σκυροδέματα οπλισμένα με λείες ίνες χάλυβα.



Σχ 3.2  
Επίδραση  
α)ποσοστού  
ινών χάλυβα  
και  
β)λόγου l/d  
στη θλιπτική  
αντοχή



Σχ 3.3  
Επίδραση  
ινών στη  
συμπεριφορά  
σε κάμψη

Η εφελκυστική αντοχή  $f_{frc,t}$  (σε Μρα) του ΙΝΟ.Σ. υπολογίζεται βάσει της εφελκυστικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος,  $f_{ct}$ , και του ποσοστού ινών κ.ο.,  $V_f$ , ως εξής:

$$F_{frc,t} = A f_{ct} (1 - V_f) + B V_f l / d$$

όπου  $A$  = σταθερά περίπου ίση με 1 (ακριβέστερα μεταξύ 0,85-0,97) και  $B$  = σταθερά που εξαρτάται από τη συνάφεια μεταξύ ινών και σκυροδέματος και από τον προσανατολισμό των ινών, με τιμή γύρω στο 3.

Λόγω της σημαντικής δυσθραυστοτητας, το ΙΝΟ.Σ. χαρακτηρίζεται από αντοχή σε κρούση που ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του άοπλου, μέχρι και τέσσερις φορές, αναλογα με το ποσοστό και τον τύπο ινών (οι παραμορφωμένες ίνες δίνουν, γενικά, ευνοικότερα αποτελέσματα). Για τον ίδιο λόγο, αυξημένη είναι και η αντοχή σε κόπωση, κατά 30-90% περίπου έναντι αυτής του άοπλου. Εδώ σημειώνεται και η μείωση του πλάτους των ρωγμών λόγω κόπωσης.

Η επίδραση των ινών στο μέτρο ελαστικότητας είναι αμελητέα, ενώ μερικές φορές μπορεί να γίνει και δυσμενής, λόγω μείωσης της εργασιμότητας που μπορεί να επιφέρει εγκλωβισμένο αέρα. Οι παραμορφώσεις λόγω συστολής ξήρανσης και ερπυσμού είναι περίπου οι ίδιες με τις αντίστοιχες του άοπλου σκυροδέματος, ενώ γενικά ο έλεγχος της ρηγματώδης είναι καλύτερος.

Η ανθεκτικότητα του ΙΝΟ.Σ. σε διάρκεια είναι γενικά πολύ καλή, κυρίως λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε τσιμεντο. Η τυχόν διάβρωση των ινών χάλυβα είναι μόνον επιφανειακή και χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις, επειδή η διάμετρος των ινών είναι μικρή, και επομένως οι τάσεις λόγω διόγκωσης που προκαλούν τα οξείδια σιδηρού είναι αμελητέες. Οι δυσμενείς επιπτώσεις του αλκαλικού περιβάλλοντος του σκυροδέματος στις ίνες γυαλιού  $E$  επεκτείνονται και σε άλλους τύπους ινών, όπως είναι οι περισσότερο φυσικές ίνες και οι ίνες από ορισμένα συνθετικά πολυμερή. [1]

### 3.γ. Τρόποι εφαρμογής

α) Αεροστατική εφαρμογή



Αυτή η μέθοδος είναι βολική όταν οι ίνες περιέχονται σε λιγότερο από 1% κ.ο. Οι ίνες και το κονίαμα αντλούνται και εκτοξεύονται σε αυτή τη μέθοδο.

β) Μέθοδος αρχικής ανάμειξης

Αυτή είναι μια συμβατική μέθοδος ανάμειξης. Αυτή η μέθοδος βρέθηκε για να είναι λιγότερο αποτελεσματική από ότι η μέθοδος του ψεκασμού. Σε αυτή τη μέθοδο οι ίνες είναι αναμειγμένες στο κύλινδρο ανάμειξης μαζί με τσιμέντο πριν η μετά τη προσθήκη νερού. Οι ίνες προστίθενται με μικρή προσθήκη. Η εργασιμότητα εξαρτάται από το μέγεθος του συνόλου, ογκος ινών κ.α.

