



## ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ



## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΑΝΔΡΕΑΣ ΔΡΑΜΗΛΑΡΑΚΗΣ & ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΝΤΩΝΟΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

A.M. :38164

A.M. :38337

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΓΕΙΡΟΥ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ  
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2013

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή .....	4
2.	Κατηγορίες σύνθετων υλικών.....	5
2.1.	Υλικά ινών .....	7
2.1.1	Ίνες γυαλιού ( υαλονήματα ) .....	9
2.1.2	Ίνες άνθρακα ( ανθρακονήματα ) .....	10
2.1.3	Ίνες αραμιδίου .....	12
2.1.4	Μεταλλικές ίνες .....	13
2.1.5	Κεραμικές ίνες .....	13
2.1.6	Τριχίτες .....	15
2.1.7	Ίνες φυσικών ορυκτών .....	15
2.2.	Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα συνθέτων υλικών από ΙΟΠ.....	16
3.	Μήτρες σύνθετων υλικών .....	18
3.1.	Εποξειδικές ρητίνες .....	20
3.2.	Πολυεστερικές ρητίνες .....	21
3.3.	Βινυλεστερικές Ρητίνες.....	22
3.4.	Θερμική επεξεργασία των εποξικών ρητινών (curing).....	24
4.	Αποτίμηση αντοχής και συστήματα ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές .....	25
4.1.	Ανίσωση ασφαλείας – Η λογική των ελέγχων.....	28
4.2.	Συστήματα ενίσχυσης.....	30
4.3.	Συστήματα υγρής εφαρμογής.....	30
4.4.	Προκατασκευασμένα υλικά .....	31
4.5.	Προετοιμασία για εφαρμογή και τεχνικές επικόλλησης.....	31
5.	Μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών.....	33
5.1.	Αποκόλληση σύνθετων υλικών και ρωγμές.....	33
5.1.1	Γενικά .....	33
5.1.2	Ρωγμές.....	33
5.1.3	Η έννοια και οι μηχανισμοί αποκόλλησης .....	35
5.1.3.1.	Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή .....	35
5.1.3.2.	Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή.....	36
5.1.3.3.	Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή .....	37

5.1.3.4. Διατμητική αστοχία στο άκρο – αποκόλληση της επικάλυψης.....	38
5.1.3.5. Ατέλειες της επιπεδότητας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου.....	39
5.1.4 Οδηγίες για την αποφυγή πρόωρων αποκολλήσεων.....	39
5.2. Κόπωση.....	40
5.3. Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης.....	40
6. Αγκυρώσεις.....	41
6.1. Μηχανικές αγκυρώσεις.....	43
6.2. Υπολογισμός απαιτούμενης απόστασης αγκυρίων.....	44
7. Μηχανική συμπεριφορά και Δυναμική καταπόνηση των σύνθετων υλικών.....	45
7.1. Ερπυσμός.....	45
7.2. Μαθηματικά προσομοιώματα.....	46
7.3. Κρούση.....	49
8. Ενίσχυση φέροντος οργανισμού.....	50
8.1. Περίσφυξη υποστυλωμάτων.....	50
8.2. Αύξηση πλαστιμότητας υποστυλωμάτων.....	51
8.3. Ενίσχυση έναντι κάμψης.....	51
8.4. Ενίσχυση έναντι διάτμησης.....	54
8.5. Ενίσχυση δοκού ή πλάκας με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών.....	55
8.6. Ενίσχυση δοκού ή πλάκας σε κάμψη.....	55
8.6.1. Μηχανισμοί αστοχίας της ενισχυόμενης δοκού ή πλάκας (κάμψη).....	56
8.7. Ενίσχυση δοκού σε διάτμηση.....	58
8.7.1. Μηχανισμοί αστοχίας της ενισχυόμενης δοκού (τέμνουσα).....	58
9. Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών.....	60
9.1. Επίδραση της θερμοκρασίας.....	60
9.2. Επίδραση της υγρασίας.....	61
9.3. Επίδραση θαλάσσιου περιβάλλοντος.....	62
9.4. Επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας.....	64
9.5. Επίδραση της γαλβανικής διάβρωσης.....	65
9.6. Επίδραση της ψύξης – απόψυξης.....	65

10.	Πειραματικό μέρος.....	66
10.1.	Τεχνική περιγραφή .....	66
10.2.	Στατική επίλυση του κτιρίου με το πρόγραμμα Strad 2009 σε συνεργασία με το AutoCAD 2007 .....	67
10.3.	Στατική επίλυση κτιρίου με το πρόγραμμα Frp- Analysis .....	79
10.3.1.	Καμπτική ενίσχυση:.....	81
10.3.2.	Διατμητική Ενίσχυση.....	87
10.3.3.	Αποτελέσματα προγράμματος Frp-Analysis.....	90
11.	Συμπεράσματα .....	92
12.	Βιβλιογραφία .....	94
13.	Παράρτημα Α .....	97
14.	Παράρτημα Β .....	103
15.	Παράρτημα Γ.....	114

# **1. Εισαγωγή**

Με την πάροδο του χρόνου η κτιριοδομία εξελίχθηκε σε ένα από τους βασικότερους τομείς της παγκόσμιας οικονομίας. Η εξέλιξη αυτή ωστόσο χρειάστηκε ανάπτυξη τεχνολογίας και τεχνογνωσίας. Ένα από τα βασικά στοιχεία για την επίτευξη της προόδου αυτής είναι η χρήση των σύνθετων υλικών, με τη βοήθεια των οποίων επιτυγχάνεται η επισκευή και στατική αναβάθμιση (ενίσχυση) υφιστάμενων κτιρίων.

Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδιασμός δυο η περισσότερων στοιχείων συνιστά ένα στοιχείο από σύνθετο υλικό. Η ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά αποτελεί μια νέα τεχνική, η οποία διαδίδεται αλματωδώς και βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή. Έτσι χρησιμοποιείται η τεχνική αυτή, που βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών σε δομικά στοιχεία. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ινοπλισμένα πολυμερή-FRP (Fibre Reinforced Polymers) και αποτελούνται από συνεχείς ίνες κυρίως γυαλιού ή άνθρακα και σπανιότερα αραμιδίου, που σε συνδυασμό με την εποξειδική ρητίνη, σχηματίζουν ένα σύνθετο υλικό υψηλής αντοχής. Στην αγορά κυκλοφορούν σε μορφή δύσκαμπτων λωρίδων (με πάχος της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων υφασμάτων (με πάχος της τάξης των 0.1-0.4 mm), από γυαλί, άνθρακα ή αραμιδίου, με τις ίνες κατανεμημένες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Τα υλικά αυτά τοποθετούνται με προσανατολισμό, ώστε οι ίνες να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις. Επίσης, τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται στις επιφάνειες σαν ελάσματα, φύλλα ή πλέγματα. Ιδιαίτερα στην περίσφυξη των υποστηλωμάτων, τα υφάσματα μπορεί να είναι μιας ή δυο διευθύνσεων και ολόσωμα ή σε στρώσεις.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιότατων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά.

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας. Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες

τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. Στα τέλη της δεκαετίας 1990 πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα οι πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας των συνθέτων υλικών .

Σημαντική αύξηση των εφαρμογών παρατηρήθηκε μετά το σεισμό της Αθήνας το 1999. Από τότε μερικές εκατοντάδες έργα ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών με τη μέθοδο των FRP έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχώς. Τα FRP έχουν ήδη εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους κατασκευών στην Ελλάδα όπως: κατοικίες, σχολεία, εκκλησίες, βιομηχανικά κτίρια, βιομηχανικές κατασκευές εν γένει, ξενοδοχεία, σιλό, γέφυρες, δεξαμενές, αγωγοί, κτίρια από λιθοδομή, ξύλινες κατασκευές και άλλα. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).

Σκοπός της χρήσης των σύνθετων υλικών είναι η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων, δηλαδή η βελτίωση της αντοχής της παραμόρφωσης αστοχίας (συνεπώς και της πλαστιμότητας ) και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Με χρήση σύνθετων υλικών μπορούμε συνάμα να αυξήσουμε τη συνάφεια σε κρίσιμες περιοχές, ενώσεων οπλισμών με μάτιση καθώς και να μειώσουμε τη πιθανότητα τοπικού λυγισμού οπλισμών. Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

## **2. Κατηγορίες σύνθετων υλικών**

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Ινώδη σύνθετα** (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- **Στρωματικά σύνθετα** (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- **Κοκκώδη σύνθετα** (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- **Μονοδιευθυντικά σύνθετα**, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- **Πολυδιευθυντικά σύνθετα**, στα οποία οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, βλ. εικόνα 2.1:

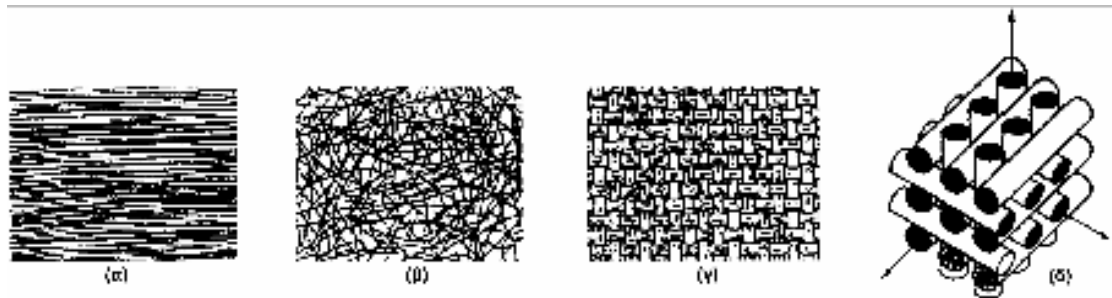
- **Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.**

- **Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.**
- **Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.**

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

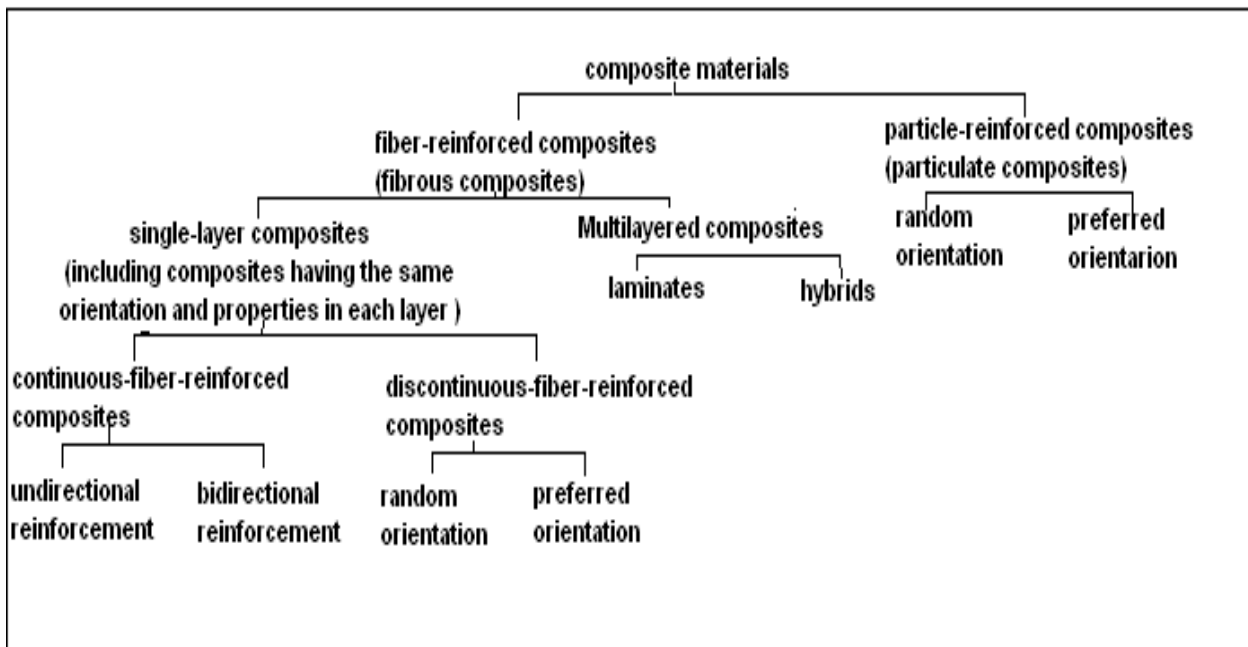
- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι  $l/d \geq 100$ .
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι  $l/d < 100$ .
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers): Με  $d < 1\mu\text{m}$  και  $l \cong 100\mu\text{m}$  (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

1 ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.

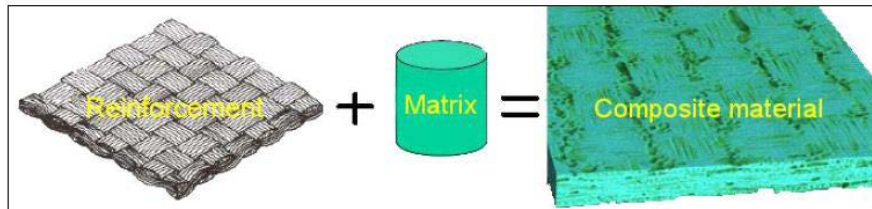


**Εικόνα 2.1** : Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

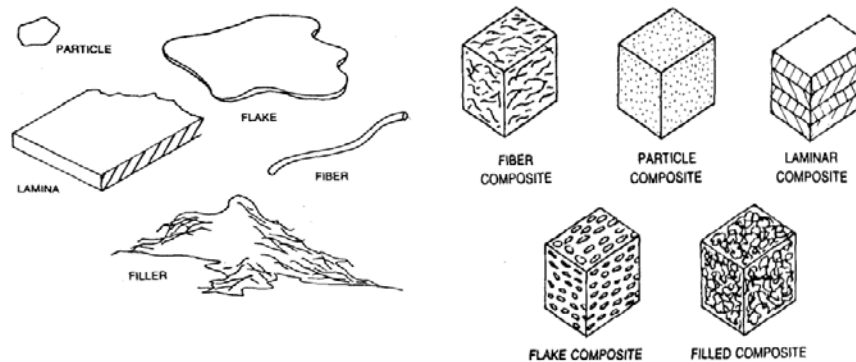
Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1



**Σχήμα 2.1** : Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών.



**Εικόνα 2.2 :** Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας σύνθετου υλικού.



**Εικόνα 2.3 :** Είδη σύνθετων πολυμερών αναλογα με την ενισχυση.

## **2.1. Υλικά ινών**

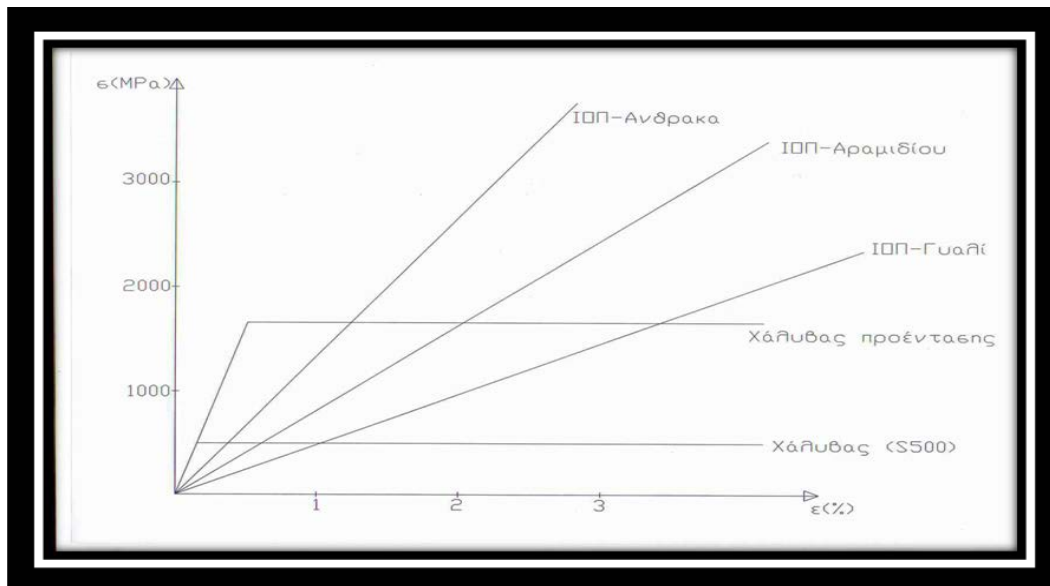
Η αντικατάσταση των χαλύβδινων ελασμάτων με ινοπλισμένα πολυμερή συζητήθηκε στα Ελβετικά Ομοσπονδιακά εργαστήρια για δοκιμές υλικών και έρευνα το 1982 και μία από τις σημαντικότερες αποφάσεις που έπρεπε να ληφθεί σχετιζόταν με τον καταλληλότερο τύπο ινών FRP για την εφαρμογή αυτή.

