

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ  
ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑΝΝΑ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια ανάδειξης των μηχανικών χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες από χάλυβα και των πλαστικών υλικών καθώς και των χρήσεων τους στις ενισχύσεις κατασκευών. Δίνεται η βελτίωση του ενισχυμένου στοιχείου έναντι του παλαιού στοιχείου μέσω των οποίων εξάγονται συμπεράσματα για την ορθή επιλογή ενίσχυσης. Γίνεται επίσης αναφορά στις τεχνικές ενίσχυσης είτε για ινοπλισμένο σκυρόδεμα είτε για πλαστικά υλικά και δίνονται συστάσεις για την εφαρμογή τους.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ανάγκη βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του συμβατικού σκυροδέματος οδήγησαν την έρευνα σε ένα νέο είδος σκυροδέματος, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ΙΟΠ, FRC). Το ΙΟΠ μπορεί να περιέχει ίνες από χάλυβα (SFRC) και ίνες από πλαστικά υλικά, όπως αμιάντο (AFRP), γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP). Οι ίνες αυτές είναι ομοιόμορφα διάσπαρτες με τυχαίο προσανατολισμό. Η ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα του προσδίδει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως στις επισκευές και ενισχύσεις των κατασκευών αλλά και το πεδίο εφαρμογών διευρύνεται διαρκώς. Η εργασία που παρουσιάζεται εδώ έχει ως στόχο τη παρουσίαση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αυτού και η εφαρμογή τους στις ενισχύσεις κατασκευών.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

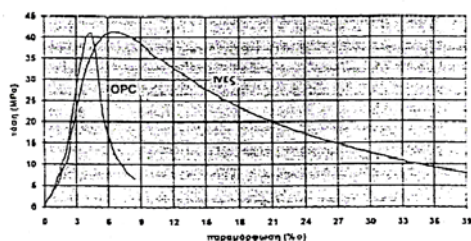
Το πρότυπο ASTM A 820 προδιαγράφει για τις ίνες ελάχιστη αντοχή 345 MPa, μήκος ινών από 12,5~63,5mm και ο λόγος μήκος ίνας προς διάμετρο από 30~100 (για κυκλική διατομή φθάνει τη τιμή 50). Επίσης οι ίνες πρέπει να είναι καθαρές και να μην έχουν σκουριάσει. Οι τυπικές ιδιότητες των ινών από χάλυβα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Είδος ίνας	Διάμετρος (μm)	Ειδικό βάρος (g/cm <sup>3</sup> )	Αντοχή εφελκυσμού (GPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μήκυνση θραύσεως (%)
Χάλυβας	5-500	7,8	0,5-2	210	0,5-3,5

**Πίνακας 1**

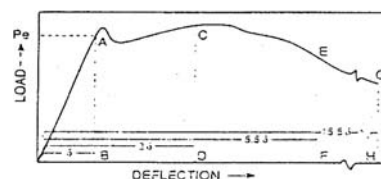
Τυπικές ιδιότητες ινών από χάλυβα

Σημαντικό είναι να επιτευχθεί η απαραίτητη υψηλή συνάφεια γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ίνες όχι λείες και ευθύγραμμες αλλά με διάφορα γεωμετρικά σχήματα, τα οποία αυξάνουν την αγκύρωση των άκρων τους. Επιπλέον για την προστασία του χάλυβα των ινών από τη διάβρωση προτιμούνται ίνες γαλβανισμένες ή από ανοξείδωτο χάλυβα.