γ) Μέθοδος ψεκασμού (εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα)

Σε αυτή τη μέθοδο το τσιμεντοκονίαμα και οι ίνες ψεκάζονται ταυτόχρονα πάνω στο καλούπι. Είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος εφαρμογής στην Ελλάδα. Προδιαγραφές για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δίνονται στο Παράρτημα Β

δ) Στερεοποίηση

Για στερεοποίηση, χρησιμοποιείται συνήθως λεπτός δονητής. Παρόλα αυτά, ο δονητής δεν ενδείκνυται καθότι μπορεί να αφήσει τρύπες στην επιφάνεια τους σκυροδέματος. [3]

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία του FRC μεγάλωσε κατά πολύ μεγάλο βαθμό το εύρος των εφαρμογών. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται μερικές από αυτές ανάλογα με το είδος των ινών. [4],[5]

Τύπος ινών	Εφαρμογές
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, κατάστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμιάντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Ανθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή οροφών, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Φυσικές ίνες (ίνα καρύδας, sisal, ζαχαροκάλαμο, bamboo)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους-αντιπαρέχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι

#### 5. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (SFRC) ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΩΝ-ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΕΩΝ.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει εξεταστεί ευρέως ως προς τη συμπεριφορά του σαν υλικό και οι περισσότερες προτάσεις για τη δημιουργία ενός σκεπτικού για το σχεδιασμό του στηρίζονται στην κυβική αντοχή του σκυροδέματος, που εξακολουθεί να είναι η βασική παράμετρος στις αρχές σχεδιασμού πολλών χωρών. Αντ' αυτού στο Leipzig αναπτύχθηκε μια

N.Μαρκαντωνάτος-Κ.Δεμαρτίνογ

καινούρια θεωρία βασισμένη σε παραμέτρους της Μηχανικής των Θραύσεων (Μ.Θ.).Οι παράμετροι αυτοί είναι η ενέργεια θραύσης  $G_f$  και το χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch}$ .

Με βάση αυτή τη θεωρία τα δεδομένα ,που εξήχθησαν από πειράματα άμεσου εφελκυσμού ,για την ικανότητα παραμόρφωσης του SFRC σε σχέση με την ποσότητα των ινών και την κυβική αντοχή του σκυροδέματος οδήγησαν σε ένα θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ικανότητας παραμόρφωσης και των μεγεθών της Μ.Θ.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τριγωναμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα του SFRC και κάποια παραδείγματα υπολογισμού της ικανότητας σε διάτμηση λεπτών δοκών με διαφορετικό ποσοστό ινών χάλυβα.

## 5.1 Μηχανική των Θραύσεων

Η Μηχανική των θραύσεων μελετά την αστοχία των κατασκευών, η οποία προκαλείται από την ύπαρξη αρχικών ρωγμών. Εξετάζεται η εντατική κατάσταση στα άκρο της ρωγμής, τα κριτήρια διάδοσης της ρωγμής, η επίδραση της δυναμικής φόρτισης, της κόπωσης και οι μικροσχηματισμοί αστοχίας των υλικών.

Σαν ενέργεια θραύσης  $G_f$  ορίζεται η ενέργεια που χρειάζεται για τη θραύση του υλικού,ή αλλιώς για τη δημιουργία μιας μονάδας ρηγματωμένης επιφάνειας.(Hillerborg,1985) και σαν χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch}$  ο λόγος  $G_f E/f_t^2$  (Hillerborg,1975),όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $f_t$  η εφελκυστική αντοχή.Το χαρακτηριστικό μήκος είναι ιδιότητα που εκφράζει την θραύση για κάθε υλικό και δείχνει ότι η ευθραυστότητα αυξάνει με την αύξηση της αντοχής και μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας που χρειάζεται για την θραύση.Περιγραφή των βασικών αρχών της Μ.Θ. και ιστορική εξέλιξη της θεωρίας της παρατίθεται στο παράρτημα Β.