Ο πίνακας 2.1.1 παραθέτει κριτήρια που σχετίζονται με την χρήση των σύνθετων υλικών ως υλικά για την ενίσχυση κατασκευών και το σχήμα 2.1.1 δείχνει γραφικά τη σχέση τάσης – παραμόρφωσης για τους τρεις τύπους ινών.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΙΟΠ-ΑΝΘΡΑΚΑ	ΙΟΠ-ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ	ΙΟΠ-ΓΥΑΛΙΟΥ
Εφελκυστική αντοχή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Θλιπτική αντοχή	Πολύ καλή	Μη ικανοποιητική	Καλή
Μέτρο ελαστικότητας	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
Συμπεριφορά κόπωσης	Εξαιρετική	Καλή	Ικανοποιητική
Ανθεκτικότητα σε αλκάλια	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
Τιμή	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική	Πολύ καλή

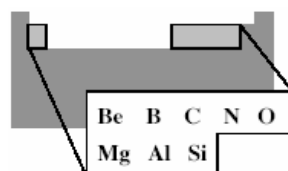
**Πίνακας 2.1.1 :** Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ΙΟΠ-Ανθρακα, ΙΟΠ-Αραμιδιου, ΙΟΠ-Γυαλιού





**Σχήμα 2.1.1 :** Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για άνθρακα, αραμίδιο, γυαλί και χάλυβα [35] .

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα ( $\rho$ ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (Σχήμα 2.1.2) .



**(Σχήμα 2.1.2)**

Το 1982 ο U.Meier έπρεπε να επιλέξει έναν τύπο ινών στον οποίο θα συγκέντρωνε την έρευνα του. Από πλευρά οικονομίας μια περιληπτική μελέτη θα μπορούσε να επιχειρηθεί για ένα υλικό. Τα κριτήρια ήταν αυτά που φαίνονται στο πίνακα 2.1.1 , η εξαιρετική τεχνική δυνατότητα των ινών άνθρακα καθώς και η ευνοϊκή τιμή, όπως προβλεπόταν ,και σε κάποιο σημείο , επιτεύχθηκε από τους κατασκευαστές .

Είναι ξεκάθαρο ότι η εφελκυστική αντοχή είναι ένα σχετικό κριτήριο , αλλά η σημασία της θλιπτικής αντοχής μπορεί να προβληματίσει , αφού το σκυρόδεμα γενικά πρέπει να ενισχυθεί στην εφελκυστική πλευρά της δοκού. Σε μερικά στατικά συστήματα , ωστόσο , μπορεί να υπάρχουν περιοχές που κανονικά φορτίζονται σε εφελκυσμό αλλά οι οποίες μπορεί να υποστούν θλιπτικές τάσεις ανάλογα με την κατανομή φορτίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα χαλύβδινα ελάσματα δεν είναι αποδεκτά αφού θα αποκολληθούν. Τα ΙΟΠ – αραμιδίου θα αστοχούσαν λόγω της

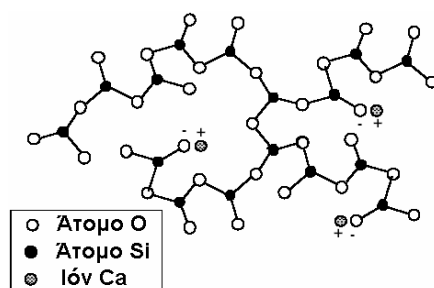
χαμηλής θλιπτικής αντοχής. Ο Deuring απέδειξε ότι τα ΙΟΠ – άνθρακα ικανοποιούν την απαίτηση θλίψης.

Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι μεγάλης σημασίας όταν το φύλλο FRP δεν είναι προεντεταμένο πριν την τοποθέτηση του, γιατί μόνο τα δύσκαμπτα ελάσματα μπορούν να ανακουφίσουν τον υπάρχοντα εσωτερικό σπλισμό από τις τάσεις. Τα ελάσματα από ίνες γυαλιού πρέπει να είναι 4-10 φορές παχύτερα από τα ελάσματα άνθρακα για να φτάσουν την ίδια εφελκυστική δυσκαμψία. Αν τα ΙΟΠ – γυαλιού έχουν μήκος μεγαλύτερο από 6-10 m η διακίνηση τους στον τόπο της κατασκευής είναι δύσκολη.

Το κριτήριο του κόστους είναι πολύ σημαντικό. Αν γίνει μία σύγκριση της τιμής των σύνθετων υλικών με την τιμή του χάλυβα θα φανεί σε πρώτη ματιά ότι τα σύνθετα υλικά είναι πολύ πιο ακριβά. Αν όμως συνυπολογιστεί η ευκολία χειρισμού τους και τα άλλα πλεονεκτήματά τους η λύση αυτή γίνεται ανταγωνιστική. Συγκεκριμένα αξίζει να αναλύσουμε κάθε μια από τις τρεις πιο διαδεδομένες χρησιμοποιούμενες ίνες, στο πεδίο των ενισχύσεων, δηλαδή τις ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), γυαλιού (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου, ώστε να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα.

## **2.1.1 Ίνες γυαλιού ( υαλονήματα )**

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά. Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.1.1.



**Σχήμα 2.1.1.1 :** Δομή γυαλιού

Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E και S. Αν και, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.1.1, ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο.

Είδος υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )
Υαλος-E	2000-3000	70-75	3.0-4.5	2.54
Υαλος-S	3500-4800	85-90	4.5-5.5	2.48

**Πίνακας 2.1.1.1** : Ιδιότητες υάλου –E και υάλου-S [7].

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο υαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή αραμιδίου, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο υαλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

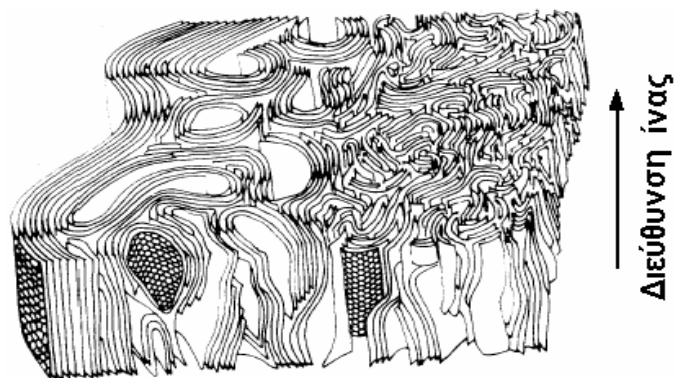


**Εικόνες 2.1.1.1** : Ίνες γυαλιού

## **2.1.2 Ίνες άνθρακα ( ανθρακονήματα )**

Οι ίνες άνθρακα είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα.

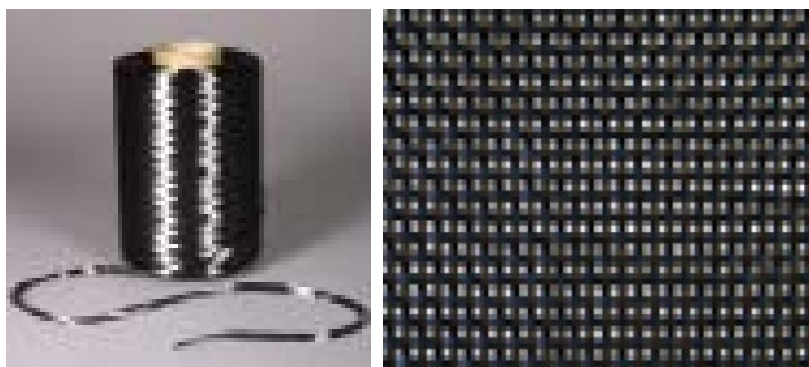
Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγίον με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συνήα έως 3000oC). Μέσο της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτοκα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 Gpa ελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στη κρυσταλλική δομή. Τυπική δομή ανθρακονήματος ,όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.2.1



Σχήμα 2.1.2.1

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν ελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και με μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής.

Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτή είναι όξινοι είτε βασικοί, και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

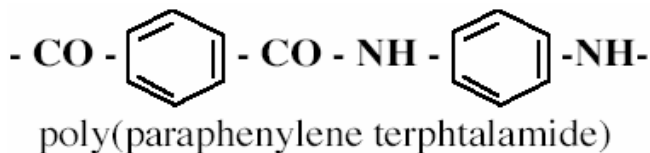


Εικόνα 2.1.2.1 : Ίνες άνθρακα

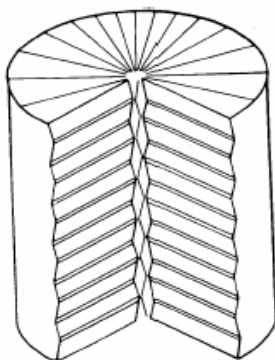
### 2.1.3 Ίνες αραμιδίου

Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών αραμιδίου που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες αραμιδίου σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες αραμιδίου έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας, βλ. σχήμα 2.1.3.1. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).

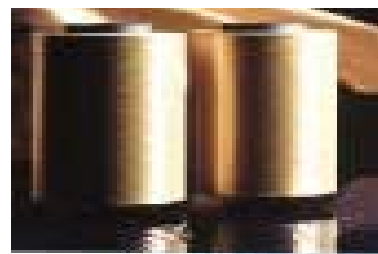
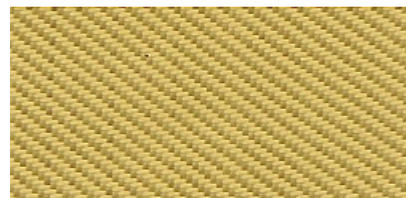


**Τύπος αραμιδίου**



**Δομή ίνας Kevlar**

Σχήμα 2.1.3.1



Εικόνα 2.1.3.1 : Ίνες αραμιδίου

Εκτός από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες, άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού είναι οι ακόλουθες:

### **2.1.4 Μεταλλικές ίνες**

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

#### **Αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου:**

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl<sub>3</sub>) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (1100 °C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15 μm. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100÷200 μm, ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.

#### **Απόθεση με τεχνική CVD:**

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Η τεχνική αυτή είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή. Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ( $E = 300\div 420$  GPa,  $UTS = 3000\div 3700$  MPa), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500 °C. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.

### **2.1.5 Κεραμικές ίνες**

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BeO, B<sub>4</sub>C και ZrO<sub>2</sub>. Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια

### Μέθοδοι παραγωγής :

- Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα. Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου  $10\div 25$   $\mu\text{m}$  και εξωτερική διάμετρο  $100\div 150$   $\mu\text{m}$ .
- Από πολυμερικές ίνες (Nicalon). Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850  $^{\circ}\text{C}$  μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία ( $>1000$   $^{\circ}\text{C}$ ) προκαλεί κρυστάλλωση σε  $\beta$ -SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο  $10\div 15$   $\mu\text{m}$ .
- Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού. Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει  $\sim 15\%$  κ.β. SiO<sub>2</sub>. Θέρμανση σε θερμοκρασία 700-900  $^{\circ}\text{C}$  οδηγεί σε υπόλειμμα SiO<sub>2</sub> και ελεύθερο άνθρακα. Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία  $\sim 1500$   $^{\circ}\text{C}$  και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC. Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο  $\sim 0.1\div 1$   $\mu\text{m}$  και μήκος  $\sim 50$   $\mu\text{m}$ . Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίνακας 2.1.5.1). Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
<b>Ιδιότητα</b>			
Πυκνότητα, $\rho$ ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	3,3	2,6	-
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (Gra)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d ( $\mu\text{m}$ )	140	15	$<1$

**Πίνακας 2.1.5.1** :Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές).

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400  $^{\circ}\text{C}$ , ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900  $^{\circ}\text{C}$ , λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) διαμέτρου 250  $\mu\text{m}$  έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800  $^{\circ}\text{C}$ . Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

## 2.1.6 Τριχίτες

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρυστάλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1μm, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στον Πίνακα 2.1.6.1 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC <sub>INA</sub>	SiC <sub>ΤΡΙΧΙΤΗΣ</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> INA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ΤΡΙΧΙΤΗΣ
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

Πίνακας 2.1.6.1 : Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 2.1.7 Ίνες φυσικών ορυκτών

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20 nm, και έχουν διάμετρο ~10 μm και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500°C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμιάντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα. Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνθήκες τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700÷900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm<sup>3</sup>.



### Σύγκριση ενισχυτικών ινών :

- Ως προς τη θερμική ευστάθεια ο Πίνακας 2.1.7.1 :

**Πίνακας 2.1.7.1 : Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών.**

Ίνα	T <sub>max</sub> (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

\*παρουσία οξυγόνου: T<sub>max</sub>=500°C

- Ως προς την παραμόρφωση θραύσης ο Πίνακας 2.1.7.2 :

**Πίνακας 2.1.7.2 : Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών [7].**

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

## **2.2. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα συνθέτων υλικών από ΙΟΠ**

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης συνθέτων υλικών, για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών, σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, που περιλαμβάνουν τη χρήση συμβατικών υλικών, είναι :

- Το μικρό πάχος του συνθετικού υλικού. Με αποτέλεσμα να μένουν αμετάβλητες οι διαστάσεις τόσο του ενισχυόμενου δομικού στοιχείου όσο και των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών των κατασκευών.
- Η δυνατότητα τοποθέτησης τους σε περιπτώσεις, όπου είναι περιορισμένος ο χώρος εργασίας, όπως για παράδειγμα σε μια περίπτωση, όπου έχουμε να ενισχύσουμε μια μεσοτοιχεία.
- Η δυνατότητα των σύνθετων υλικών να επιχρυστούν και να χρωματιστούν, σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του χώρου, έτσι ώστε να μην υπάρχει τίποτα που να θυμίζει στον ιδιοκτήτη τη διαδικασία αυτή.
- Έχουν χαμηλό βάρος ( περίπου το 1/4 του χάλυβα) καθώς επίσης κατά την τοποθέτησή τους δεν χρειάζεται η χρήση ικριωμάτων.
- Διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία και είναι δυνατή η παραγωγή μεγάλων και περίπλοκων κομματιών. Διατίθενται επίσης σε μορφή ελασμάτων, ράβδων κ.α. Δεν υπάρχει ανάγκη ματίσεων με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται ατέλειες, εφόσον η μεγάλη “ευκαμψία” τους και συνεπώς και η εργασιμότητα τους αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα απέναντι στον χαλύβδινο οπλισμό.

Επίσης, η βιομηχανική τυποποίηση τους ,επιτρέπει τη χρήση διαφόρων διατάξεων χωρίς περιορισμό σε γεωμετρικές διαστάσεις.

- έχουν υψηλή ειδική αντοχή και ειδική δυσκαμψία ( ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής ή της δυσκαμψίας προς την πυκνότητα αντίστοιχα) συντελεί στην αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής και της δυσκαμψίας του προς ενίσχυση δομικού στοιχείου
- Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σημαντική αντοχή στο χρόνο ενώ είναι ανθεκτικά απέναντι σε πολλούς από τους συνηθισμένους διαβρωτικούς παράγοντες όπως το νερό και η υγρασία. Παράλληλα παρουσιάζουν σημαντική ανθεκτικότητα έναντι κόπωσης, ερπυσμό και κρουστικών καταπονήσεων.
- Η εύκολη εφαρμογή τους και το γεγονός ότι η προετοιμασία των προς ενίσχυση στοιχείων είναι μικρή και σύντομη, συνάδει με την μικρή και σύντομη όχληση των χρηστών οπότε και δεν απαιτείται η εκκένωση του χώρου.
- Αναστρεψιμότητα της επέμβασης. Το σύνθετο υλικό, ως υλικό ενίσχυσης, μπορεί να απομακρυνθεί από το φορέα με σκοπό την εφαρμογή μιας άλλης ευχερέστερης σε κάποιο μελλοντικό χρόνο, κάτι που είναι αρκετά δύσκολο όσον αφορά τις άλλες μεθόδους. Αυτό, αποκτά ειδικό ενδιαφέρον στα θέματα που αφορούν την αποκατάσταση ή ενίσχυση οικοδομημάτων καλλιτεχνικής και ιστορικής αξίας, δεδομένου ότι η εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών είναι μία μη καταστροφική μέθοδος ενίσχυσης.
- Συμβατότητα με το υπόστρωμα. Η συμβατότητα αυτή αφορά μόνο τη ρητίνη, διότι οι ίνες των σύνθετων υλικών δεν έρχονται σε επαφή με τις ενισχυόμενες επιφάνειες.

Ωστόσο πρέπει να επισημάνουμε ότι τα σύνθετα υλικά σαν μέθοδος επισκευής δομικών στοιχείων, έχει και αρκετά μειονεκτήματα.