**Σχήμα 1**

Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος



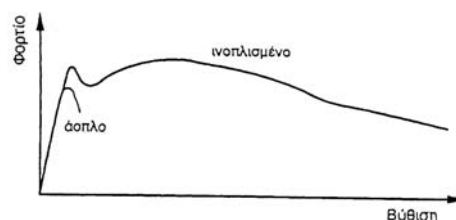
**Σχήμα 2**

Τυπικό διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες

- Το ΙΟΠ λόγω της σταδιακής ενεργοποίησης των ινών αποκτά **πλάστιμη συμπεριφορά** έναντι της ψαθυρής συμπεριφοράς του συνήθους σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν τη αστοχία (σχ.2). Η **αύξηση της δοσολογίας των ινών** μπορεί να βελτιώσει τη πλαστιμότητα μέχρι και 20%. Οι μικρότεροι **διάμετροι** (της τάξης των 0.5mm) και οι **μεγαλύτεροι λόγοι μήκους /διάμετρο** (της τάξης των 60) δίνουν καλύτερα αποτελέσματα (μέχρι και 30%) ενώ **ίνες με διαφορετική μορφή**, είτε κυματοειδή είτε με άγκιστρα στα άκρα, μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τη πλαστιμότητα κατά 15% (σχ.1).
- Οι ίνες εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών λόγω της πρόσφυσης μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος και της πυκνότητας των ινών. Λειτουργούν σα “γέφυρες” και μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής. Κατά τη μεταβίβαση αυτή μπορεί να μεσολαβήσει αυτοίανση ή επιφανειακές επεμβάσεις. Έτσι προστατεύεται ο οπλισμός από **διάβρωση**.
- Η πλάστιμη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος του προσδίδει **αύξηση αντοχής σε εφελκυσμό και κάμψη**. Σημαντική επίσης ιδιότητα είναι η βελτιωμένη συμπεριφορά του μετά τη πρώτη ρηγμάτωση καθώς μετά την επιβολή του μέγιστου φορτίου το φορτίο μειώνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης (σχ.3). Η αντοχή του αξονικού εφελκυσμού βελτιώνεται κατά 30~40% για ποσοστά ινών μέχρι 2% κ.ο. ενώ η διαξονική εφελκυστική αντοχή τριπλασιάζεται σε σχέση με του άοπλου σκυροδέματος. Ωστόσο η εφελκυστική αντοχή δεν αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των ινών, όπως θα περίμενε κανείς. Η βελτίωση της ετερόσημης διαξονικής αντοχής αποδίδεται σε κάποιο βαθμό στη **περίσφιξη** που επιβάλλει η εγκάρσια θλιπτική τάση και στην γεωμετρία των ινών με αγκύρωση στα άκρα ενώ στην ομόσημη η εγκάρσια εφελκυστική τάση χειροτερεύει τις συνθήκες αγκύρωσης των ινών. Η αύξηση αντοχής σε κάμψη φθάνει το 50~70%.

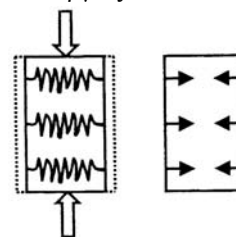
**Σχήμα 3**

Επίδραση ινών στη συμπεριφορά σε κάμψη



**Σχήμα 4**

Προσομοίωση λειτουργίας των ινών



- Η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτή του άοπλου. Έχει εκτιμηθεί **αύξηση θλιπτικής αντοχής** 15%. Οι ίνες λειτουργούν ως κινηματικός περιορισμός έναντι της διόγκωσης του σκυροδέματος (σχ.4). Η **ισοδύναμη τάση** περισφίξεως του σκυροδέματος λόγω των ινών ισούται με την **αύξηση θλιπτικής αντοχής**.

# ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

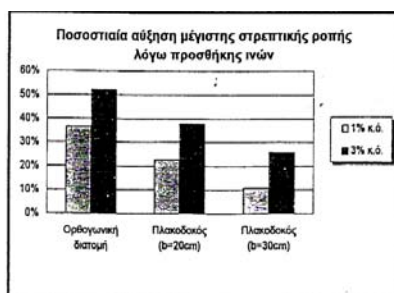
- Η ενσωμάτωση ινών στο σκυρόδεμα βελτιώνει την ικανότητα του να αναλαμβάνει την **επιφανειακή τέννουσα**. Η ύπαρξη θλιπτικής δύναμης δίνει 4~6 φορές βελτιωμένη αντοχή για ποσοστό ινών 1% κ.ο. ενώ ανάλογη αύξηση δεν παρατηρείται για ποσοστό ινών 1,5% κ.ο. (πιν.2). Αυτό ίσως να οφείλεται στην μειωμένη εργασιμότητα του νωπού υλικού και συνεπώς στην μειονεκτική συμπίκνωση. Η αύξηση αντοχής σε τέννουσα είναι 70% μεγαλύτερη από την αντοχή του συνήθους σκυροδέματος για ίνες με αγκυρωμένα άκρα ενώ για ίνες ευθύγραμμες η αύξηση αντοχής είναι μισή.

Σειρά	Τύπος Δοκιμίου	Αντοχή Σκυροδέματος ΜΡα		Ποσοστό Ινών κατ' όγκο %	Είδος Ινών	N/V	Αντοχή ΜΡα
		Θάλαση	Εσπελευσός				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
I	V			-		0	5,1
	=			1,0		0	5,5
	=			1,5		0	7,3
	N+V	30	3,25	-	Παλακός	1	25,3
	=			1,0		1	25,8
	=			1,5		1	26,7
II	V			-		0	5,2
	=			1,0		0	8,7
	=			1,5		0	7,6
	N+V	39	3,25	-	Τυποσόνιο	0	3,0
	=			1,0		-	4,1
	=			1,5		-	-
III	V			-		0	4,11
	=	21,9	2,46	1,0%		0	4,90
	=			1,5%		0	5,96
	N+V	29,3	3,15	-	Στακός	1	31,1
	=			1,0%		1	31,5
	=			1,5%		1	32,0
Καλινδρακός	V			-			3,23
	=	21,9	2,46	1,5%			3,11
	=						
	=						
	=						
	=						

**Πίνακας 2**

Πειραματικά αποτελέσματα αντοχής σε τέννουσα δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος

**Πίνακας 3**



- Με την αύξηση του ποσοστού των ινών βελτιώνεται ανάλογα και η **μέγιστη στρεπτική αντοχή** του (πιν.3), ενώ εξαρτάται και από το λόγο των διαστάσεων της ίνας. Στις ορθογωνικές διατομές έχουμε σημαντική αύξηση ενώ στις πλακοδοκούς η αύξηση αυτή μειώνεται με την αύξηση της επιρροής της πλάκας (πιν.4).