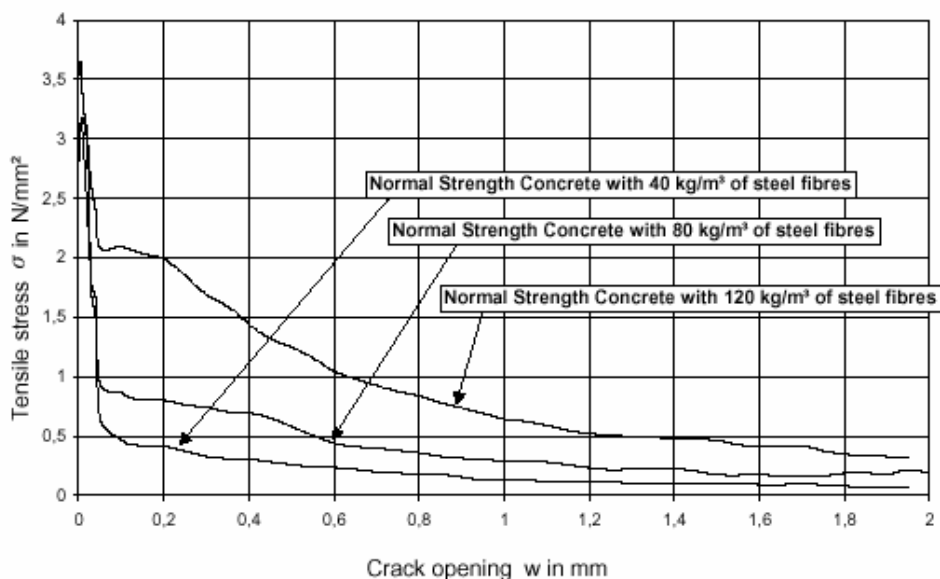
## 5.2 Συμπεριφορά του SFRC υπό φόρτιση

Λόγω των ιδιοτήτων τους οι ίνες του χάλυβα δεν επηρεάζουν καθόλου τις διάφορες παραμέτρους της αντοχής του σκυροδέματος.Υπό θλιπτική φόρτιση,όταν εμφανίζονται μικρορωγμές εξαιτίας εγκάρσιων εφελκυστικών δυνάμεων,οι ίνες του χάλυβα προκαλούν δυνάμεις που τείνουν να κλείσουν τις ρωγμές.Αφ' ενός το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής.Αφ' ετέρου όμως η ανάμιξη των ινών στο σκυρόδεμα προκαλεί αύξηση του πορώδους με αποτέλεσμα τη μείωση της θλιπτικής αντοχής.Κατά συνέπεια οι δύο αυτές δράσεις αλληλοαναιρούνται.Εξάλλου πειράματα έδειξαν ότι οι ίνες δεν επηρεάζουν και την άμεση εφελκυστική αντοχή,αφού παρουσιάστηκε θραύση μετά την εμφάνιση της τελικής ρωγμής.Μόνο η αντοχή σε λυγισμό αυξάνεται λίγο μετά την ανάμειξη των ινών του χάλυβα.

Σαν συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι τα πλεονεκτήματα του SFRC δεν βρίσκονται σε ότι έχει να κάνει με την αντοχή του υλικού συγκριτικά με το απλό ενισχυμένο σκυρόδεμα.

Ωστόσο οι ίνες του χάλυβα αυξάνουν σημαντικά την ολκιμότητα και την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την πλαστιμότητα του.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την ολκιμότητα Σκυροδέματος Κανονικής Αντοχής (NSC) ενισχυμένου με ίνες χάλυβα που υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση.