Κάποια από αυτά είναι :

- Το υψηλό κόστος τους (το οποίο αυξάνεται με τον αριθμό στρώσεων).
- Η παρουσίαση σχεδόν γραμμικής καμπύλης έντασης –παραμόρφωσης έως την αστοχία τους, παρόλο που τα σύνθετα υλικά, τα οποία συνθέτουν τις μήτρες, επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, ενώ οι ίνες συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά.
- παρουσιάζουν φτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης 50 – 80 °C (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης), οι οποίες μετατρέπουν την εποξειδική ρητίνη σε “πλαστικό” υλικό και έτσι μειώνεται η ικανότητα ανάληψης δυνάμεων και το μέτρο ελαστικότητας. Σε θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς επέρχεται πλήρης αποσύνθεση των ρητινών και επομένως τα σύνθετα υλικά καθίστανται ανενεργά.
- παρουσιάζουν φτωχή συμπεριφορά στην υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στην μήτρα των σύνθετων υλικών που εκτίθενται σε αυτή
- Σαν νέα τεχνική, υπάρχει επίσης έλλειψη ενιαίων κανονισμών σχεδιασμού, που δημιουργεί κάποιες επιφυλάξεις και προβλήματα.
- Περιορισμένα ειδικευμένα συνεργεία ,γεγονός που δικαιολογείται από την πρόσφατη εμφάνιση αυτής της τεχνικής και της γρήγορης ανάπτυξής της. Η τεχνική των σύνθετων υλικών δε πρέπει σε καμία περίπτωση να αποτελεί πανάκεια. Σίγουρα δίνει ενδιαφέρουσες λύσεις σε πληθώρα περιπτώσεων, σε κάποιες άλλες όμως δε προσφέρεται ως η πλέον δόκιμη και γι αυτό θα

πρέπει να θεωρείται ως μία ακόμα τεχνική ενίσχυσης, η οποία συμπληρώνει τις υφιστάμενες, χωρίς να τις υποκαθιστά αδιακρίτως.

- Έλλειψη πλαστιμότητας. Στην φάση οριακής κατάστασης αστοχίας εμφανίζεται φαθυρή θραύση, ιδιότητα που δε συμβαδίζει με την τάση για πλαστικό σχεδιασμό των δομικών στοιχείων που επιβάλλει ο Κανονισμός. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά έχουν τη δυνατότητα να αναλάβουν υψηλές ελαστικές παραμορφώσεις με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας των δομικών στοιχείων που έχουν ενισχυθεί με τη μέθοδο αυτή.
- Παρατηρούνται προβλήματα στις θέσεις αλλά και στον τρόπο αγκύρωσης, όπως επίσης παρατηρείται και σημαντικός ερπυσμός της μήτρας.

### **3. Μήτρες σύνθετων υλικών**

Η μήτρα αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών. Παρέχει το μέσο δια του οποίου κατανέμετε το φορτίο στις ίνες χωρίς αυτές να αυτοθραύονται και ταυτόχρονα συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μην λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεση τους. Όταν μια ίνα σπάσει, το φορτίο από τη πλευρά της σπασμένης ίνας μεταβιβάζεται στην αμέσως επόμενη από αυτή παραπλήσια ίνα. Ο μηχανισμός μετάδοσης του φορτίου είναι η διατμητική τάση εντός της μήτρας. Η μήτρα έχει χαμηλότερη πυκνότητα, ακαμψία και στερεότητα από ένα υλικό ενισχυόμενο με ίνες, αλλά ο συνδιασμός ινών και μήτρας παράγει ένα υλικό με μεγάλη στερεότητα και ακαμψία ενώ συγχρόνως το ολο σύνολο έχει μικρότερη πυκνότητα.

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στη πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις, σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σαν ομογενές υλικό. Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με τη προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με τη πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση.

Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες. Οι ρητίνες

που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές.

Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα 3.1 :

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή	Μέτρο ελαστικότητας	Επιμήκυνση θραύσης	Πυκνότητα
	(MPa)	(GPa)	(%)	(gr/cm <sup>3</sup> )
Εποξική	55-130	2.0 - 4.5	4.0 – 14.0	1.20 – 1.30
Πολυεστερική	35-104	2.1 – 4.1	< 5.0	1.10 – 1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0 – 3.6	3.5 – 5.5	1.12 – 1.32

**Πίνακας 3.1 :** μηχανικές ιδιότητες-σύγκριση ρητινών.

Με τον όρο μήτρα αναφερόμαστε στις ρητίνες ,που προαναφέραμε, οι οποίες εφαρμόζονται μεταξύ του υποστρώματος και του συνθέτου υλικού, με σκοπό την εξασφάλιση της συνεργασίας και της μεταφοράς τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο.

Τρεις βασικές έννοιες, που διέπουν την χρήση ρητινών, είναι :

- Ο χρόνος εργασιμότητας (pot life), είναι αυτός που έχει κάποιος στη διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα, πριν αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται. Εξαρτάται από τον τύπο της κόλλας, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ποσότητα κόλλας και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα τυπικής κόλλας ( εποξειδικής ρητίνης) 5 Kg είναι 90 min σε 15 °C και 30 min σε 35 °C.
- Ο χρόνος εφαρμογής (open time), είναι το χρονικό διάστημα που η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού στην επιφάνεια του υποστρώματος.
- Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature), ονομάζεται η διαδικασία μετάβασης ενός άμορφου στερεού , όπως το γυαλί και κάποια άμορφα πολυμερή από συμπεριφορά ρευστού σε συμπεριφορά στερεού. Επειδή όμως αυτά δεν έχουν καθορισμένο σημείο πήξης, αναφερόμαστε σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Οι εποξειδικές ρητίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αυτούσιες σαν εποξειδικό κονίαμα με αναλογία βάρους 1:1 έως 1:7. (σ'αυτην την περίπτωση έχουν αυξημένο μέτρο ελαστικότητας, μεγαλύτερο ιξώδες, μικρότερη αντοχή), είτε σε συνδυασμό με τα ινόπλισμένα πολυμερή, όπου προκύπτει ένα σύνθετο υλικό υψηλότερης αντοχής. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι ρητίνες στις οποίες θα αναφερθούμε στη συνέχεια , μας ενδιαφέρουν μόνο για εφαρμογή σε συνδυασμο με τα ινόπλισμένα πολυμερή και όχι αυτούσιες.

### **3.1. Εποξειδικές ρητίνες**

Η εποξική χημεία, όπως την ξέρουμε σήμερα, στο χώρο της ναυπηλακής και βιομηχανικής προστασίας, αναγνωρίστηκε ταυτόχρονα από τον Ελβετό P. Castan και τον Αμερικανό S. Greenlee. Οι δύο χημικοί υπέβαλλαν αιτήσεις για διάφορες ευρεσιτεχνίες στα τέλη της δεκαετίας του '30. Ο πρώτος τύπος εποξικής ρητίνης κυκλοφόρησε στο εμπόριο από την εταιρία Ciba το 1946. Η εποξική ρητίνη έγινε το κορυφαίο προϊόν που χρησιμοποιείται σε ναυπηλακές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Στην επισκευή και ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως προείπαμε σε συνδυασμό με ινοπλισμένα πολυμερή, δηλαδή σαν σύνθετο υλικό. Η εποξειδική ρητίνη προκύπτει από την επιτόπου ανάμειξη δύο συστατικών, ενός συστατικού Α, που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και είναι η εποξειδική ρητίνη και ενός συστατικού Β, που είναι ο σκληρυντής (Εικόνα 3.1.1). Στην πράξη έχει επικρατήσει η ονομασία ρητίνη, υπονοώντας την ρητινίδειδή κόλλα.



**Εικόνα 3.1.1 :** Συστατικό Α και Β

Για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών ποιότητας των εποξειδικών ρητίνων (π.χ αντοχή, ιξώδες, μέτρο ελαστικότητας κ.λ.π ) ισχύουν διάφορες ξένες προδιαγραφές που έχουν θεσπίσει από την A.S.T.M ή την A.A.S.H.T.O ( Αμερικάνικες προδιαγραφές) ή από άλλους εθνικούς ή διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης. Πρέπει να ελέγχεται ότι οι μηχανικές αντοχές του τελικού σκληρυμένου εποξειδικού υλικού είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αντοχές του στοιχείου πάνω στο οποίο θα εφαρμοστεί. Ο προμηθευτής πρέπει να παρέχει χαρακτηριστικά στοιχεία ιδιοτήτων του διατεθέντος υλικού του και κατά προτίμηση σε ότι αφορά τα κατωτέρω τα οποία αναγράφονται στη προδιαγραφή A.A.S.H.T.O. T237-73.

Η προδιαγραφή αυτή περιλαμβάνει τις εξής δοκιμές :

- Μέγιστος χρόνος για χρησιμοποίηση μετά την ανάμειξη (pot- life ) κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Ειδικό βάρος (πυκνότητα ), κατά A.A.S.H.T.O T237
- Ιξώδες κατά Saybolt -Fyrol
- Δοκιμή ροής κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Δοκιμή προσφύσεως στο σκυρόδεμα κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Δοκιμή αντοχής σε λοξή διατμηση κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Δοκιμή θιξοτροπίας κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Δοκιμή υδατόαπορροφύσεως κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Δοκιμή συγκολλησεως νωπού σκυροδέματος επάνω σε σκληρυμένο σκυρόδεμα κατά A.A.S.H.T.O. T237.
- Δοκιμή αντοχής μετά από διύγρυνση κατά A.A.S.H.T.O. T237.

Η καταλληλότητα του εποξειδικού υλικού θα κρίνεται βάση των προσδιοριζόμενων ιδιοτήτων του από το εργαστήριο, ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο προορίζεται. Τα υλικά θα πρέπει να συνοδεύονται από εγχειρίδιο του κατασκευαστή το οποίο θα πρέπει να περιέχει τις εξής πληροφορίες : όνομα και περιγραφή προϊόντος, παρασκευάστρια εταιρία, μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά ( χρώμα, ιξώδες, χρόνος εργασιμότητας, χρόνος σκλήρυνσης, ημερομηνία λήξης, μέτρο ελαστικότητας, υδατοπερατότητα, θλιπτική και εφελκυστική αντοχή), μέτρα ασφαλείας για τους εργαζόμενους και το περιβάλλον.

Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή, λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξυράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Ο συντελεστής ιξώδους των εποξικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις δυο άλλες κατηγορίες ρητινών.

## **3.2. Πολυεστερικές ρητίνες**

Η πολυεστερική ρητίνη από την υγρή μορφή της πολυμερίζεται, πήζει και γίνεται στέρεη χωρίς να υπάρχει δυνατότητα να επανέλθει στην αρχική, υγρή της, μορφή. Ο πολυμερισμός (σκλήρυνση) γίνεται από την αντίδραση του επιταχυντή, με το καταλύτη που προστίθεται μέσα στο πολυεστέρα ξεχωριστά , πρώτα ο επιταχυντής και μετά ο καταλύτης (Εικόνα 3.2.1) . Σε συγκεκριμένες αναλογίες πάντα, προκαλώντας χημική αντίδραση, η οποία με τη σειρά της παράγει θερμότητα. Σχεδόν πάντα ο επιταχυντής έχει προστεθεί από το κατασκευαστή της ρητίνης κατά τη παρασκευή αυτής στη σωστή αναλογία, και έτσι όταν εμείς θέλουμε να τη χρησιμοποιήσουμε ρίχνουμε απλά τον καταλύτη σε αναλογία 10-20 γρ. ανα κιλό. Ο πολυμερισμός της ρητίνης όμως μπορεί να ξεκινήσει και αυτόματα χωρίς καταλύτη, όταν η θερμοκρασία ανέβει αρκετά στη μάζα της (π.χ πάνω από 50°C -

60°C). Γι'αυτό και πρέπει να την αποθηκεύουμε σε δροσερό μέρος (10°C έως 25°C) και να τη προφυλάσουμε από ηλιακή ακτινοβολία και χώρους όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες όπως μηχανοστάσια-εστίες θερμότητας κ.λ.π.



**Εικόνα 3.2.1:** Πολυεστέρας, Επιταχυντής και Καταλύτης.

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής συνθέτων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες, που παράγονται από την αντίδραση γλυκόζης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Η χημική αντίδραση, με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για τον λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη, το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή, η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση, συγκριτικά με τις εποξειδικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών, για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται, είναι η δυσάρεστη οσμή, λόγω της χημικής τους σύστασης.

### **3.3. Βινυλεστερικές Ρητίνες**

Όταν αναφερόμαστε σε βινυλεστερικές ρητίνες (Εικόνες 3.3.1), πρόκειται για υβριδικές ρητίνες, που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξειδικού πολυμερούς, με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις (πίνακας 3.3.1). Εξαιτίας της παρουσίας του εποξειδικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες, σε σχέση με τις πολυεστερικές, είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές. Οι υδροξυλικές ενώσεις, που περιέχονται στο εποξειδικό πολυμερές, σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην

επιφάνεια των ινών γυαλιού. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δε φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξειδικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών, λόγω συστολής ξηράνσεως.

Από την άλλη πλευρά όμως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση, όσο οι εποξειδικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξεως του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξειδικών και των πολυεστερικών ρητινών.

**Εικόνες 3.3.1 :**  
βινυλεστερικές ρητίνες.



### Carboxylic Acid Vinyl Ester Product Lineup

### Product Line-up



	Structural formula	CAS No.	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C/mmHg)	Flash Point (°C)	Specific Gravity (g/ml, (°C))	Polymer Tg (°C)
Vinyl acetate	$\text{CH}_3\text{COO-CH=CH}_2$	108-05-4	-96.5	72.7/760	-5.0	0.9342(20)	28
Vinyl propionate	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO-CH=CH}_2$	105-38-4	-80	90/760	4.5	0.9170(20)	
Vinyl butyrate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO-CH=CH}_2$	123-20-6	-80	116.7/760	19.5	0.9002(20)	-5
Vinyl caproate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COO-CH=CH}_2$	3050-69-9	-52	166/760	51.0	0.8870(20)	-20
Vinyl caprylate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COO-CH=CH}_2$	818-44-0	-31	90/15	75.0	0.8803(20)	
Vinyl caprate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COO-CH=CH}_2$	4704-31-8	-9.5	148/50	106	0.8752(20)	-60
Vinyl laurate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COO-CH=CH}_2$	2146-71-6	6	123/4	136	0.8721(20)	-75
Vinyl myristate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COO-CH=CH}_2$	5809-91-6	16	150/3	148	0.8675(20)	
Vinyl palmitate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COO-CH=CH}_2$	693-38-9	26	165/2	176	0.8609(30)	
Vinyl stearate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO-CH=CH}_2$	111-63-7	36	178.5/4.3	190	0.8517(30)	
Vinyl cyclohexane-carboxylate	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{COO-CH=CH}_2$			62/5		0.9946(20)	
Vinyl pivalate	$(\text{CH}_3)_3\text{CCOO-CH=CH}_2$	3377-92-2	-82	111/760	14.5	0.8709(20)	86
Vinyl octoate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8(\text{C}_2\text{H}_5)\text{CHCOO-CH=CH}_2$	94-04-2	-70	65/15	65.0	0.8728(20)	
Vinyl monochloroacetate	$\text{Cl-CH}_2\text{COO-CH=CH}_2$	2549-51-1	-34	136/760	51.0	1.1940(20)	35
Divinyl adipate	$\text{CH}_2=\text{CH-OCO-(CH}_2)_4\text{-COO-CH=CH}_2$	4074-90-2	26	125/22	116	1.0383(30)	
Vinyl methacrylate	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COO-CH=CH}_2$	4245-37-8	-76	40/38	16.0	0.9329(20)	
Vinyl crotonate	$\text{CH}_3\text{CH=CHCOO-CH=CH}_2$	14861-06-4	-60	132.7/760	32.0	0.9410(20)	
Vinyl sorbate	$\text{CH}_3\text{CH=CHCH=CHCOO-CH=CH}_2$	42739-26-4	-1	53/1	77.0	0.9580(20)	
Vinyl benzoate	$\text{C}_6\text{H}_5\text{COO-CH=CH}_2$	769-78-8	-32	203/760	82.0	1.0705(20)	75
Vinyl cinnamate	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH=CHCOO-CH=CH}_2$	3098-92-8	-28	125/7	132	1.0715(20)	

**Πίνακας 3.1.1 [43]**



### **3.4. Θερμική επεξεργασία των εποξικών ρητινών (curing)**

Η θερμική επεξεργασία των ρητινών (γνωστή και ως curing), είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για την ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Σε ένα τέτοιο τρισδιάστατο δίκτυο, τις τελικές ιδιότητες καθορίζουν το πηθός των διασταυρώσεων με δεσμούς και το μήκος των μακρομοριακών αλυσίδων. Η Θερμική επεξεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας συμβαίνουν οι χημικές αντιδράσεις συνήθως περιλαμβάνει (ανάλογα με το είδος των συστατικών) διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης με ελεγχόμενο ρυθμό και επιβολή πίεσης ή/και κενού αέρος. Μετά από τη διαδικασία αυτή, μπορεί να ακολουθεί επιπλέον θερμική κατεργασία υψηλής θερμοκρασίας (post-curing) για ορισμένο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι ιδιότητες του υλικού. Η θερμική κατεργασία αυτή εξελίσσεται σε ένα κοινό φούρνο, όπου διασφαλίζονται οι απαιτούμενες συνθήκες, είτε η ρητίνη είναι αρχικά σε υγρή μορφή, είτε σε μορφή φύλλων προ-πολυμερισμένης ρητίνης. Η θερμική κατεργασία που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει προφίλ τέτοιο, ώστε να επιτρέπει το πολυμερισμό της ρητίνης σε ολόκληρο τον όγκο της, να βελτιστοποιεί τη διάρκεια του πολυμερισμού και να απομακρύνει τα αέρια που έλκονται κατά τη διεργασία. Πολύ μεγάλη σημασία έχει ο ρυθμός ανόδου και πτώση της θερμοκρασίας, καθώς και το θερμοκρασιακό εύρος της κατεργασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του curing, τόσο υψηλότερη τιμή έχει η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ) της μήτρας.