**Πίνακας 4**

Μέγιστες Στρεπτικές Ροπές $M_{t,max}$						
		χωρίς ίνες	με ίνες 1%		με ίνες 3%	
		$M_{t,max}$	$M_{t,max,1}$	αύξηση έναντι $M_{t,max}$ (%)	$M_{t,max,3}$	αύξηση έναντι $M_{t,max}$ (%)
Ορθογωνικοί δοκοί (R)	χωρίς οπλισμό (P)	145.0	184.2	27.0 %	195.0	34.5 %
	με μόνο διαμήκη οπλισμό (L)	147.2	241.8	64.3 %	273.3	85.7 %
	με πλήρη οπλισμό (S)	231.3	273.3	18.2 %	315.4	36.4 %
Δοκοί T $b/b_w=2$ (Ts)	χωρίς οπλισμό (P)	275.8	338.7	22.8 %	369.4	33.9 %
	με μόνο διαμήκη οπλισμό (L)	318.1	425.8	33.9 %	492.0	54.7 %
	με πλήρη οπλισμό (S)	441.5	492.6	11.3 %	550.0	24.6 %
Δοκοί T $b/b_w=3$ (T)	χωρίς οπλισμό (P)	372.0	405.0	8.9 %	442.0	18.8 %
	με μόνο διαμήκη οπλισμό (L)	380.0	456.0	20.0 %	480.0	26.3 %
	με πλήρη οπλισμό (S)	560.0	578.0	3.2 %	741.0	32.3 %

Στο τέλος του ελαστικού σταδίου οι ίνες συνεισφέρουν στην βελτιωμένη ανάληψη της στρεπτικής παραμόρφωσης. Για την εκτίμηση της συνεισφοράς των ινών εισάγεται ο δείκτης  $\mu_{t85}$  που εκφράζει τη στρεπτική πλαστιμότητα. Ο δείκτης αυτός ισούται με το λόγο  $\theta/\theta_{\text{tmax}}$ , όπου  $\theta_{\text{tmax}85}$ : η γωνία στροφής μετά το σημείο της μέγιστης στρεπτικής

Δείκτης $\mu_{t85}$		χωρίς ίνες	με ίνες 1% αύξηση (%)		με ίνες 3% αύξηση (%)	
Ορθογωνικοί δοκοί (R)	χωρίς οπλισμό (P)	(1.00)	1.20	20 %	2.00	100 %
	με μόνο διαμήκη οπλισμό (L)	1.93	2.06	7 %	2.17	12 %
	με πλήρη οπλισμό (S)	1.37	1.37	0 %	2.00	46 %
Δοκοί T $b/b_w=2$ (Ts)	χωρίς οπλισμό (P)	(1.00)	1.36	36 %	1.54	54 %
	με μόνο διαμήκη οπλισμό (L)	2.20	2.44	11 %	3.48	58 %
	με πλήρη οπλισμό (S)	1.81	2.20	22 %	7.40	309 %
Δοκοί T $b/b_w=3$ (T)	χωρίς οπλισμό (P)	(1.00)	1.60	60 %	1.86	86 %
	με μόνο διαμήκη οπλισμό (L)	1.93	2.03	59 %	2.15	11 %
	με πλήρη οπλισμό (S)	1.53	1.77	14 %	10.99	619 %

ροπής στο οποίο παρατηρείται πτώση της μέγιστης στρεπτικής ροπής κατά 15% και  $\theta_{\text{tmax}}$ : η γωνία στροφής στο σημείο μέγιστης στρεπτικής ροπής. Στο πίνακα 5 φαίνεται ότι με την αύξηση του ποσοστού των ινών ο δείκτης  $\mu_{t85}$  αυξάνεται περίπου 19% για ποσοστό ινών 1% κ.ο. και

**Πίνακας 5**

Δείκτης  $\mu_{t85}$



**Εικόνα 1**

Αστοχία δοκού λόγω στρέψης

144% κ.ο. για 3% κ.ο. (εικ.1).

- Η αύξηση της αντοχής σε **κρούση** φθάνει το 40% του συνήθους σκυροδέματος και αυτό οφείλεται στην αύξηση της απορρόφησης ενέργειας θραύσεως.
- Με την αύξηση του ποσοστού των ινών αυξάνεται ανάλογα και η αντοχή κάμψεως του ινοπλισμένου σε **κόπωση**.

- Επίσης παρατηρείται αντοχή στη **φθορά** και στη **τριβή** (αποφλοίωση) αφού το ινώδες σκυρόδεμα συγκρατείται από τις ίνες.
- Στο **ερπυσμό** δε παρατηρείται διαφορά για ποσοστά ινών μέχρι 1% κ.ο. και στο **μέτρο ελαστικότητας** μέχρι 2% κ.ο.