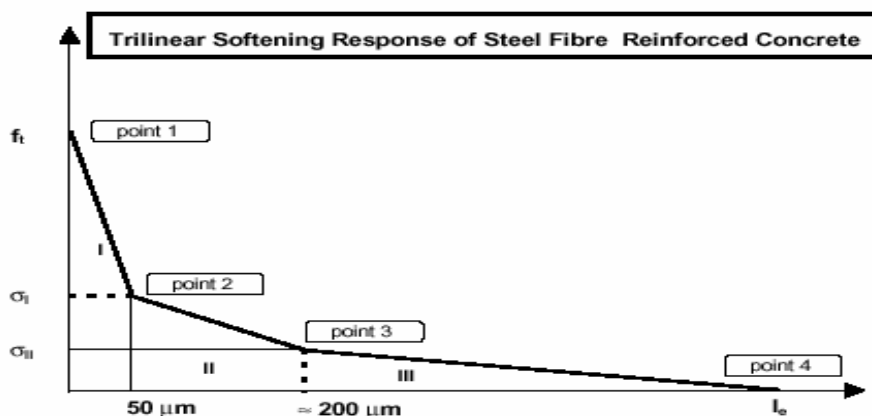


Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ποσότητας των ινών και της γεωμετρίας τους αναπτύχθηκε ένα τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα.

#### 5.4 Τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα για SFRC

Το τριγραμμικό μοντέλο βασίζεται στις προτάσεις του Muller, ο οποίος υπολόγισε την διασπορά των δυνάμεων στις ίνες σε σχέση με το άνοιγμα της ρωγμής. Υπέθεσε μια σταθερή διανομή της έντασης στους δεσμούς σκυροδέματος-ινών. Μετά την ρηγμάτωση εφελκυστική ένταση ασκείται στις ίνες μέχρι να ξεπεραστεί η αντοχή του δεσμού. Έπειτα οι ίνες διαχωρίζονται από το υλικό. Στο τριγραμμικό μοντέλο αυτός ο μηχανισμός συνδυάζεται με την αντίδραση του σκυροδέματος να μειώσει αυτή την ένταση.

Παρακάτω φαίνεται το τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα και ξεχωρίζονται οι τρεις διαφορετικοί του κλάδοι.



N.Μαρκαντώνας-Κ.Δεμαρτίνος

Στον πρώτο κλάδο (I) το σκυρόδεμα μόνο του αναλαμβάνει την μεταφορά της έντασης. Στη συνέχεια στο δεύτερο κλάδο (II) συνεργάζεται με τις ίνες του χάλυβα για την ανάληψη αυτή. Με την αύξηση του πλάτους της ρωγμής η επιρροή του σκυροδέματος στην αντοχή μειώνεται ραγδαίως. Έχει σημειωθεί ότι το όριο του ανοίγματος ρωγμής για το οποίο το σκυρόδεμα είναι ενεργό στην μεταφορά δύναμης είναι 160-250 μm, ανάλογα με την κυβική αντοχή του σκυροδέματος και το είδος των αδρανών. Κατά συνέπεια στον τρίτο κλάδο (III) οι ίνες δρουν μόνες τους.

Τα 4 χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος υπολογίζονται ως εξής:

Επειδή οι ίνες του χάλυβα δεν επηρεάζουν καθόλου τις παραμέτρους της αντοχής, το σημείο 1 (point 1) στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

$$f_t = 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_c}{10}\right) \quad (1)$$

όπου

$f_t$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

$f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Ο δεσμός μεταξύ της μήτρας του σκυροδέματος και των ινών αστοχεί όταν το πλάτος ρωγμής είναι περίπου 50 μm. Η αντίστοιχη τάση  $\sigma_1$  μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση 2. Ο μειωτικός συντελεστής της επιρροής των ινών, ένεκα του τυχαίου προσανατολισμού τους στο χώρο εκτιμάται ότι είναι 0,30

$$\sigma_1 = f_{t2} \cdot \left(1 - \frac{0,05}{w_2}\right) + 0,30 \cdot \eta_{vol} \cdot \sigma_\tau \cdot \left(1 - \frac{0,05}{l_E}\right) \quad (2)$$