Ένα μεγάλο ακόμα πλεονέκτημα είναι το χαμηλό ιξώδες που παρουσιάζουν σε ορισμένο εύρος θερμοκρασιών κατά τη θερμική κατεργασία, με αποτέλεσμα να ρέουν εύκολα, διαμέσου της φάσης ενίσχυσης και να επιτυγχάνεται πολύ καλή πρόσφυση με αυτή. Ένα από τα μειονεκτήματα της είναι ο μεγάλος συντελεστής θερμικής διαστολής, εξαιτίας του οποίου αναπτύσσονται θερμικές τάσεις στο σύνθετο υλικό. Οι νεότερες βελτιωμένες εποξικές ρητίνες παρουσιάζουν πολύ μικρό θερμικό συντελεστή, αλλά έχουν αρκετά υψηλό κόστος.

Ένα μεγάλο πρόβλημα της θερμικής κατεργασίας είναι η εμφάνιση πόρων στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού που προέρχονται από τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα κατά τη παρασκευή του. Οι θερμοσκληρυνόμενες εποξικές ρητίνες σε σύγκριση με τις θερμοπλαστικές μήτρες έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες που δεν εξαρτώνται τόσο από τη θερμοκρασία και παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ). Τέλος, ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι δεν ανακυκλώνονται, γεγονός που έχει αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον.

#### **4. Αποτίμηση αντοχής και συστήματα ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές**

Είναι γνωστό ότι το σκυρόδεμα ως δομικό υλικό έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Αναπτύσσει αντοχή που αυξάνει με το χρόνο, αλλά ταυτόχρονα υπόκειται στους νόμους φθοράς που διέπουν και τα υπόλοιπα δομικά υλικά. Όταν μία υπάρχουσα κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα πρόκειται να υποστεί κάποιας μορφής επέμβαση, ένα από τα θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι οι αβεβαιότητες ως προς τη φέρουσα ικανότητά της. Τα κυριότερα ερωτήματα που ανακύπτουν αφορούν στην αντοχή του σκυροδέματος, στην ύπαρξη ή όχι οπλισμού στις προβλεπόμενες από τη μελέτη θέσεις, στη διάμετρο και στις αποστάσεις μεταξύ των ράβδων του οπλισμού, στην πιθανότητα ο οπλισμός να έχει υποστεί διάβρωση, καθώς και πλήθος άλλα ερωτήματα που σχετίζονται με ορατές ρωγμές, αποφλοιώσεις και άλλες ενδείξεις βλαβών που ενδεχομένως έχει υποστεί η κατασκευή.

Η δομική κατάσταση του σκυροδέματος πολύ δύσκολα μπορεί να προσδιοριστεί μόνο με οπτικό έλεγχο. Για παράδειγμα, η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται λόγω διάβρωσης του οπλισμού, καθώς τα προϊόντα της οξειδωσης επεκτείνονται στον όγκο του σκυροδέματος και προκαλούν αποφλοίωση και ρηγμάτωση. Ο οπτικός έλεγχος μπορεί να εντοπίσει τις εξωτερικές ενδείξεις των προχωρημένων σταδίων της διάβρωσης, όπως είναι οι ρωγμές και η τοπική εκτίναξη του σκυροδέματος, αλλά μόνο οι πειραματικοί έλεγχοι διάγνωσης βλαβών μπορούν να παρέχουν μια πλήρη εικόνα της συνολικής κατάστασης της κατασκευής και της έκτασης των βλαβών.

Οι πληροφορίες που προκύπτουν από αυτούς τους ελέγχους κατά κανόνα έχουν πολύ σημαντική επίδραση στη επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επισκευής ή/και ενίσχυσης της κατασκευής. Οι έλεγχοι διάγνωσης βλαβών είναι κατά μία έννοια αντίστοιχοι με τους 'κλινικούς ελέγχους' που έχουν ως σκοπό τη διάγνωση των ασθενειών και των ατελειών στο σώμα της κατασκευής, έτσι ώστε να δώσουν τη δυνατότητα στο μηχανικό να προβεί στις κατάλληλες επισκευές και ενισχύσεις με τον καλύτερο δυνατό τρόπο μέσα στα επιβαλλόμενα όρια των διατιθέμενων μέσων και πόρων.

Τρία είναι τα στάδια που μπορούν να διακριθούν στη συνολική διαδικασία που απαιτείται για τον ανασχεδιασμό μιας υφιστάμενης κατασκευής. Το πρώτο είναι η αποτίμηση, δηλαδή η εξέταση της υπάρχουσας κατάστασης, η τεκμηρίωση του υφιστάμενου φορέα και τελικά η αποτίμηση της σεισμικής ικανότητας της κατασκευής. Το δεύτερο αφορά τη διαδικασία για τη λήψη της απόφασης και περιλαμβάνει την εξέταση πιθανών σχημάτων επέμβασης και την επιλογή λύσης, συμπεριλαμβανόμενης και της κατεδάφισης. Το τρίτο στάδιο αφορά το σχεδιασμό της λύσης που επελέγη και περιλαμβάνει την διαστασιολόγηση των μελών του επισκευασμένου/ενισχυμένου φορέα, την τεχνική περιγραφή των προβλεπόμενων εργασιών και το κόστος της λύσης.

Στο πρώτο στάδιο περιλαμβάνεται η αποτύπωση του φέροντα οργανισμού, η καταγραφή των βλαβών, καθώς και η εκτίμηση των συνοριακών συνθηκών, των κατακόρυφων φορτίων και των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της κατασκευής. Η αξιολόγηση των βλαβών και των ατελειών σε μεμονωμένα στοιχεία, δεν θα ωφελήσει αν τελικά δεν εκτιμηθεί η πιθανότερη παθολογική εικόνα του συνόλου της κατασκευής, που θα πρέπει να επιβεβαιωθεί από τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης που θα αποτιμά τη σεισμική της ικανότητα. Ανεξάρτητα από την ειδικότερη μέθοδο που θα επιλεγεί για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, είτε επιλεγεί μια προσεγγιστική μέθοδος είτε χρησιμοποιηθούν προχωρημένες

μέθοδοι ανελαστικών αναλύσεων, στις οποίες θα εκτιμηθεί η παραμορφωσιακή ικανότητα των μελών του φορέα , στο τέλος αυτού του σταδίου αποφασίζεται αν υπάρχει ανάγκη για ενίσχυση της κατασκευής.

Προφανώς για την απόφαση αυτή προαπαιτείται η επιλογή της "στάθμης επιτελεσματικότητας", δηλαδή της επιθυμητής συμπεριφοράς της κατασκευής , σε συνάρτηση με τον (τους) σεισμό(ους) σχεδιασμού, που μπορεί να εκφραστεί μέσω της πιθανότητας υπέρβασης της σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής της κατασκευής που θεωρείται 50 έτη. Με βάση το σημερινό κανονιστικό πλαίσιο, ως στάθμη επιτελεσματικότητας υποχρεωτικά πρέπει να επιλεγεί τουλάχιστον "η προστασία ζωής και περιουσίας των ενοίκων" ενώ η πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10%. Όμως για τα υφιστάμενα κτίρια θα ήταν λογικό να μπορεί να ρυθμιστεί και διαφορετικά. Το ίδιο θα μπορούσε να ισχύει μετά από οποιαδήποτε επέμβαση , εξασφαλίζοντας κατ' ελάχιστον την αρχική (προ της επέμβασης) ικανότητα του φορέα [19].

Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Στάθμη επιτελεσματικότητας φέροντος οργανισμού		
	Άμεση χρήση μετά τον σεισμό	Προστασία ζωής	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης
1 . 10%	A1	B1	Γ1
2 . 50%	A2	B2	Γ2

Οι στάθμες επιτελεσματικότητας του φέροντος οργανισμού ορίζονται ως εξής :

- «Άμεση χρήση μετά τον σεισμό» (A) είναι μια κατάσταση κατά την οποία αναμένεται ότι καμία λειτουργία του κτιρίου δεν διακόπτεται κατά τη διάρκεια και μετά τον σεισμό σχεδιασμού, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Είναι ενδεχομένο να παρουσιασθούν μερικές τριχοειδείς ρωγμές στον φέροντα οργανισμό.
- «Προστασία ζωής» (B) είναι μια κατάσταση κατά την οποία κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, χωρίς όμως να συμβεί θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός ατόμων εξαιτίας των βλαβών αυτών, και χωρίς να συμβούν ουσιώδεις βλάβες στην οικοσκευή ή τα αποθηκευόμενα στο κτίριο υλικά.
- «Οιονεί κατάρρευση» (Γ) είναι μία κατάσταση κατά την οποία κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν εκτεταμένες και σοβαρές ή βαριές (μη επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες στον φέροντα οργανισμό, ο οποίος όμως έχει ακόμα την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (κατά, και για ενα διάστημα μετά , τον σεισμό) , χωρίς πάντως να διαθέτει άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης [21].

Το δεύτερο στάδιο που αφορά την λήψη απόφασης για την επέμβαση , αποτελεί το δυσκολότερο ίσως τμήμα της όλης διαδικασίας ,επειδή σ' αυτό το στάδιο εμπλέκεται ένα πλήθος παραγόντων που δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθούν. Θα πρέπει να έχουν αξιολογηθεί όλες οι παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την απόφαση προς κάθε μια από τις παρακάτω τρεις κρίσιμες δυνατές επιλογές :

- Επισκευή της κατασκευής (αν υπάρχουν βλάβες ) ή καμία επέμβαση. Όπου ως επισκευή ορίζεται η διαδικασία επέμβασης σε μία κατασκευή με βλάβες ,η οποία αποκαθιστά τα προ της βλάβης χαρακτηριστικά των στοιχείων της και επαναφέρει την κατασκευή στην αρχική της κατάσταση.
- Ενίσχυση της κατασκευής. Όπου ως ενίσχυση ορίζεται η διαδικασία επέμβασης , σε μία κατασκευή , με ή χωρίς βλάβες , η οποία επαυξάνει τη φέρουσα ικανότητα του φορέα σε επίπεδο υψηλότερο από αυτό του αρχικού του σχεδιασμού.
- Κατεδάφιση της κατασκευής και ανέγερση νέας.

Η απόφαση για την κρίσιμη επιλογή, μεταξύ επισκευής, ενίσχυσης και κατεδάφισης /ανακατασκευής καθώς και της ειδικότερης διαδικασίας επέμβασης που τελικά θα προταθεί, είναι προφανώς αποτέλεσμα μιας διαδικασίας επαναληπτικής εξέτασης εναλλακτικών σχημάτων επέμβασης , με στόχο την αποδεκτή σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής ως σύνολο.

Αν επιλεγεί η λύση της ενίσχυσης ,η αναζήτηση του σχήματος επέμβασης μπορεί να γίνει σε δυο κατευθύνσεις. Στην πρώτη κατεύθυνση θα αναζητηθεί η λύση με την οποία η κατασκευή ενισχύεται ως σύνολο έτσι ώστε να μειωθεί η ένταση στα αδύναμα στοιχεία της κατασκευής σε επίπεδα χαμηλότερα από τα ανεκτά όρια ικανότητας τους. Στη δεύτερη κατεύθυνση θα αναζητηθεί η λύση με την οποία ενισχύονται τα αδύναμα στοιχεία της κατασκευής προσδίδοντας πρόσθετη ικανότητα (αντοχή, πλαστιμότητα) ή άλλα ελλείποντα χαρακτηριστικά σε μεμονωμένα στοιχεία. Η πρώτη κατεύθυνση ακολουθείται συνήθως όταν τα αδύναμα στοιχεία της κατασκευής είναι πολλά και επομένως χρειάζεται μία συνολική αντιμετώπιση του θέματος , ενώ η δεύτερη κατεύθυνση ακολουθείται όταν αξιολογείται ότι πρέπει να εξαιρεθούν μόνο κάποιες τοπικές αδυναμίες της κατασκευής. Πάντως, για κατασκευές που έχουν υποστεί βλάβες από έναν ισχυρό σεισμό , ανεξάρτητα από το παραπάνω αποτέλεσμα, η εικόνα των βλαβών αποτελεί αδιάψευστο στοιχείο της σεισμικής ικανότητας που επηρεάζει ιδιαίτερα την απόφαση. Έτσι σε κατασκευές με εκτεταμένες και βαριές βλάβες , η επέμβαση πρέπει να στοχεύει στην ενίσχυση της κατασκευής.

Το τρίτο στάδιο που αφορά τον σχεδιασμό της λύσης επέμβασης , περιλαμβάνει τη διαστασιολόγηση των επισκευασμένων/ενισχυμένων μελών του. Η χρήση νέων στοιχείων σε συνεργασία με τα παλαιά δημιουργεί νέα πολυφασικά, σύνθετα στοιχεία, η διαστασιολόγηση των οποίων συχνά από τις συνήθεις διαδικασίες διαστασιολόγησης μονολιθικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Εξάλλου η χρήση νέων υλικών (υφασμάτων ή ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή) για την ενίσχυση των υφιστάμενων στοιχείων, δημιουργεί ένα ενδιαφέρον πεδίο εφαρμογής που όμως απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω έλλειψης εμπειρίας και συχνά υπερβολικού ενθουσιασμού που πηγάζει από την ευκολία εφαρμογής στην πράξη. Η αναδιαστασιολόγηση του φορέα καταλήγει πάντα στα σχέδια λεπτομερειών της οριστικής μελέτης επέμβασης και κοστολόγηση των εργασιών. Η επιλογή πρέπει τελικά να κριθεί οικονομικά ωφέλιμη. Γιατί έχει παρατηρηθεί συχνά να επιλέγονται λύσεις εξοργιστικά αστοικονομικές χωρίς ουσιαστικό λόγο [19].

## 4.1. Ανίσωση ασφαλείας – Η λογική των ελέγχων

Η ανίσωση είναι γενική ,αφορά δε εντατικά ή παραμορφωσιακά μεγέθη ή συνδυασμό τους. Έτσι, η ανίσωση ασφαλείας μπορεί να αφορά τον γενικό έλεγχο ισορροπίας ενός δομήματος ως συνόλου (ανατροπή και ολίσθηση), ή τον έλεγχο μετατροπής του σε μηχανισμό, ή τον έλεγχο του εύρους μιας ρωγμής ή του μεγέθους ενός βέλους κάμψης ή, ακόμη, την επαλήθευση ότι η επιβαλλόμενη μετακίνηση της κορυφής του δομήματος είναι μικρότερη από την αντίστοιχη διαθέσιμη μετακίνηση («αντίσταση ») πριν από την αστοχία.

Η ανίσωση ασφαλείας που εφαρμόζεται κατά την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό υφιστάμενων δομημάτων, έχει την ίδια γενική μορφή που προβλέπεται στους Ευρωκώδικες :

$$S_d < R_d , \text{ με}$$

$$S_d = \gamma_{sd} \times S(S_k \times \gamma_f) \text{ και}$$

$$R_d = \left(\frac{1}{\gamma_{Rd}}\right) \times R\left(\frac{R_k}{\gamma_m}\right) ,$$

όπου :

- $S_d$  Οι τιμές σχεδιασμού (και επανελέγχου) των εντατικών ή παραμορφωσιακών μεγεθών που προκαλούνται από τις δράσεις.
- $R_d$  Οι τιμές σχεδιασμού (και επανελέγχου) των διαθέσιμων αντίστοιχων αντιστάσεων (εντατικών ή παραμορφωσιακών μεγεθών).