### Ενίσχυση στοιχείων σε κάμψη και διάτμηση

Για την ενίσχυση δοκών σε κάμψη στο εφελκόμενο πέγμα με ινοπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται η χρήση της μεθόδου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της υψηλής συμπίκνωσης του σκυροδέματος (λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης) και συνεπώς την αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε μικρό χρόνο, της μη ύπαρξης ξυλότυπου και της μεγάλης πρόσφυσης μεταξύ παλαιού και καινούριου σκυροδέματος (λόγω επίσης της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης). Στην παρασκευή και διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εφαρμόζονται δύο τεχνικές, αυτή του ξερού μείγματος και αυτή του υγρού μείγματος. Η πρώτη τεχνική μειονεκτεί της δεύτερης ως προς το βαθμό ομοιομορφίας του σκυροδέματος και την απώλεια υλικού λόγω αναπήδησης. Η ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τον χειριστή του ακροφυσίου, ο οποίος πρέπει να διαθέτει εμπειρία, επιδεξιότητα και μεγάλη αντίληψη. Στην περίπτωση των υποστρωμάτων εφαρμόζοντας το εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα σ' όλες τις πλευρές της διατομής επιτυγχάνεται η περίσφυξη και συνεπώς η αύξηση διατμητικής και θλιπτικής αντοχής.

### Μηχανισμοί αστοχίας

Η διαδικασία αστοχίας περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

1. Προοδευτική αποκόλληση ινών με βραδεία μετάδοση των ρηγμάτων. Κατά την αστοχία αυτή μπορεί να συμβούν πολλαπλασιασμός ρηγματώσεων όταν χρησιμοποιούνται ίνες μεγάλου μήκους.

## ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

2. Αποκόλληση των ινών και ταχεία επέκταση της ρηγμάτωσης .
3. Ενεργοποίηση των ινών που δεν επιτρέπουν την ολίσθηση γιατί λειτουργούν ως θλιπτικό φορτίο ή συμβατικό οπλισμό .

### ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα πλαστικά υλικά αποτελούνται από συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης γυαλιού, αραμίδης και άνθρακα σε ποσοστό 50~70% κ.ο. , υψηλής εφελκυστικής αντοχής (μεγαλύτερης από του χάλυβα) , με διάμετρο 5~25μm .Σημαντικά χαρακτηριστικά είναι το χαμηλό βάρος (1/4 του βάρους του χάλυβα) και η ελαστική του συμπεριφορά του με μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις (πιν.6). Στις ενισχύσεις χρησιμοποιούνται συνήθως μανδύες από πλαστικά υλικά (εικ.2).

	Μέτρο ελαστικότητας GPa	Παραμόρφωση θραύσης %	Εφελκυστική αντοχή MPa
ΓΥΑΛΙ	70~88	3~5	2500~4600 (40%)**
ΑΡΑΜΙΔΗΣ	65~125	2.1~4	3500 (50%)**
ΑΝΘΡΑΚΑ	230~380	0.6~1.3	2100~2700 (85%)**
ΧΑΛΥΒΑΣ	200	10 (0.2)*	400~1700

#### Πίνακας 6

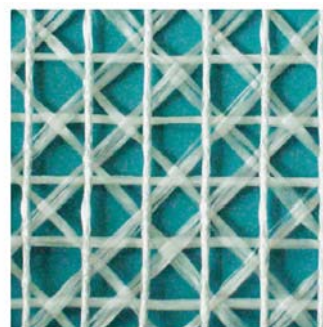
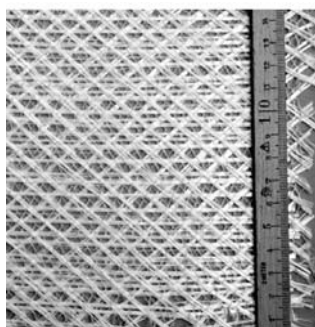
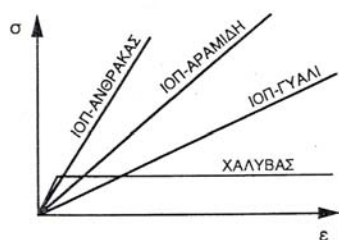
Μηχανικά χαρακτηριστικά πλαστικών υλικών

\* όριο διαρροής του χάλυβα.

\*\* ποσοστό μείωσης της εφελκυστικής αντοχής για μακροχρόνια φόρτιση.

#### Σχήμα 5

Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για πλαστικά υλικά και χάλυβα



Εικόνα 2

Ίνες υφασμάτων

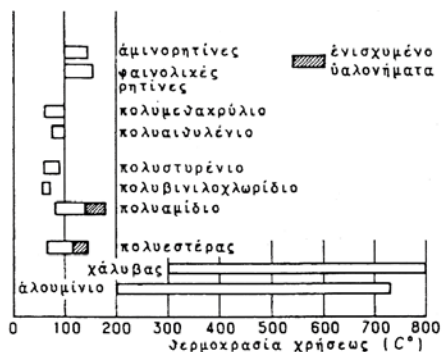
#### Μηχανικά χαρακτηριστικά

- Η **ανθεκτικότητα** ενός σύνθετου υλικού σε αλκαλικό περιβάλλον εξαρτάται από την μήτρα ,τις ίνες και από την αλληλεπίδραση μήτρας –ινών καθώς και από την διαδικασία παραγωγής και τον συστηματικό έλεγχο. Οι ίνες από γυαλί είναι ακατάλληλες για περιβάλλον με αλκάλια και οι ίνες από αραμίδη είναι ευαίσθητες στην υπεριώδη ακτινοβολία. Γενικά κρίθηκαν καταλληλότερες οι ίνες από άνθρακα . Μέσω των αποτελεσμάτων του προγράμματος EUROCRETE διαπιστώθηκε ότι η καλή ποιότητα