όπου

$f_{t2}$  είναι = 0,70 N/mm<sup>2</sup> για σκυρόδεμα με αμμοχάλικο

είναι = 0,85 N/mm<sup>2</sup> για σκυρόδεμα με χονδρόκοκκα αδρανή

$w_2$  είναι το άνοιγμα της τελικής πριν τη θραύση ρωγμής

$\eta_{vol}$  είναι το ποσοστό των ινών επί του όγκου

$\sigma_\tau$  είναι η τάση στις ίνες κατά τον διαχωρισμό-εξίσωση 3

$l_E$  είναι το μέσο μήκος δεσμού ινών σκυροδέματος, περίπου 0,25 \*  $l_{ivas}$

$$\sigma_\tau = 4 \cdot \frac{l_E}{d_f} \cdot \tau_m \quad (3)$$

όπου

$d_f$  είναι η διάμετρος των ινών

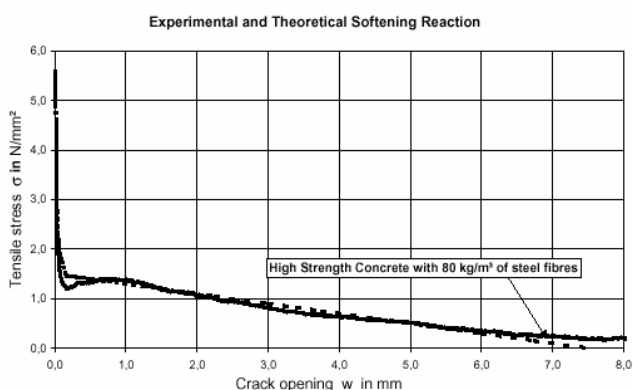
$\tau_m$  η μέση τιμή της τάσης στο δεσμό κατά τον διαχωρισμό

Μετά το χαρακτηριστικό πλάτος ρωγμής  $w_2$ , οι ίνες του χάλυβα αναλαμβάνουν την μεταφορά της έντασης. Η τάση  $\sigma_{II}$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 4

$$\sigma_{II} = 0,30 \cdot \eta_{Vol} \cdot \sigma_r \cdot \left( 1 - \frac{W_2}{l_E} \right) \quad (4)$$

Όταν το πλάτος ρωγμής φτάσει το ¼ του μήκους της ίνας, η ίνα διαχωρίζεται από την μήτρα και η μεταφορά έντασης διακόπτεται.

Με τις παραπάνω 4 εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση (πλάτος ρωγμής) σε σχέση με την ένταση του SFRC και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα της ενέργειας θραύσης με την ολοκλήρωση του διαγράμματος. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών άμεσου εφελκυσμού.



#### 5.4 Ικανότητα σε διάτμηση δοκών από SFRC

Οι μέθοδοι υπολογισμού της διατμητικής αντοχής μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες

Η πρώτη κατηγορία έχει να κάνει με τον καθορισμό της αντοχής μέσω εμπειρικών παραμέτρων που βασίζονται σε πειραματικά συμπεράσματα. Αυτός ο τρόπος ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, μόνο όταν οι πραγματικές παράμετροι ταυτίζονται με τις πειραματικές.

Η δεύτερη κατηγορία έχει να κάνει με μαθηματικά μοντέλα που στηρίζονται στη Μηχανική των Θραύσεων.