Εντατικά μεγέθοι («δυνάμεις») είναι οι ορθές και τέμνουσες δυνάμεις ( N και V ) καθώς και οι καμπτικές και στρεπτικές ροπές (M και T), που καταπονούν δομικά στοιχεία (π.χ. έναν κόμβο ενός χωρικού πλαισιώματος ) ή και διεπιφάνειες σε περιπτώσεις επισκευών / ενισχύσεων (π.χ. μεταξύ παλαιών και νέων υλικών ή στοιχείων).

Παραμορφωσιακά μεγέθοι («παραμορφώσεις») είναι οι κάθε είδους μεταθέσεις και μετακινήσεις (d), τα βέλη κάμψης , οι στροφές (θ) ραβδόμορφων στοιχείων και οι γωνιακές παραμορφώσεις (γ) τοιχείων ή οι καμπυλότητες (1/r) , που προκύπτουν από τις επιβαλλόμενες δράσεις (π.χ. λόγω εξωτερικών φορτίων ή λόγω έμμεσων δράσεων, δηλαδή επιβαλλόμενων ή και παρεμποδιζόμενων παραμορφώσεων ).

- $S_k$  Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των βασικών και τυχηματικών δράσεων, για τις οποίες υπάρχει ορισμένη πιθανότητα υπερβάσεως σε 50 έτη.
- $R_k$  Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των ιδιοτήτων των υλικών που διαμορφώνουν τις αντιστάσεις και έχουν ορισμένη πιθανότητα υποσκελίσεως .

Για τις αντιπροσωπευτικές τιμές των δράσεων  $S_k$ , γενικώς υιοθετούνται και χρησιμοποιούνται οι καθιερωμένες τιμές σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, πλην ειδικών συνθηκών κατά την κρίση και έγκριση της Δημόσιας Αρχής.

Για τις αντιπροσωπευτικές τιμές των αντιστάσεων  $R_k$ , σε όρους εντατικών ή παραμορφωσιακών μεγεθών, ισχύουν τα εξής :

- ❖ Ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου, τον τύπο αστοχίας και το είδος του ελεγχόμενου στοιχείου, εκλέγονται κατά περίπτωση οι μέσες τιμές ή άλλες χαρακτηριστικές τιμές, με κατάλληλα ποσοστημόρια πιθανότητας .
- ❖ Ειδικότερα οι αντιπροσωπευτικές αυτές τιμές, για μεν τα υφιστάμενα υλικά θα εξαρτώνται και από τη στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων, για δε τα προστιθέμενα υλικά θα εξαρτώνται και από τις εκτιμώμενες αποκλίσεις ομοιομορφίας κατά την εφαρμογή των επεμβάσεων, δηλαδή θα εξαρτώνται από το μέγεθος της προστιθέμενης διατομής και από την προσπελασιμότητα της περιοχής επεμβάσεως .
- $\gamma_f, \gamma_m$  Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τις δράσεις και τις ιδιότητες των υλικών, με τους οποίους λαμβάνονται υπόψη οι ενδεχόμενες δυσμενείς αποκλίσεις των αντίστοιχων μεταβλητών από τις αντιπροσωπευτικές τιμές .
- $\gamma_{Sd}, \gamma_{Rd}$  Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας με τους οποίους λαμβάνονται υπόψη οι αυξημένες (σε σχέση με το νέο κανονισμό νέων κτιρίων) αβεβαιότητες των προσομοιωμάτων, μέσω των οποίων εκτιμώνται οι συνέπειες των δράσεων και οι κάθε είδους αντιστάσεις .

Για τα νέα κτίρια, οι συντελεστές αυτοί δεν παρουσιάζονται αυτοτελώς, αλλά είναι ενσωματωμένοι στους  $\gamma_f$  και στους  $\gamma_m$ . Για τα υπό επανέλεγχο υφιστάμενα κτίρια, ορισμένα προσομοιώματα εμπεριέχουν αβεβαιότητες στη μαθηματική έκφραση των αντίστοιχων φυσικών φαινομένων, οι οποίες οφείλουν να αντισταθμισθούν με κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_{Sd}$  και  $\gamma_{Rd}$  έναντι αβεβαιότητας προσομοιωμάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να παρατηρηθεί και μια υπερευαισθησία του προσομοιώματος έναντι μεταβαλλόμενων τιμών ορισμένων παραμέτρων, με δυσανάλογη διαφοροποίηση του τελικού αποτελέσματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται μια «ανάλυση ευαισθησίας» και διερεύνηση, με σκοπό την ενδεχόμενη αλλαγή σχεδιασμού (ή και προσομοιώματος) κατά τρόπον ώστε να περιορισθεί αυτή η υπερευαισθησία [21].

## 4.2. Συστήματα ενίσχυσης

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας ή οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά είναι δύο τύπων :

- 4.3 "υγρής εφαρμογής" ή "επί τόπου σκλήρυνσης της μήτρας" και  
4.4 "προκατασκευασμένα", στα οποία η σκλήρυνση της μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής.

## 4.3. Συστήματα υγρής εφαρμογής

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούνται από συνεχείς ίνες μίας κυρίως διεύθυνσης, χωρίς μήτρα ("ξηρή" κατάσταση).
- Υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις (π.χ  $0^\circ$  και  $90^\circ$  ή  $45^\circ \pm$  σε σχέση με τον άξονα του υπό ενίσχυση μέλους, χωρίς μήτρα ("ξηρή" κατάσταση).
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics), αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας κυρίως διεύθυνσης, προεμποτισμένα με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics), αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμποτισμένα με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα ("ξηρή" κατάσταση), συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), που εμποτίζεται με ρητίνη, ενώ τυλίγεται (π.χ με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος.
- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), που ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος, υφίσταται ενδεχομένως και πρόσθετο εμποτισμό (Εικόνες 4.3 α,γ)



(α)



(β)



(γ)

**Εικόνες 4.3 :** (α) Ύφασμα σε ρολό και συνεχείς ίνες σε μορφή νήματος, (β) Προκατασκευασμένα ελάσματα σε μορφή ρόλων και (γ) Ύφασμα

#### **4.4. Προκατασκευασμένα υλικά**

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα και σχετικά δύσκαμπτα ελάσματα (strips), που επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρόλων (“κουλούρες”-Εικόνα 4.3β) και παράγονται με τη μέθοδο της εξέλασης (pultrusion) ή της στρωμάτωσης (lamination), σπανιότερα. Στη μέθοδο της εξέλασης, οι ίνες είναι συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ενώ στη μέθοδο της στρωμάτωσης επιτρέπεται η χρήση ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (π.χ παράλληλες και κάθετες στη διεύθυνση των ελασμάτων ή και υπό γωνίες  $\pm 45^\circ$ ). Τα ελάσματα που παράγονται προορίζονται συνήθως για την τοποθέτησή τους σε εγκοπές με σκοπό την αύξηση της καμπτικής αντοχής υφισταμένων μελών σκυροδέματος
- Προκατασκευασμένοι μανδύες (jackets) – κελύφη (shells). Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται περιμετρικά των υποστυλωμάτων με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής .
- Προκατασκευασμένες γωνίες (angles) οι οποίες επικολλούνται μέσω ρητίνης και εφαρμόζονται στην ενίσχυση πλακοδοκών έναντι τέμνουσας .

Γενικά μπορεί να διαπιστωθεί πως όταν η εφαρμογή αφορά επίπεδες επιφάνειες (π.χ καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών) προτιμούνται τα προκατασκευασμένα ελάσματα έναντι υφασμάτων ή φύλλων, ενώ όταν η εφαρμογή αφορά ενίσχυση υποστηλωμάτων με μανδύες ή διατμητική ενίσχυση δοκών προτιμάται η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου.

#### **4.5. Προετοιμασία για εφαρμογή και τεχνικές επικόλλησης**

Για την αρτιότερη δυνατή εφαρμογή της τεχνικής ενίσχυσης μέσω σύνθετων υλικών πρέπει να φροντίζουμε ώστε :

- 1) Ο σοβάς καθαρίζεται και αποκολύπτεται το σκυρόδεμα στο προς ενίσχυση δομικό στοιχείο. Αφαιρούνται τα χαλαρά τμήματα και το υπόστρωμα καθαρίζεται και τρίβεται με κατάλληλα μέσα, (όπως φαίνεται στο δίπλα σχήμα) ανάλογα με το βαθμό και την έκταση της αποσάθρωσης (αμμοβολή, υδροβολή, συρματοβουρτσα κ.λ.π). Το υπόστρωμα εφαρμογής των σύνθετων υλικών πρέπει να είναι επίπεδο, στεγνό, απαλλαγμένο από υλικά που εμποδίζουν την πρόσφυση και να διαθέτει ικανοποιητικές αντοχές. Η σκόνη απομακρύνεται με απορροφητική σκούπα.
- 2) Εφόσον το σύνθετο υλικό καλύπτει και γωνίες του στοιχείου σκυροδέματος αυτές στρογγυλεύονται με τριβείο σε ακτίνα 2-4cm.
- 3) Η επιφάνεια του σκυροδέματος διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται καλά. Η υγρασία δεν επιτρέπεται να είναι περισσότερο από 4%.
- 4) Μετά την σκλήρυνση του συγκολλητικού υλικού, η επιφάνεια λειαίνεται έτσι ώστε να μην υπάρχει ανωμαλία σε ύψος μεγαλύτερο από 1mm.
- 5) Η επιφάνεια αναμονής επαλείφεται με εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του ελάσματος. Η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερο πάχος, που είναι της τάξης των 10mm, στην κεντρική περιοχή επαφής, έτσι ώστε κατά την τοποθέτηση του ελάσματος η κόλλα να





προχωράει προς τα έξω όταν συμπιεστεί. Τα χαρακτηριστικά της κόλλας προδιαγράφονται από τον προμηθευτή του σύνθετου υλικού.

- 6) Το φύλλο του σύνθετου υλικού κόβεται με πολύ καλό ψαλίδι στις απαιτούμενες διαστάσεις, τοποθετείται προσεχτικά, καλά τεντωμένο στη νωπή επίστρωση και πατιέται με ρολό, για καλύτερη επαφή με το υπόστρωμα, πλήρη εμποτισμό του και απομάκρυνση των φυσαλίδων αέρα. Το φύλλο δεν πρέπει να διπλώνεται. Μετά την τοποθέτηση του ελάσματος, τυχόν εγκλωβισμένος αέρας μπορεί να εντοπιστεί με ελαφριά χτυπήματα πάνω στο έλασμα (ηχητικός έλεγχος). Η κόλλα που περισσεύει αφαιρείται.



Στην πρώτη φωτογραφία βλέπουμε τον τρόπο κοπής στη δεύτερη τον τρόπο τοποθέτησης περιμετρικά του υποστηλώματος και στην τρίτη τον τρόπο αφαίρεσης της κόλλας που περισσεύει.

- 7) Μετά την πάροδο χρόνου μισής έως μιας ώρας, αφαιρείται το προστατευτικό κάλυμα του φύλλου και οι ίνες επαλείφονται με μια δεύτερη στρώση της ίδιας ρητίνης.
- 8) Σε εφαρμογές όπου απαιτούνται παραπάνω της μιας στρώσης υφάσματος, η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται, με τοποθέτηση της ρητίνης στην ελεύθερη επιφάνεια του ελάσματος.
- 9) Τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα “πεταχτό” τσιμεντοκονίαμα για προστασία των φύλλων του σύνθετου υλικού από υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά) και άλλες περιβαλλοντικές προσβολές.



Παρακάτω παρουσιάζουμε τις τεχνικές επικόλλησης των υφασμάτων και των ελασμάτων:

- ❖ **Δια χειρός επικόλληση** . Είναι η πιο συνηθισμένη τεχνική που εφαρμόζεται στην Ελλάδα. Με την τεχνική αυτή επικολλούνται τόσο υφάσματα (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη προεμποτισμένων) όσο και προκατασκευασμένα στοιχεία όπως ελάσματα. Η επικόλληση γίνεται σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εποξειδικών ρητινών.
- ❖ **Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη** . Για αυτή την τεχνική απαιτείται ειδική συσκευή ρομπότ. Βασικά πλεονέκτηματα αυτής της τεχνικής είναι η μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής και ο καλός ποιοτικός έλεγχος.
- ❖ **Εφαρμογή με προένταση**. Τα ελάσματα βρίσκονται υπο τάνυση και έτσι εκμεταλλευόμεστε όλα τα βασικά πλεονεκτήματα της προέντασης. Έχει όμως αυξημένο βαθμό δυσκολίας.
- ❖ **Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση**. Για την πραγματοποίηση αυτής τα μεθόδου απαιτούνται ειδικές συσκευές θέρμανσης. Βασικά πλεονεκτήματα

αυτής είναι η ταχύτητα εφαρμογής της ενίσχυσης ακόμα και σε περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας.

- ❖ **Προκατασκευασμένα στοιχεία.** Συνιθησμένες μορφές αυτών είναι : ελάσματα, γωνίες, μανδύες-κελυφών.
- ❖ **Εφαρμογή σε εγκοπές .** Σε αυτή την τεχνική επικολλούμαι ράβδους ή ελάσματα σε εγκοπές και κερδίζουμε σε καμπτική αντοχή υφισταμένων μελών σκυροδέματος.

## **5. Μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών**

### **5.1. Αποκόλληση σύνθετων υλικών και ρωγμές**

#### **5.1.1 Γενικά**

Η ενίσχυση διάφορων τύπων δομικών στοιχείων με σύνθετα υλικά απαιτεί ιδιαίτερη επιμέλεια τόσο σε τεχνικά θέματα εφαρμογής στο εργοτάξιο όσο και στην τήρηση συγκεκριμένων κανόνων για την καλύτερη εκμετάλλευση των μηχανικών χαρακτηριστικών αυτών των υλικών. Καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης/επισκευής με σύνθετα υλικά είναι η συνεργασία του πρόσθετου οπλισμού με την υποκείμενη επιφάνεια. Αυτή η συνεργασία εξασφαλίζεται μέσω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών, απαιτείται, δηλαδή, ισχυρός δεσμός μεταξύ των δύο υλικών, ο οποίο εξασφαλίζεται μέσω της συγκολλητικής ύλης (κόλλα). Σε αρκετές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί αστοχία δομικών στοιχείων ενισχυμένων με ινοπλισμένα πολυμερή με φορτία αρκετά μικρότερα από τα φορτία που είχαν εκτιμηθεί κατά την επιλογή της ενίσχυσης και τη διαστασιολόγηση της. Αυτό συμβαίνει λόγω υπολειτουργίας των σύνθετων υλικών με αποτέλεσμα να μη φτάνουν στην οριακή τάση εφελκυστικής αστοχίας τους αλλά να χάνουν τη δυνατότητα παραλαβής επιπλέον τάσεων και να “αχρηστεύονται”, παρόλο που τα ίδια δε θραύονται.

Δύο βασικοί παράγοντες που προκαλούν την υπολειτουργία των ενισχύσεων από ινοπλισμένα πολυμερή είναι το φαινόμενο της αποκόλλησής τους (delamination) και της ανεπαρκούς αγκύρωσης (insufficient anchorage). Τα δύο αυτά φαινόμενα συναντώνται πολύ συχνά και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και καλή γνώση των θεμάτων γύρω από τη συνεργασία υποβάθρου και ινοπλισμένου πολυμερούς για την αποφυγή τους.

#### **5.1.2 Ρωγμές**

Η ρηγμάτωση είναι σύμφυτη με τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω της μικρής του εφελκυστικής αντοχής. Η εμφάνιση όμως των ρωγμών δεν συνεπάγεται αυτόματα και έλλειψη λειτουργικότητας ή ανθεκτικότητας της κατασκευής ,γι’ αυτό και η φύση τους χρήζει ιδιαίτερης προσοχής για διεξοδική διερεύνηση από τον αρμόδιο μηχανικό. Δεν είναι λίγες οι φορές που οι ρωγμές λόγω υπέρβασης αντοχής αποτελούν ένδειξη στατικής ανεπάρκειας του φορέα και πιθανόν η όποια επισκευή, να επεκταθεί και σε περιοχές πέρα των ρωγμών. Αν κριθεί απαραίτητη η επισκευή της ρηγματωμένης περιοχής, εκτός από αισθητικής άποψης, ο μηχανικός θα επέμβει είτε απομακρύνοντας την αιτία είτε ενισχύοντας το δομικό φορέα.