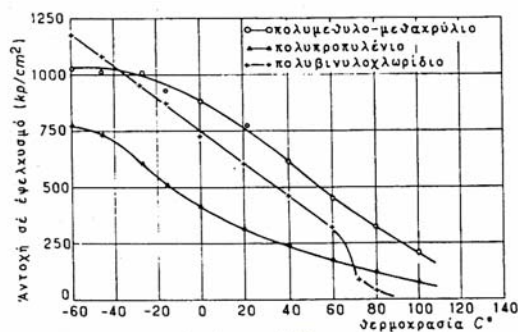


του υλικού και ο συστηματικός έλεγχος στην παρασκευή παίζει πρωταρχικό ρόλο στην ανθεκτικότητα, που είναι βασικός παράγοντας της ασφάλειας του έργου.

- Βασικό μειονέκτημα των πλαστικών υλικών είναι η **χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας** που φθάνει τους 100~120 °C, ενώ του δομικού χάλυβα τους 800 °C, γι' αυτό και δεν αντέχουν ούτε σε μικρής διάρκειας πυρκαγιάς. Η εφελκυστική αντοχή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (σχ.6,7).



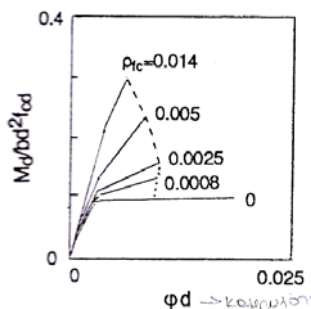
**Σχήμα 6**  
Θερμοκρασία χρήσεως των πολυμερών υλικών



**Σχήμα 7**  
Επίδραση της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή των πολυμερών υλικών

- Στη σπάνια περίπτωση της ανάγκης ενίσχυσης στοιχείου σε μικρό χρονικό διάστημα από την κατασκευή του, οπότε και οι **ερπυστικές παραμορφώσεις** δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως, προτιμούνται οι ίνες από άνθρακα για τις οποίες έχουμε μηδενικές ερπυστικές παραμορφώσεις. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι ίνες από γυαλί, οι οποίες όμως χάνουν πάνω από 50% της εφελκυστικής τους αντοχής για φορτία μακροχρόνια. Οι ίνες από αραμίδη παρουσιάζουν σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις και σε συνδυασμό με την ευαισθησία τους στην υπεριώδη ακτινοβολία (μείωση εφελκυστικής αντοχής) κρίνεται ακατάλληλη η επιλογή τους. Μικρά ποσοστά ιών μειώνουν τις ερπυστικές παραμορφώσεις λόγω μακροχρόνιων και βραχυχρόνιων φορτίων.
- Η έλλειψη **πλαστιμότητας** είναι ένα κρίσιμο μειονέκτημα των σύνθετων υλικών το οποίο μπορεί να αναπληρωθεί από τη χρήση διαφορετικών ιών αστοχώντας σε διαφορετικές παραμορφώσεις και δημιουργώντας έτσι μια ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Η πλαστιμότητα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω του λόγου καμπυλότητα αστοχίας προς καμπυλότητα διαρροής, που προέρχεται από το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας. Η συνεισφορά των σύνθετων υλικών στην **δυσκαμψία** διαφέρει ανάλογα με το ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης (σχ.8). Κύριος παράγοντας για την επιλογή του υλικού είναι η σχέση ακαμψίας αντοχής. Για επισκευές για τις οποίες επιδιώκουμε ακαμψία προτιμάται ο άνθρακας (σε θέμα κόστους), ενώ όταν επιζητούμε αντοχή προτιμάται το γυαλί.

**Σχήμα 8**  
Διάγραμμα κανονικοποιημένων ροπών-καμπυλοτήτων για ινοπλισμένο σκυρόδεμα με άνθρακα



- Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντίσταση στη **διάβρωση**. Επίσης (κυρίως ο άνθρακας )υπερέχουν του χάλυβα σε αντοχή σε **κόπωση** και **ερπυσμό/χαλάρωση**

Ακολουθεί πίνακας με ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών με βαθμολόγηση με άριστα το 10.