Το πραγματικό κριτήριο για τη διατμητική αστοχία είναι η δημιουργία μιας διαγώνιας ρωγμής που εκτείνεται από το σημείο φόρτισης μέχρι τη στήριξη. Αυτή η υπόθεση είναι μια απλοποίηση που υποδηλώνει ότι μόνο μία ρωγμή είναι υπεύθυνη για την αστοχία. Με την μηχανική των θραύσεων η μεταφορά της έντασης στη κρίσιμη διατμητική ρωγμή μπορεί να υπολογιστεί

Με την εξέλιξη της θεωρίας αυτής (λεπτομέρειες Παράρτημα Β) ο Hillerborg παρέθεσε μία εξίσωση που εκφράζει την εξάρτηση της διατμητικής αντοχής με το χαρακτηριστικό μήκος

$$V_u \approx \sqrt[4]{I_{ch}} \quad (5)$$

Με το τριγωνικό μοντέλο τάσης-μετατόπισης μπορεί να προσδιοριστεί η ενέργεια θραύσεως  $G_f$  καθώς και το χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch}$  για το SFRC. Αυτοί οι παράμετροι επιτρέπουν τον υπολογισμό ενός αναλογικού συντελεστή  $f$  και κατ' επέκταση της διατμητικής αντοχής. Παρακάτω φαίνονται οι θεωρητικές εκτιμήσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. [6]

Concrete type	$l_{ch}$ in mm	$f$	$V_{calc}$ in kN	$V_{exp}$ in kN	$\Delta$
NSC + 0 kg/m <sup>3</sup>	292,3	1,00	-	95,6	-
NSC + 40 kg/m <sup>3</sup>	3237,4	1,82	174,0	179,9	0,97
NSC + 40 kg/m <sup>3</sup>	3470,6	1,73	165,4	176,6	0,94
HSC + 0 kg/m <sup>3</sup>	318,8	1,00	-	121,5	-
HSC + 40 kg/m <sup>3</sup>	3728,2	1,87	227,2	226,4	1,00
HSC + 80 kg/m <sup>3</sup>	7071,4	2,27	275,4	252,5	1,09

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Καινοτομίες στο σχεδιασμό, που συχνά καθιερώνουν την ανάγκη για νέα δομικά υλικά, έκαναν το ινοπλισμένο σκυρόδεμα πολύ δημοφιλές. Το ενδεχόμενο της αυξημένης εφελκυστικής αντοχής και αντίστασης στην κρούση προσφέρει πιθανές μειώσεις στο βάρος και στο πάχος των δομικών στοιχείων και λογικά μειώνει την εμφάνιση φθορών κατά τη μεταφορά και το χειρισμό. Μέσω της Μηχανικής των Θραύσεων συντελείται πρόοδος στην εύρεση ενιαίων αρχών σχεδιασμού για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο επειδή ακόμη δεν έχει επιτευχθεί αυτός ο στόχος θα πρέπει ακόμη να βασιζόμαστε στην εμπειρία και την κρίση του σχεδίαστη και κατασκευαστή των ινών, που έχουν εύθυνη να αντιλαμβάνονται τους περιορισμούς που υπάρχουν σε μερικά από αυτά τα συνθετικά υλικά.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1]. Αξιολόγηση Δεικτών Μηχανικών Χαρακτηριστικών Δοκιμών Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, Κ. Στυλιανίδης, Κ. Β. Παπανικολάου, Θ. Σαλονικιός (Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, Ι, τευχ. 2, 1998)
- [2] Προηγμένες τεχνολογίες υλικών και κατασκευών, Θ. Χ. Τριανταφύλλου, Πάτρα 2002
- [3] Fiber Reinforced Concrete and its applications, Dhruva Tripathi (πηγή internet)
- [4] Natural fibre reinforced concrete blocks, David Stephens, 20<sup>th</sup> WEDC Conference (AFFORDABLE WATER SUPPLY AND SANITATION), Colombo, Sri Lanka, 1994
- [5] Fibre Reinforced Concrete, J.J Beaudoin (πηγή internet)
- [6] Design Principals for Steel Fibre Reinforced Concrete – A Fracture Mechanics Approach  
Lars Kutzing, Gert Konig