Οι ρωγμές διακρίνονται σε **ενεργές** και **μη-ενεργές**. Στις ενεργές, οι οποίες έχουν και μεγαλύτερο βαθμό επικινδυνότητας, εξακολουθούν να υπάρχουν μετακινήσεις με άμεσο επακόλουθο την αύξηση του εύρους ή του μήκους τους. Η συνεχής εποπτεία αλλά και παρέμβαση κρίνονται απαραίτητες. Στις μη-ενεργές ρωγμές δεν παρουσιάζονται περαιτέρω μετακινήσεις και δεν προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία παρά μόνο σε περιπτώσεις διείσδυσης της υγρασίας με συνέπεια διάβρωσης των ράβδων οπλισμού. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι ρωγμές καθ' εαυτές δεν αποτελούν πρόβλημα για την ασφάλεια της κατασκευής, εφόσον το άνοιγμά τους περιορίζεται κάτω από ορισμένα όρια, τα οποία καθορίζονται από τις απαιτήσεις για την εμφάνιση της κατασκευής, την προστασία των οπλισμών από διάβρωση και τη στεγανότητα. Το εύρος της ρωγμής που θεωρείται ανεκτό από άποψη εμφάνισης εξαρτάται από τη φύση του επιχρίσματος, αλλά και από το είδος χρήσης της κατασκευής.

Στον πίνακα 5.1.2 παρατίθενται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα μέγιστα αποδεκτά όρια εύρους ρωγμών για διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος, όπου θα καθορίσουν και τη διαδικασία επισκευής τόσο για αισθητικούς όσο και για λειτουργικούς λόγους και στην εικόνα 5.1.2 παρουσιάζεται το μηχανήμα μέτρησης εύρους ρωγμών.

<b>Συνθήκες Περιβάλλοντος</b>	<b>Μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος ρωγμής</b>
Ξηρό περιβάλλον	0,41 mm
Υγρό περιβάλλον ή έδαφος	0,30 mm
Χημικές προσβολές	0,18 mm
Θαλάσσιες κατασκευές	0,15 mm
Δεξαμενές	0,10 mm

**Πίνακας 5.1.2 :** Μέγιστο Επιτρεπόμενο Εύρος Ρωγμών [33] .



**Εικόνα 5.1.2 :** Όργανο μέτρησης εύρους ρωγμής

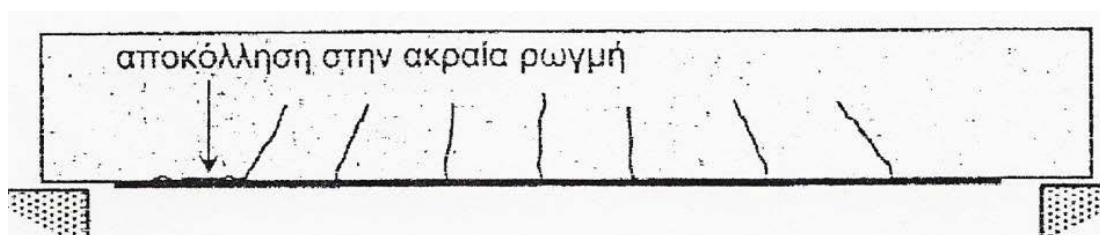
### **5.1.3 Η έννοια και οι μηχανισμοί αποκόλλησης**

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός της εφελκυστικής αστοχίας των σύνθετων υλικών, δεν ενεργοποιείται, αλλά αντ' αυτού παρατηρείται αποκόλληση τους από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Η αποκόλληση αυτή, όπως αναφέρθηκε οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος, σύνθετων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω σκυροδέματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνήθεις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας (σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας αφορά στο σκυρόδεμα και λαμβάνεται ίσως με 1.5). Κατά την εμφάνιση του φαινομένου της αποκόλλησης παρατηρείται πρόωρη αστοχία της εξωτερικής ενίσχυσης, αφού παύει να συνεργάζεται με το δομικό στοιχείο και έτσι δεν είναι ικανό να παραλάβει τις τάσεις για τις οποίες σχεδιάστηκε, με τελικό αποτέλεσμα τη θραύση του δομικού στοιχείου. Πρέπει να επισημανθεί ότι ορισμένες φορές η αποκόλληση λαμβάνει χώρα σε αρκετά μικρά ποσοστά φορτίων σε σχέση με τα φορτία σχεδιασμού, ενώ συμβαίνει σπάνια κατά τη φόρτιση με τα φορτία λειτουργίας της κατασκευής. Κάτι τέτοιο, βέβαια, είναι ακόμα πιο επικίνδυνο καθώς συμβαίνει σε έκτακτες καταστάσεις, ενώ συμβαίνει έκτακτα, χωρίς καμία προειδοποίηση (π.χ. μεγάλες παραμορφώσεις, βέλη κλπ.)

Κατά την ενίσχυση δομικών στοιχείων με σύνθετα υλικά μπορούν να παρατηρηθούν σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία οι εξής διαφορετικοί τύποι αποκόλλησης: (α) αποκόλληση στην ακραία ρωγμή, (β) αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή, (γ) αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή, (δ) διατμητική αστοχία στο άκρο-αποκόλληση της επικάλυψης, (ε) ατέλειες της επιπεδότητας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση της έννοιας των ρωγμών και των παραπάνω μηχανισμών αποκόλλησης.

#### **5.1.3.1. Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή**

Η εμφάνιση της αποκόλλησης στην ακραία ρωγμή του δομικού στοιχείου (περιοχή αγκύρωσης της λωρίδας ενίσχυσης ινοπλισμένου πολυμερούς) συνεπάγεται άμεσα την εξουδετέρωση του μήκους αγκύρωσης που υπολογίστηκε. Στο παρακάτω σχήμα 5.1.3.1 φαίνεται μία αμφιέριστη δοκός ενισχυμένη με ινοπλισμένο πολυμερές στο εφελκυσμένο τμήμα της, με σημειωμένη αποκόλληση υλικού στην ακραία ρωγμή.



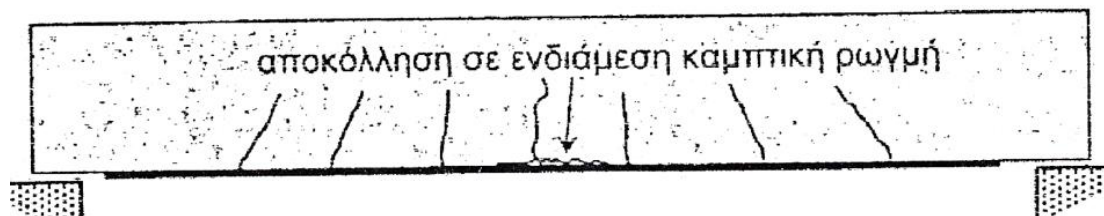
Σχήμα 5.1.3.1 [36].

Η εμφάνιση αυτής της ρωγμής είναι πιθανό να προέρχεται από μια κατασκευαστική αδυναμία του δομικού στοιχείου που κατά την επιβολή της δύναμης συσσωρεύει τάσεις και οδηγεί σε άνοιγμα ρωγμής στην περιοχή. Το φαινόμενο αυτό είναι συνηθισμένο σε παλαιότερες κατασκευές οι οποίες έγιναν από μη εξειδικευμένους εργάτες, με μικρή επιμέλεια και κατασκευαστικές ατέλειες. Τέτοιου είδους αστοχία παρατηρείται επίσης συχνά σε περιπτώσεις επισκευής μετά από

σεισμό, όπου γίνεται τοποθέτηση ελασμάτων με μορφή ανοικτών μανδυών. Από το σχήμα, βλέπουμε ότι η εμφάνιση μιας τέτοιας ρωγμής στη περιοχή αγκύρωσης , δημιουργεί αποκόλληση σε μια σχετικά διευρυμένη περιοχή γύρω από τη ρωγμή. Η αποκολλημένη περιοχή σταματά να παραλαμβάνει επιπλέον τάσεις ενώ η συνάφεια με το σκυρόδεμα έχει χαθεί. Για να μην επέλθει αποκόλληση στη περιοχή αγκύρωσης, πρέπει να υπολογιστεί το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης της ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή. Σε περίπτωση που η αγκύρωση που υπολογιστεί δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί, θα πρέπει να ελαττώσουμε τη μέση διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ενίσχυσης δομικού στοιχείου, και αυτό επιτυγχάνεται είτε με αύξηση του πλάτους του ελάσματος, είτε με μείωση του πάχους του.

### 5.1.3.2. Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή

Σε περιπτώσεις κάμψης εκτός επιπέδου (συχνή σε περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων) είναι πιθανό να εμφανιστούν καμπτικές ρωγμές στην περιοχή ενδιάμεσα των στηρίξεων). Πρόκειται για οριζόντιες μη λοξές ρωγμές στις οποίες παρατηρούνται χαμηλές τιμές τέμνουσας (η μέγιστη τιμή ροπής). Η χαμηλή αυτή τέμνουσα, αλλάζει τη συμπεριφορά του ελάσματος στη περιοχή γύρω από τη ρωγμή. Στο ακόλουθο σχήμα 5.1.3.2 φαίνεται μια χαρακτηριστική περίπτωση αποκόλλησης σε μια μεσαία περιοχή του ελάσματος, μακριά από τις περιοχές αγκύρωσης, όπου έχουμε χαμηλή τιμή διάτμησης.



Σχήμα 5.1.3.2 [36] .

Τα διαθέσιμα προσομοιώματα για τον υπολογισμό της αγκύρωσης, υπολογίζουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για αποκόλληση σε περιοχές καμπτικών ρωγμών, ως εξής,

$$1. \text{ Για } \quad \text{τότε} \quad \varepsilon_{fb,d,ft} = a_{ft} * \frac{0.5 * k_c * k_b}{\gamma_b} * \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_{f*ts}}}$$

2. Για      τότε

$$\varepsilon_{fb,d,ft} = a_{ft} * \frac{0.5 * k_c * k_b}{\gamma_b} * \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_{f*ts}} * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)}$$

όπου:

$l_b$ : το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς

$l_{b,max}$ : το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος αγκύρωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς



$\epsilon_{fbd,ft}$ : η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του ινοπλισμένου πολυμερούς  
 $\alpha_{ft}$ : συντελεστής προσαύξησης της οριακής δύναμης αντοχής, ίσος με 1.3  
 $k_c$ : συντελεστής συμπίκνωσης σκυροδέματος υποβάθρου  
 $k_b$ : συντελεστής μεγέθους  
 $\gamma_b$ : συντελεστής ασφάλειας σκυροδέματος  
 $f_{ctm}$ : μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος  
 $E_f, t_s$ : μέτρο ελαστικότητας και πάχος του υλικού ενίσχυσης.

### 5.1.3.3. Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή

Η βασική διαφορά του τύπου αυτού αποκόλλησης σε σχέση με τις αποκολλήσεις εκατέρωθεν καμπτικής ρωγμής είναι ότι οι ρωγμές που προκαλούν την αποκόλληση βρίσκονται σε θέσεις όπου μπορεί να επικρατεί διάτμηση αρκετά μεγάλου μέτρου. Το γεγονός αυτό κάνει δυσμενέστερη τη δράση τους και η αποκόλληση του ελάσματος εκατέρωθεν τους είναι αυξημένη, συνεπώς πρέπει να περιοριστεί η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση σε σχέση με την απλή καμπτική που αναλύθηκε παραπάνω. Θεωρώντας ότι η προσαύξηση της οριακής δύναμης αποκόλλησης αυξάνεται κατά μικρότερο ποσοστό της τάξης του 25% οι παραπάνω τύποι 1 και 2 τροποποιούνται ως εξής:

3. Για τότε

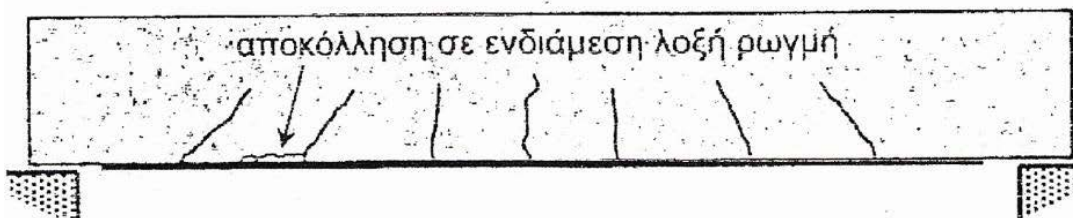
$$\epsilon_{fbd,ft} = \alpha_{ft-sh} * \frac{0.5 * k_c * k_b}{\gamma_b} * \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f * t_s}}$$

4. Για τότε

$$\epsilon_{fbd,ft} = \alpha_{ft-sh} * \frac{0.5 * k_c * k_b}{\gamma_b} * \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f * t_s} * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)}$$

όπου πλέον  $\alpha_{ft-sh}$  λαμβάνεται ίσος με 1.25.

Το σχήμα 5.1.3.3 παρουσιάζει μια τέτοια αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή:



Σχήμα 5.1.3.3 [36].

#### **5.1.3.4. Διατμητική αστοχία στο άκρο – αποκόλληση της επικάλυψης**

Η αποκόλληση των σύνθετων υλικών λόγω της ανάπτυξης διατμητικής ρωγμής από άκρο με κατεύθυνση επέκτασης περίπου οριζόντια (κάπου μεταξύ της κάτω στρώσης οπλισμού χάλυβα και της κόλλας), αποτελεί έναν από τους πιο συνηθισμένους μηχανισμούς αστοχίας δοκών (και πλακών) ενισχυμένων σε κάμψη. Ο μηχανισμός αυτός οφείλει τη γένεση του κατά βάση στην ανάπτυξη σημαντικών οριζοντίων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του οπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων, στη στρώση επικάλυψης του σκυροδέματος. Το αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης είναι η αποκόλληση του ελάσματος από το δομικό στοιχείο έχοντας συμπαρασύρει το ασθενέστερο σκυρόδεμα του υποβάθρου. Για να αποφευχθεί η αποκόλληση προτιμούμε το σκυρόδεμα της εξισωτικής στρώσης να είναι πολύ υψηλής αντοχής. Έτσι χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας σκυροδέματα ή ινοπλισμένα σκυροδέματα η EMACO . Ένας άλλος τρόπος να αποφευχθεί ο τύπος αυτός αποκόλλησης είναι η μείωση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της επιφάνειας επαφής, είτε μικραίνοντας το πάχος του ελάσματος είτε αυξάνοντας το πλάτος της στρώσης. Η διατμητική τάση δε κατανέμεται ισομερώς σε όλο το μήκος του ελάσματος και το μέγιστο παρουσιάζεται στα άκρα ειδικά αν υπάρχουν καμπτικά φορτία (γι αυτό άλλωστε είναι απαραίτητη η αγκύρωση των σύνθετων υλικών). Ελλείψει καμπτικών μεγεθών, η κατανομή των τάσεων είναι πιο ισομερής.

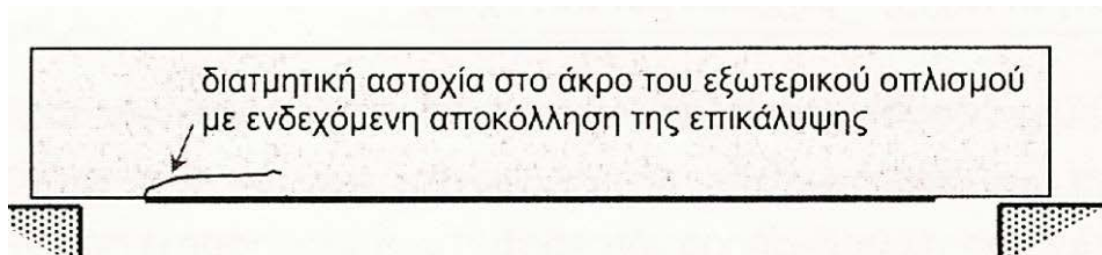
Τέλος, μια απλή, συντηρητική και αρκετά αξιόπιστη μέθοδος αντιμετώπισης περιλαμβάνει τη παρακάτω σειρά ελέγχων:

5.  $V_{sd, end} < 1.4V_{cd}$

6.  $M_{sd, end} < M_{Rd}$

όπου  $V_{sd, end}$  και  $M_{sd, end}$  είναι η δρώσα τέμνουσα και ροπή (τιμές σχεδιασμού) αντίστοιχα, στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά,  $V_{cd}$  η διατμητική αντοχή του μέλους, αγνοώντας τη συνεισφορά των οπλισμών διάτμησης και  $M_{Rd}$  η ροπή αντοχής του μέλους. Η ικανοποίηση της ανίσωσης 6 γίνεται εύκολα, ρυθμίζοντας τη θέση τερματισμού των σύνθετων υλικών. Αν όμως δεν ικανοποιείται η ανίσωση 5, τότε απαιτείται ενίσχυση του μέλους (κοντά στα άκρα των σύνθετων υλικών) έναντι τέμνουσας.