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΥΟΠ-Αραμίδιου	ΥΟΠ-3 υάλου
Εφελκυστική αντοχή	9	9	9
Μέτρο Ελαστικότητας	9	6	3
Παραμόρφωση αστοχίας	6	9	9
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις	9	6	3
Συμπεριφορά σε κόπωση	6	4	2
Ανθεκτικ. σε διάρκεια	6	4	2
Πυκνότητα	4	6	2
Κόστος	6	6	9

**Πίνακας 7**

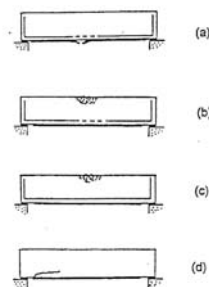
Ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών

### Ενίσχυση στοιχείων σε κάμψη

Για την ενίσχυση δοκαριού σε κάμψη με πλαστικά υλικά χρησιμοποιούνται ‘υφάσματα’ τα οποία επικολλούνται στην κάτω παρειά του με τις ίνες παράλληλες στον άξονα του μέλους .Για τα υποστρώματα χρησιμοποιούνται είτε μανδύες είτε περιτύλιξη με ταινίες από σύνθετα υλικά. Απαραίτητο γι’ αυτή τη μέθοδο ενίσχυσης είναι το προς ενίσχυση στοιχείο να μπορεί να παραλάβει τουλάχιστον τα μόνιμα φορτία του ,σε περίπτωση αστοχίας του πλαστικού υλικού λόγω π.χ. μιας πυρκαγιάς .Η σύνδεση σκυροδέματος με το σύνθετο φύλλο θεωρείται μονολιθική και ο σχεδιασμός ακολουθεί τις διαδικασίες διαστασιολόγησης στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη σύνδεση του μανδύα με το σκυρόδεμα .

### Μηχανισμοί αστοχίας σε κάμψη

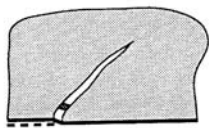
1. Θραύση του σύνθετου υλικού αφού έχει διαρρέψει ο χάλυβας (σχ. 9(a)).
2. Θραύση του σκυροδέματος αφού έχει διαρρέψει ο χάλυβας (σχ. 9(b)).
3. Θραύση του σκυροδέματος χωρίς να ‘χει διαρρέψει ο χάλυβας (σχ. 9(c)).  
Και για την περίπτωση ενίσχυσης με σύνθετα φύλλα :
4. Διάδοση οριζώντιων ρωγμών στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού λόγω
  - Ατέλειες στην εφαρμογή της ρητίνης .Σπάνια εμφανίζεται τέτοιου είδους αστοχία.
  - Κατακόρυφων ρωγμών λόγω κάμψης
  - Τοπική αποκόλληση του σύνθετου φύλλου όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος δεν είναι απολύτως επίπεδη .Όσο παχύτερα φύλλα τόσο μικρότερη η πιθανότητα τέτοιου είδους αστοχίας .
  - Καταπόνηση του μέλους σε κόπωση
5. αποκόλληση του σύνθετου φύλλου λόγω λοξών διατμητικών ρωγμών (σχ. 10)
6. διατμητική αστοχία της στρώσης του σκυροδέματος μεταξύ του οπλισμού ενίσχυσης και του υπάρχοντος διαμήκους οπλισμού κοντά στα άκρα του σύνθετου φύλλου (σχ. 9(d),σχ. 11).



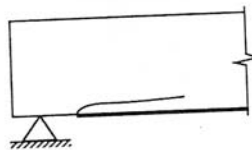
**Σχήμα 9**

Τρόποι αστοχίας δοκού ενισχυμένης με πλαστικά υλικά

**Σχήμα 10** Αποκόλληση σύνθετου φύλλου λόγω διατμητικών ρωγμών



**Σχήμα 11** Διατμητική αστοχία στρώσης σκυροδέματος



Ο πρώτος τρόπος αστοχίας εμφανίζεται όταν ο λόγος χάλυβα και οπλισμού ενίσχυσης καθώς και η παραμόρφωση θραύσης είναι μικροί ενώ ο τρίτος τρόπος αστοχίας όταν υπάρχει υψηλό ποσοστό ενίσχυσης. Ωστόσο προτιμάται να επέρχεται αστοχία από θραύση του σκυροδέματος αφού έχει διαρρεύσει ο χάλυβας ενώ ο οπλισμός ενίσχυσης να παραμένει ανεπηρέαστος. Ο τέταρτος τρόπος αστοχίας είναι ο πιο κρίσιμος. Στην περίπτωση ενίσχυσης με σύνθετα φύλλα προηγείται η αποκόλληση γι' αυτό συνιστάται η αγκύρωση τους με κατακόρυφο εξωτερικό οπλισμό. Ο πέμπτος τρόπος αστοχίας μπορεί να αποφευχθεί αν η παραμόρφωση του σύνθετου υλικού στην οριακή κατάσταση δε ξεπερνά το μικρότερο των 5~6 φορές την παραμόρφωση διαρροής του οπλισμού κάμψης, το 0.8% και το μισό της οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης του σύνθετου υλικού.