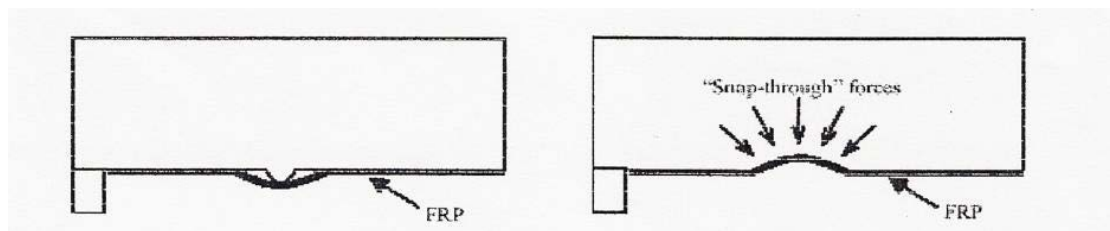
Η περίπτωση της αστοχίας του σκυροδέματος του υποβάθρου και αποκόλληση του ινοπλισμένου πολυμερούς φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 5.1.3.4:



Σχήμα 5.1.3.4 [36] .

### **5.1.3.5. Ατέλειες της επιπεδότητας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου**

Η επιφάνεια επικόλλησης των ελασμάτων του σύνθετου υλικού πρέπει να είναι αρκετά καλά επεξεργασμένη έτσι ώστε να μην υπάρχουν θέσεις αποκόλλησης έστω και σε μικρή κλίμακα που να οφείλονται στην ανώμαλη επιφάνεια επαφής. Ειδικά σε ότι αφορά τις τοιχοποιίες επιβάλλεται η δημιουργία εξισωτικής στρώσης από σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας και αντοχής. Στο παρακάτω σχήμα 5.1.3.5 φαίνονται κάποιες πιθανές ατέλειες που θα ήταν συνετό να αποφεύγονται. Και στις δύο περιπτώσεις, οι ατέλειες της επιφάνεια διάστρωσης οδηγούν σε περιορισμένης κλίμακας αποκολλήσεις.



Σχήμα 5.1.3.5

### **5.1.4 Οδηγίες για την αποφυγή πρόωρων αποκολλήσεων**

Για να είμαστε πιο ήσυχoi σχετικά με την πρόωρη αποκόλληση των ινοπλισμένων πολυμερών κατά την ενίσχυση ενός δομικού στοιχείου, θα ήταν συνετό να ακολουθηθούν οι παρακάτω οδηγίες:

- Θα πρέπει να αποφεύγεται η επικόλληση σε εσωτερικές γωνίες τοίχων με ένα συνεχές έλασμα. Κάθε επίπεδο θα έχει το δικό του έλασμα ενώ στην εσωτερική γωνία θα διακόπτεται η συνέχεια.
- Θα πρέπει να δίνεται μια καμπυλότητα στις εξωτερικές γωνίες όταν εφαρμόζουμε ένα κλειστό μανδύα από ινοπλισμένο υλικό. Στις γωνίες παρουσιάζεται συγκέντρωση τάσεων ενώ αν υπάρχει καμπύλη με ακτίνα καμπυλότητας λίγων εκατοστών διευκολύνεται η διαδρομή των τάσεων μέσα από τον κλειστό μανδύα.
- Σφραγίζονται όλες οι προϋπάρχουσες ρωγμές με ενέσεις κονιάματος η εποξειδικής ρητίνης στην περίπτωση που αποκαθιστούμε ένα ήδη ζημιωμένο/ρηγματωμένο δομικό στοιχείο.
- Το σκυρόδεμα υποβάθρου απαιτείται να είναι καλής ποιότητας και οπωσδήποτε θλιπτικής αντοχής άνω των 2000 psi.



## **5.2. Κόπωση**

Ως κόπωση ορίζεται “η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μόνιμων δομικών μεταβολών που συμβαίνουν στα υλικά που υποβάλλονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενων τάσεων και παραμορφώσεων σε ένα ή περισσότερα σημεία και που μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή πλήρη θραύση, μετά από ένα επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου”. Είναι προφανές ότι ο ορισμός αυτός ισχύει αυστηρά μόνο για την περίπτωση των μεταλλικών υλικών. Στον παραπάνω ορισμό η έννοια της βλάβης κόπωσης ταυτίζεται με την έννοια της ρωγμής και επομένως η συσσώρευση της βλάβης κόπωσης ταυτίζεται με την διάδοση της ρωγμής . Για τις ανάγκες του μηχανικού ,ο ορισμός αυτός είναι για την περίπτωση των μετάλλων επαρκής . Αντίθετα στα σύνθετα υλικά ο ορισμός δεν βρίσκει άμεσα ισχύ. Στα υλικά αυτά η έννοια της βλάβης κόπωσης είναι πολύ δύσκολο να ορισθεί λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμών αστοχίας.

Είναι γενικά παραδεκτό ότι στα ινώδη σύνθετα πολυμερή υλικά οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας είναι η δημιουργία και η διάδοση ρωγμών στο υλικό της μήτρας, η αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων, θραύση των ινών και η αποκόλληση μεταξύ μήτρας και ίνας . Η εμφάνιση των παραπάνω μηχανισμών καθώς και η συμβολή τους στην μακροσκοπική αστοχία του υλικού εξαρτάται από το υλικό ( τύπος μήτρας, και κυρίως τύπος ίνας ), από την περιεκτικότητα σε ίνες, από την αλληλουχία των στρώσεων, από το φορτίο κόπωσης , από τη διεύθυνση του φορτίου σε σχέση με τις ίνες ενίσχυσης .

Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή συμπεριφέρονται καλύτερα από το σκυρόδεμα ή τον χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα ανθρακονήματα είναι καλύτερα από τις ίνες αραμιδίου, που με τη σειρά τους είναι καλύτερες από τα υαλονήματα. Ειδικά για τα σύνθετα υλικά με ίνες από άνθρακα, η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού. Η αντίστοιχη κατάταξη ρητινών, με μειούμενη τιμή της αντοχής τους σε κόπωση, είναι εποξειδικές, πολυεστερικές και βινυλεστερικές. Πρέπει να τονιστεί ότι η αντοχή σε κόπωση ενός συστήματος ινοπλισμένου πολυμερούς, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της ρητίνης, στο οποίο εμποτίζονται οι ίνες.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή, εξαιτίας της οργανικής φύσης του υλικού της μήτρας, είναι ευαίσθητα στη συχνότητα εφαρμογής της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Ως γενικός κανόνας, η συχνότητα αυτή, πρέπει να διατηρείται μικρότερη από 10Hz, ώστε να προλαμβάνεται η έκλυση θερμότητας στο πολυμερές, που μπορεί να οδηγήσει σε πρώιμη αστοχία της μήτρας και στη συνέχεια ολόκληρου του συστήματος του πολυμερούς.

## **5.3. Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης**

Στα περισσότερα ινοπλισμένα πολυμερή παρατηρείται το φαινόμενο της διάβρωσης και θραύσης υπό μόνιμη τάση. Τα δύο φαινόμενα σχετίζονται με το χρόνο έκθεσης ,το επίπεδο της έντασης , τον περιβάλλοντα χώρο, τη μήτρα και τις ίνες του σύνθετου υλικού. Η αστοχία που οφείλεται στα φαινόμενα αυτά, κρίνεται πρώιμη, καθώς το ινοπλισμένο πολυμερές αστοχεί για επίπεδο έντασης σαφώς μικρότερο από την αντοχή του [18].

Έχει διαπιστωθεί ότι οι ίνες γυαλιού, υπό σταθερή τάση, αστοχούν ακόμη και όταν αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή περίπου στο 20% της εφελκυστικής αντοχής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θραύση υπό τάση (stress rupture). Για τον λόγο αυτό οι

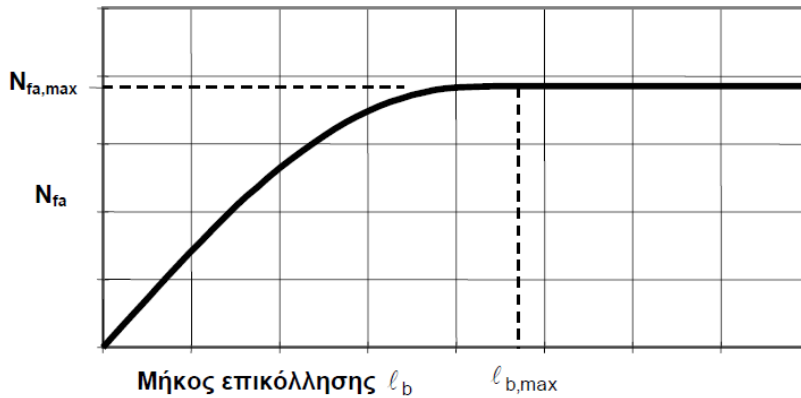
ίνες γυαλιού δεν χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ενισχύσεων για αλλαγή χρήσης. Σε ενισχύσεις έναντι σεισμού δεν υπάρχει πρόβλημα γιατί τα σύνθετα υλικά ενεργοποιούνται μόνο κατά την διάρκεια της σεισμικής καταπόνησης, εκτός εάν οι ίνες εφαρμοστούν με προένταση.

Το φαινόμενο της διάβρωσης υπό τάση (stress corrosion) αφορά στην μείωση της αντοχής των συνθέτων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (όξινου ή αλκαλικού) περιβάλλοντος. Απουσία τάσεων δεν θα είχαμε μείωση της αντοχής. Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα δεν έχουν πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση ακόμα και αν η τάση φτάσει στο 80% της εφελκυστικής αντοχής. Για τον λόγο αυτό, εάν η ενίσχυση έχει ως στόχο την ανάληψη πρόσθετων μόνιμων φορτίων, η χρήση ινών άνθρακα θα πρέπει να είναι η πρώτη επιλογή του κατασκευαστή. Οι ίνες γυαλιού, όπως προαναφέρθηκε, είναι εξαιρετικά ευπαθείς, ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν μία ενδιάμεση συμπεριφορά.

Η ποιότητα της μήτρας που χρησιμοποιείται έχει πολύ σημαντική επίδραση στο χρόνο που θα εκδηλωθεί η αστοχία και στο επίπεδο της έντασης, που μπορεί να φέρει το υλικό. Συνήθως συστήματα με εποξειδικές ρητίνες είναι δύο έως τέσσερις τάξεις μεγέθους πιο ανθεκτικά από αντίστοιχα συστήματα, που περιέχουν άλλη κατηγορία ρητίνης. Επίσης οι βινυλεστερικές ρητίνες εμφανίζουν κατά κανόνα μεγαλύτερη τρωτότητα σε θραύση και διάβρωση, λόγω διατηρούμενης έντασης, από τις πολυεστερικές [18].

## **6. Αγκυρώσεις**

Η αγκύρωση των ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή είναι απαραίτητη όπως είναι και στο συμβατικό χαλύβδινο οπλισμό. Η αποκόλληση των ελασμάτων από τη διεπιφάνεια αντιστοιχεί (με αρκετές διαφορές) στο φαινόμενο εξόλκευσης των ράβδων του χαλύβδινου οπλισμού. Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του δεσμού σύνθετων υλικών-σκυροδέματος είναι ότι η θραύση των σύνθετων υλικών σπανίως προηγείται της αποκόλλησης, σε αντίθεση με τις εσωτερικές ράβδους οπλισμού οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκές μήκος αγκύρωσης ώστε να εξασφαλίζεται η αστοχία τους "διαρροής τους" πριν την απώλεια συνάφειας. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση (η οποία γίνεται λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος κοντά στη στρώση της κόλλας δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή αυτής ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του σκυροδέματος), δηλαδή η μέγιστη δύναμη αγκύρωσης,  $N_{fa}$  αυξάνεται με το μήκος επικόλλησης  $l_b$  μέχρις ότου αυτό λάβει μία οριακή τιμή  $l_{b,max}$  πέρα από την οποία η δύναμη αποκόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με  $N_{fa,max}$ . Στο παρακάτω σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα που περιγράφει τη σχέση της δύναμης αποκόλλησης σύνθετων υλικών συναρτήσει του μήκους επικόλλησης.



**Σχήμα 6.1:** Σχέση δύναμης αποκόλλησης σύνθετων υλικών συναρτήσει του μήκους επικόλλησης.

Η σχέση δύναμης αποκόλλησης- μήκος επικόλλησης ενός ελάσματος ινοπλισμένου πολυμερούς δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις [41]:

1. Για τότε

$$N_{fa} = N_{fa,max} \square = c_1 * k_c * k_b * b_f * \sqrt{f_{ctm} * E_f * t_f}$$

2. Για τότε 
$$N_{fa} = N_{fa,max} \square * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)$$

3. 
$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f * t_f}{c_2 * f_{ctm}}}$$

4. 
$$k_b = \sqrt{\frac{1,125 * \left(2 - \frac{b_f}{b}\right)}{1 - \frac{b_f}{400}}}$$

Με  $b_i/b$  όχι μικρότερο από 0.33,  $k_c$  συντελεστής συμπίκνωσης του σκυροδέματος ίσος με για κανονική συμπίκνωση ή ίσος με 0.87 για πτωχή συμπίκνωση,  $b$  το πλάτος της διατομής στοιχείου σκυροδέματος στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα,  $c_1=0.64$  (ή 0.50 αν το ζητούμενο είναι η χαρακτηριστική τιμή της  $N$ ) και  $c_2=2$ . Σε όρους τάσεων, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αποκόλληση των σύνθετων υλικών επέρχεται όταν η εφελκυστική τάση σχεδιασμού σε αυτά γίνει ίση με:

5. Για τότε

$$\sigma_{fd} = \frac{0.5 * k_c * k_b}{\gamma_b} * \sqrt{\frac{f_{ctm} * E_f}{t_f}} \quad (\text{MPa})$$

6. Για τότε

$$\sigma_{fd} = \frac{0.5 * k_c * k_b}{\gamma_b} * \sqrt{\frac{f_{ctm} * E_f}{t_f}} * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)$$

(MPa)

## **6.1. Μηχανικές αγκυρώσεις**

Σε πολλές περιπτώσεις, η εφαρμογή του απαιτούμενου μήκους επικόλλησης είναι δύσκολη ή και αδύνατη αν δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος. Στην περίπτωση αυτή καταφεύγουμε στη λύση της εφαρμογής μηχανικών αγκυρώσεων που δεν απαιτούν ιδιαίτερο χώρο για την τοποθέτησή τους. Οι μηχανικές αγκυρώσεις πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικά με καλή μηχανική συμπεριφορά και υψηλή αντοχή που να παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά. Το συνηθέστερο χρησιμοποιούμενο υλικό για μηχανικές αγκυρώσεις είναι ο χάλυβας. Η βασικότερη μέθοδος μηχανικής αγκύρωσης είναι οι χαλύβδινες πλάκες αγκύρωσης. Αυτές τοποθετούνται στις ακραίες περιοχές του ελάσματος σε ζεύγη και στις δύο όψεις (π.χ ενός τοίχου), ενώ ένας αριθμός προεντεταμένων κοχλιών ασκεί θλιπτική πίεση εγκλωβίζοντας το έλασμα του ινοπλισμένου υλικού και αυξάνοντας την τριβή μεταξύ πλάκας και ελάσματος. Μια άλλη μέθοδος αγκύρωσης είναι με γωνιακά χαλύβδινα ελάσματα ενώ ως εναλλακτική των παραπάνω λύσεων παρουσιάζεται η λύση της δημιουργίας εγκοπών μέσα στο σώμα του τοίχου και με μηχανικά μέσα επιτυγχάνεται η σφήνωση και συνεπώς η αγκύρωση του ελάσματος.