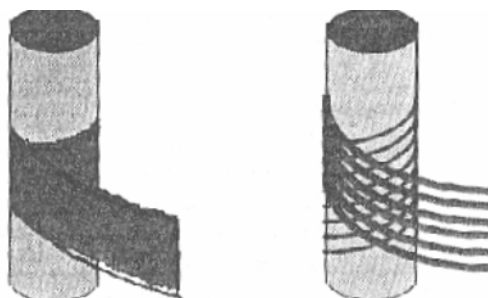
**Ενίσχυση στοιχείων σε διάτμηση**

Για την αύξηση της διατμητικής αντοχής χρησιμοποιούνται είτε ολόσωμοι μανδύες είτε μανδύες περιορισμένου ύψους 'κολάρα' οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά (εικ.3,4). Λόγω της εντατικής κατάστασης των δοκών τοποθετούνται ίνες σε δύο διευθύνσεις (εικ.2). Οι κύριες τάσεις καθορίζουν την διεύθυνση των ινών (ποσοστού της τάξης του 30~50%) σε γωνία περίπου 45° ως προς τον άξονα του μέλους. Ποσοστό της τάξης του 10~20% τοποθετείται στην εγκάρσια διεύθυνση. Για τα υποστυλώματα οι ίνες είναι κάθετα στον άξονα του μέλους. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο ότι στις ορθογωνικές διατομές επιβάλλεται η λάξευση των άκρων της διατομής και για τις πλακοδοκούς η σωστή αγκύρωση του φύλλου με το σκυρόδεμα. Η αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα ισοδυναμεί ως πρόσθετος οπλισμός διάτμησης και δεν συνεισφέρει στην αντοχή της διατομής σε λοξή θλίψη. Η διαστασιολόγηση του ενισχυμένου στοιχείου είναι ανάλογη με αυτή του οπλισμένου σκυροδέματος. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η αύξηση του εγκιβωτισμού στα υποστυλώματα, εκτός από την αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα, επιφέρει αύξηση της θλιπτικής αντοχής, της πλαστιμότητας και βελτίωση της αντοχής του διαμήκους οπλισμού σε λυγισμό (σχ.12,13).



**Εικόνα 3**

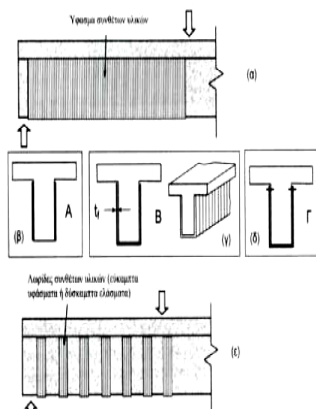
Ύφασμα για αύξηση διατμητικής αντοχής δοκού



**Σχήμα 12**

Περιτύλιξη υποστυλώματος με φύλλα και λωρίδες σύνθετου υλικού





**Σχήμα 13**

Ενίσχυση δοκού με υφάσματα και λαρίδες σύνθετου υλικού

σύνθετου υλικού λόγω συγκέντρωση τάσεων σε γωνίες ή σε μη αγκυρωμένες περιοχές

3. ή ο συνδυασμός τους .

Το είδος του μηχανισμού αστοχίας εξαρτάται από τις συνθήκες σύνδεσης ,το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης ,το πάχος του φύλλου κ.α.



**Εικόνα 3**

Τοποθετημένα φύλλα FRP σε δοκό

### Μηχανισμοί αστοχίας σε διάτμηση

1. αποκόλληση του σύνθετου φύλλου κοντά στην διεπιφάνεια σκυροδέματος και σύνθετου φύλλου
2. ρωγμή στο σύνθετο φύλλο από μια τάση μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή του

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες από χάλυβα λόγω της πλαστιμότητας του υπερέχει έναντι των πλαστικών υλικών ,τα οποία έχουν μια ελαστική συμπεριφορά με ιδιαίτερα μεγάλη ελαστική παραμόρφωση έναντι του χάλυβα .Ωστόσο το σύνθετο υλικό έχει εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση ενώ για την ενίσχυση με χάλυβα απαιτείται πρόβλεψη προστασίας του ,όπως απαιτείται επίσης πρόβλεψη προστασίας των σύνθετων υλικών από προσβολή πυρκαγιάς .Άλλο ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι το πολύ χαμηλό βάρος τους που κι αυτό συνεισφέρει στην πιο οικονομική λύση για ενίσχυση .Γενικά ως υλικό τα σύνθετα υλικά είναι πιο οικονομικό από το χάλυβα .Η ανθεκτικότητα του σύνθετου υλικού επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα παρασκευής του και συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει ένα αξιόπιστο και έμπειρο συνεργείο . Επιπλέον απαραίτητη είναι και η προεπισκόπηση της μεθόδου ενίσχυσης εξατομικευμένα για κάθε περίπτωση ενίσχυσης στοιχείου .Αξίζει να τονισθεί η αδυναμία επαρκής αγκύρωσης των μανδύων από σύνθετα υλικά και η προσοχή που απαιτείται κατά την κατασκευή για τυχόν κενά ,λόγω ανωμαλίας της διεπιφάνειας ,ατέλειες στην εφαρμογή της ρητίνης ,κ.α.,προς αποφυγή αποκόλλησης κατά την επιβολή φορτίων .Στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρωταρχικό ρόλο έχει ,εκτός από την ποιότητα του μείγματος ,ο χειριστής του ακροφυσίου .Στην Ελλάδα δυστυχώς δεν συναντάται συνεργείο εξειδικευμένο και έμπειρο .

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεωργιάδη Σ. ,Λαναρά Θ. ,Τέγου Ι. ,(1983)  
“Πειραματική έρευνα συμπεριφοράς σε στρέψη σκυροδέματος οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες” ,Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος Τ.Ε.Ε ,409-416 ,Γιάννενα

- Γιαννακόπουλος Δ. ,(2005)  
“Ενίσχυση φερόντων στοιχείων με σκυρόδεμα οπλισμένο με πλέγμα ινών” , 11<sup>ο</sup> φοιτητικό συνέδριο 2005
- Δέμης Σ. ,Πηλακούτας Κ. ,Δρίτσος Σ. ,Τριανταφύλλου Θ. ,(1999)  
“Ανθεκτικότητα ινοπλισμένων πολυμερών στο σκυρόδεμα” , 13<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος (Μέλος FIB-RILEM), Τομ. 2, 277-284 ,Ρέθυμνο
- Καραγιάννης Χ. ,Χαλιόρης Κ. ,(1996)  
“Πειραματική διερεύνηση της επιρροής χαλύβδινων ινών στη στρεπτική συμπεριφορά δοκών-Τ” , 12<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος (Μέλος FIB-RILEM), Τομ. 2, 236-246, Λεμεσός
- Καραγιάννης Χ. ,Χαλιόρης Κ. ,(2000)  
“Συμπεριφορά-μοντέλα ινοσκυροδέματος υπό αξονική θλίψη και εφελκυσμό” ,Πρακτικά 1<sup>ο</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Συνθέτων Υλικών Σκυροδέματος ,193-204 ,Ξάνθη
- Ντόγκα Σ. ,Τέγος Ι. ,(1996)  
“Διαξονική εφελκυστική αντοχή ινοσκυροδεμάτων” , 12<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος (Μέλος FIB-RILEM), Τομ. 1, 187-193, Λεμεσός
- Μακρής Σ. ,Πολίτης Σ. ,(2004)  
“Εφαρμογή επικολητών ελασμάτων (χάλυβας ή ινοπλισμένα )” ,10<sup>ο</sup> φοιτητικό συνέδριο 2004
- Μανίτα Π. ,Πανταζοπούλου Σ. ,(2000)  
“Καταστατικό μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος” , Πρακτικά 1<sup>ο</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Συνθέτων Υλικών Σκυροδέματος ,218-228 ,Ξάνθη
- Μελέτιος Μ. ,(1990)  
“Σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες ίνες με άγκιστρα, συγκολλημένες σε δέσμες” , 9<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, 36-42, Καλαμάτα
- Σακελλαρίου Α. ,Παπαθανασίου Α. ,Καρυστινού Ν. ,(1994)  
“Δοκιμές δυσθραυστότητας (flexural toughness) δοκιμίων σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες” , 11<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος ,Τομ. 1 ,167-179, Κέρκυρα
- Σιδέρης Κ. ,Σιδέρης Κ. ,Σάββα Α. ,Μανίτα Π. ,(2000)  
“Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες από χάλυβα” , Πρακτικά 1<sup>ο</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Συνθέτων Υλικών Σκυροδέματος ,112-134 ,Ξάνθη
- Στυλιανίδης Κ. ,Παπανικολάου Κ. ,Σαλονικιός Θ. ,Αποστολόπουλος Γ. ,Σιαμπάκος Α. ,(1996)  
“Μηχανικά χαρακτηριστικά σειράς δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος” , 12<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος (Μέλος FIB-RILEM), Τομ. 1, 194-205, Λεμεσός
- Συνοδινός –Βαλλιανός Ε. ,(2005)  
“Παραδείγματα ενίσχυσης δοκών βάθρων γεφυρών με FRP” , 11<sup>ο</sup> φοιτητικό συνέδριο 2005
- Σωτηρόπουλος Α. ,(2005)  
“Ενίσχυση δοκών σε στρέψη με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)” , 11<sup>ο</sup> φοιτητικό συνέδριο 2005
- Τέγος Ι. (1990)  
“Διεπιφανειακή μεταφορά τέμνουσας στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα” ,9<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ,Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, 156-165, Καλαμάτα

- Τριανταφύλλου Θ.  
“Ενισχύσεις κατασκευών σκυροδέματος με ινο-οπλισμένα πλαστικά”, 11<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Τ.Ε.Ε Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, Τόμ. 3, 69-80, Κέρκυρα
- Τριανταφύλλου Θ. ,(1996)  
“Ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά” , 12<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος Τ.Ε.Ε ,473-482
- “Ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά”, Βιβλιογραφία εργασιών 11<sup>ο</sup> φοιτητικό συνέδριο 2005 ,Τόμ. 5 ,190-201
- Triantafillou T.  
“Strengthening of structures with advanced fibre-reinforced polymers”, Βιβλιογραφία εργασιών 4<sup>ο</sup> φοιτητικό συνέδριο 1998