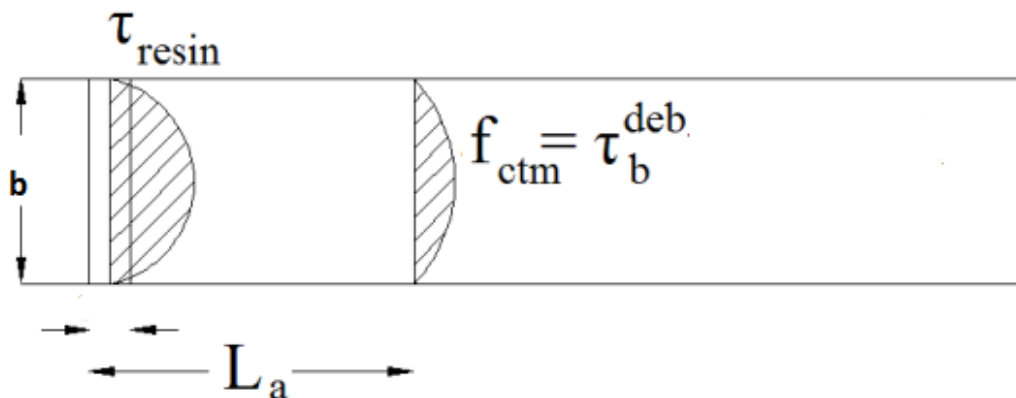
Οι βασικοί στόχοι της μηχανικής αγκύρωσης είναι οι εξής :

- Να συγκρατούν τα ελάσματα από τα άκρα τους έτσι ώστε να μην αποκολληθούν στην ευαίσθητη από πλευράς τάσεων αυτή περιοχή .
- Να συγκρατούν το έλασμα στη θέση του, αν αυτό τελικά αποκολληθεί, έτσι ώστε να μη πάψει να αναλαμβάνει φορτία .
- Να εμποδίζει τη συγκέντρωση διατμητικών τάσεων στη θέση συνάντησης περισσότερων του ενός ελάσματος με τα γεωμετρικά όρια του τοίχου (υπερκάλυψη των ελασμάτων) .

## 6.2. Υπολογισμός απαιτούμενης απόστασης αγκυρίων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αποκόλληση του σύνθετου υλικού στην επιφάνεια ενός ενισχυμένου μέλους δεν είναι επιθυμητή μορφή αστοχίας επειδή δε χρησιμοποιείται ολόκληρη η αντοχή του υλικού. Έτσι, το ενισχυμένο σύστημα δε προσφέρει στην κατασκευή την αντοχή και την ασφάλεια που έχει υπολογιστεί

Το παρακάτω μοντέλο προτείνεται χρησιμοποιώντας μέθοδο αγκύρωσης:



**Σχήμα 6.2.** : Κατανομή διατμητικών τάσεων που προκαλούν την αποκόλληση του σύνθετου υλικού.

Η συνολική δύναμη αγκύρωσης είναι η δύναμη που παραλαμβάνει η ρητίνη και η δύναμη που παραλαμβάνουν τα αγκύρια. Το εμβαδόν της καμπύλης που εμφανίζεται διαγραμματισμένο και αντιστοιχεί στην κατανομή των διατμητικών τάσεων έχει μέγιστη τιμή τη διατμητική αντοχή της ρητίνης για τη πρώτη γραμμοσκιασμένη περιοχή και τη τάση αποκόλλησης όσο αφορά τη δεύτερη περιοχή του παραπάνω σχήματος, υπολογίζεται προσεγγιστικά με ορθογωνική κατανομή διατμητικών τάσεων με μειωμένη τη μέγιστη τιμή και ίση με τα 2/3 της μέγιστης . Έτσι η εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων, εξισώνοντας το άθροισμα δυνάμεων της ρητίνης και των αγκυρίων, με τη μέγιστη δύναμη που παραλαμβάνει το σύνθετο υλικό, είναι:

$$2 * \left( \frac{2}{3} \sqrt{2} * \tau_{resin} * b * b_{fabric} \right) + \frac{2}{3} \tau_{debond} * b * L_a = t_f * b_f * 3500$$

Όπου το πρώτο μέρος του πρώτου μέλους αντιστοιχεί στη δύναμη που παραλαμβάνει η ρητίνη, το δεύτερο μέρος αντιστοιχεί στη δύναμη που παραλαμβάνουν τα αγκύρια, ενώ στο δεύτερο μέλος είναι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει το υλικό ενίσχυσης και:

b : το πλάτος του ενισχυόμενου μέλους

b<sub>f</sub>: το πλάτος του υλικού ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε για να τυλιχθούν οι ράβδοι σύνθετων υλικών για αγκύρωση στις οπές

t<sub>f</sub>: το πάχος του υλικού ενίσχυσης

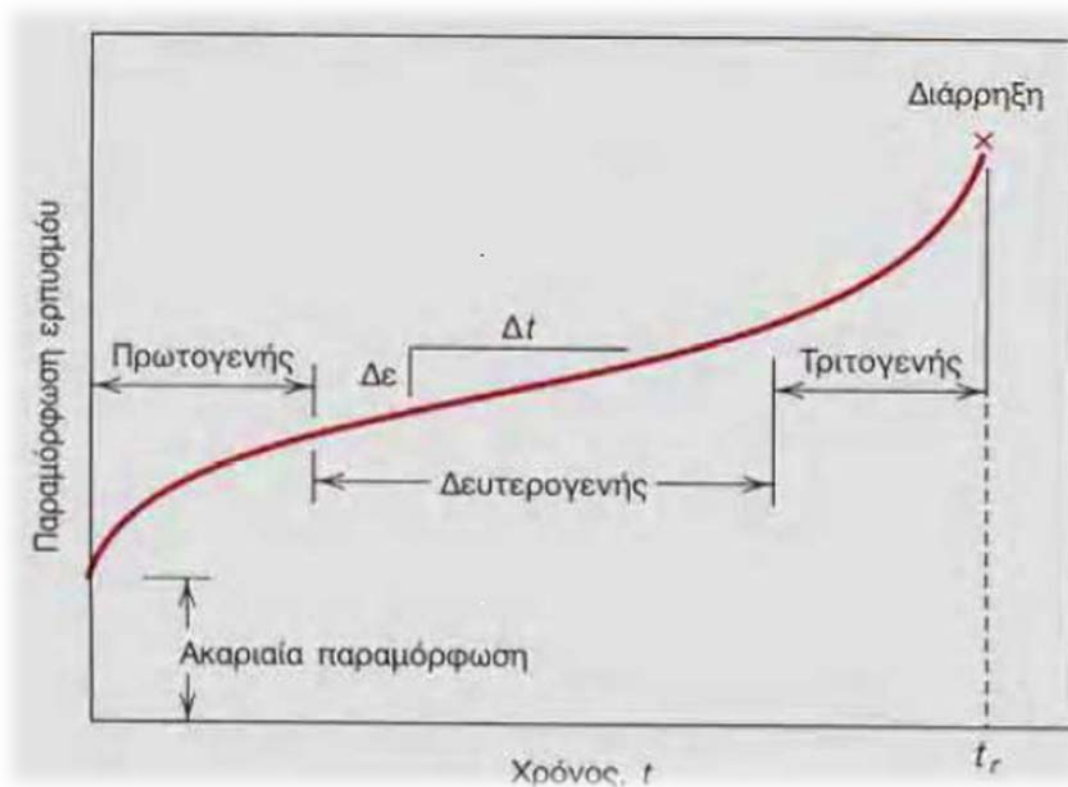
L<sub>a</sub>: η απόσταση μεταξύ των αγκυρίων

## 7. Μηχανική συμπεριφορά και Δυναμική καταπόνηση των σύνθετων υλικών

### 7.1. Ερπυσμός

Ως ερπυσμός ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Το φαινόμενο εκδηλώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις για παρατεταμένο χρόνο. Στον ερπυσμό η παραμόρφωση δίνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο επιβολής της τάσης και τη θερμοκρασία,  $\epsilon=f(t,\sigma T)$ .

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται γενικά η διαδικασία του ερπυσμού συναρτήσει του χρόνου και της παραμόρφωσης του ερπυσμού. Αρχικά με την επιβολή του φορτίου παρατηρούμε την παραμόρφωση και είναι ελαστική. Η διαδικασία του ερπυσμού συμβαίνει σε τρία στάδια:



Σχήμα 7.1: Καμπύλη ερπυσμού

- Πρωτογενής ή μεταβατικός ερπυσμός :  
Παρατηρείται συνεχής μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης του υλικού (ταχύτητα ερπυσμού) με το χρόνο.
- Δευτερογενής ερπυσμός :  
Αντιστοιχεί στο δεύτερο στάδιο παραμόρφωσης ερπυσμού και ονομάζεται δευτερεύων ή σταθερής κατάστασης ερπυσμός (secondary or steady state

creep). Το στάδιο αυτό έχει τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια κατά την εξέλιξη του φαινομένου, ενώ η ταχύτητα ερπυσμού ε παραμένει σταθερή. Η σταθερότητα της ε αποδίδεται στην ισορροπία μεταξύ των δύο ανταγωνιστικών διεργασιών οι οποίες αναπτύσσονται στο υλικό: της σκλήρυνσης πλαστικής παραμόρφωσης και της αποκατάστασης της δομής λόγω ανόπτωσης.

- Τριτογενής ερπυσμός :  
Στο τελευταίο αυτό στάδιο η ταχύτητα ερπυσμού αυξάνεται απότομα και τελικά επέρχεται η αστοχία του υλικού, η οποία συνήθως ονομάζεται θραύση. Αύξηση της ταχύτητας ερπυσμού αποδίδεται σε απότομη μείωση της ενεργούς διατομής του υλικού με αποτέλεσμα η πραγματική τάση η οποία εφαρμόζεται τυπικά στο υλικό να αυξάνεται σημαντικά. Η θραύση του υλικού συχνά λέγεται ρήξη ή κατάρρευση.

Μεταξύ όλων των συστατικών ινοπλισμένων πολυμερών, μόνο τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα δεν υπόκεινται σε ερπυσμό. Τόσο οι ίνες αραμιδίου όσο και οι μήτρες των ρητινών, άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο, παρουσιάζουν ερπυσμό. Ο βαθμός ερπυσμού είναι συνάρτηση του υλικού της ίνας και του προσανατολισμού των ινών, σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση. Εάν πρόκειται για ίνες γυαλιού ή άνθρακα, οι οποίες δε στρεβλώνονται, αλλά παραμένουν αμετακίνητες στα άκρα τους, δεν παρατηρείται ερπυσμός και το σύνθετο υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν πλήρως ελαστικά. Οι ίνες μπορεί να γίνονται ευθείες όταν υπόκεινται σε φόρτιση, το ινοπλισμένο πολυμερές ενδέχεται να ολισθαίνει στις θέσεις που αγκυρώνεται, ενώ υπάρχει πιθανότητα επιπλέον έντασης των ινών, λόγω χαλάρωσης της μήτρας του πολυμερούς, ακόμα και μετά την απομάκρυνση της εξωτερικής φόρτισης. Τα παραπάνω φαινόμενα δεν αποτελούν πραγματικό ερπυσμό και έχουν ασήμαντες επιδράσεις στις διαστάσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς. Στην περίπτωση που ο άξονας των ινών βρίσκεται εκτός του επιπέδου της φόρτισης ή οι ίνες είναι από αραμιδίο, η παραμόρφωση, λόγω ερπυσμού, του σύνθετου υλικού ενδέχεται να είναι σημαντική.

## **7.2. Μαθηματικά προσομοιώματα**

Όπως προαναφέρθηκε , τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού καθορίζονται από τα αντίστοιχα των συστατικών του. Από τη σκοπιά της μικρομηχανικής, προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι γνωστό το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν.

Ο Νόμος της Σύνθεσης (Rule of Mixtures) χρησιμοποιεί τα ποσοστά συμμετοχής ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ο νόμος της σύνθεσης περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις [18]:

$$V_f + V_m + V_u = 1 \quad (1)$$

$$W_f + W_m = 1 \quad (2)$$

$$\rho_c = \rho_f * V_f + \rho_m * V_m \quad (3)$$

Όπου :

$V_f$  : ο λόγος του όγκου των ινών

$V_m$  : ο λόγος του όγκου της μήτρας

$V_u$  : ο λόγος του όγκου των κενών

με  $V_i = V_i / V_c$

όπου :

$V_c$  : ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού

$V_i$  ( $i = f, m, u$ ) : ο όγκος των ινών , της μήτρας και των κενών

$W_f$  : ο λόγος του βάρους των ινών

$W_m$  : ο λόγος του βάρους της μήτρας

με  $W_i = W_i / W_c$

όπου :

$W_c$  : το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού

$W_i$  ( $i = f, m, u$ ) : το βάρος του αντίστοιχου συστατικού στοιχείου

$\rho_f$  : η πυκνότητα των ινών

$\rho_m$  : η πυκνότητα της μήτρας

$\rho_c$  : η συνολική πυκνότητα του σύνθετου υλικού

Το μέτρο ελαστικότητας και η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών μπορούν να εκτιμηθούν από το άθροισμα των γινομένων της αντίστοιχης ιδιότητας για τις ίνες επί το αντίστοιχο ποσοστό αυτών και της αντίστοιχης ιδιότητας για τη μήτρα επί το αντίστοιχο ποσοστό αυτής. Αν  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού ,  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας των ινών και  $E_m$  το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας τότε η ακόλουθη σχέση παρέχει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού συναρτήσει των  $E_f$  και  $E_m$  [18].

$$E = E_f * V_f + E_m * V_m \quad (4)$$



Η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του συνδετικού υλικού .

Εάν  $S$  : η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού

$S_f$  : η εφελκυστική αντοχή ίνας

$S_{mf}$  : η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την αστοχία της ίνας

τότε :

$$S = S_f * V_f + S_{mf} * (1 - V_f) \quad (5)$$

### Εφαρμογή.

Προκειμένου να κατανοήσουμε την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων, θεωρούμε δοκίμιο γραφίτη – εποξικής ρητίνης διαστάσεων 2.54 cm x 2.54 cm x 0.30 cm, που ζυγίζει 2.980 gr. Οι πυκνότητες του γραφίτη και της ρητίνης είναι  $\rho_f = 1.9 \text{ gr/cm}^3$  και  $\rho_m = 1.2 \text{ gr/cm}^3$ , αντίστοιχα.

Διαλύοντας τη ρητίνη με οξύ, οι ίνες που απομένουν ζυγίζουν 1.863 gr.

Ζητείται να προσδιοριστούν οι λόγοι όγκου ινών  $V_f$ , ρητίνης  $V_m$  και κενών  $V_u$ .

Η πυκνότητα του σύνθετου υλικού είναι

$$\rho_c = W_c / V_c = 2.98 / (2.54 * 2.54 * 0.3) = 1.54 \text{ gr/cm}^3$$

Επίσης, σύμφωνα με τις σχέσεις (1) και (2) ο λόγος όγκου κενών  $V_u$  είναι

$$\begin{aligned} V_u &= 1 - (V_f + V_m) = 1 - [W_f / \rho_f + (W_c - W_f) / \rho_m] / V_c = \\ &= 1 - [1.863/1.9 + (2.98 - 1.863) / 1.2] / (2.54 * 2.54 * 0.3) = \\ &= 0.012 = 1.2\% \end{aligned}$$

Επομένως,  $V_f + V_m = 0.988$  οπότε η σχέση (3) γράφεται

$$\begin{aligned} \rho_c &= \rho_f * V_f + \rho_m * V_m \rightarrow \\ \rightarrow 1.54 &= 1.9 * V_f + 1.2 * (0.988 - V_f) \\ \rightarrow V_f &= 50.6\% \end{aligned}$$

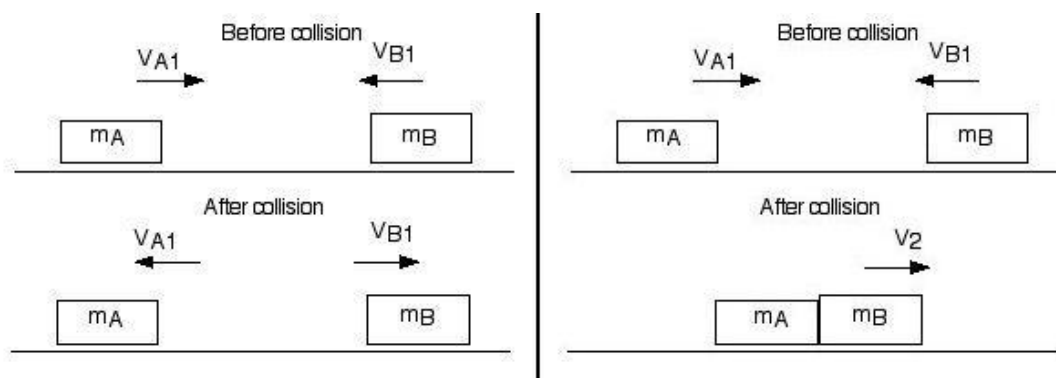
Συνοψίζοντας λοιπόν έχουμε :

$$V_f = 50.6\% , V_m = 48.2\% , V_u = 1$$

### 7.3. Κρούση

Ο όρος κρούση, συχνά συγχέεται από έναν καθημερινό άνθρωπο με τον όρο σύγκρουση και συνήθως το πρώτο πράγμα που πιθανότατα να του έρχεται στο μυαλό, είναι κάποιο αυτοκινητιστικό ατύχημα. Ο όρος κρούση περιγράφει μια τέτοια κατάσταση, αλλά είναι ευρύτερος και περιγράφει και άλλα γεγονότα όπως είναι η σύγκρουση των σφαιρών του μπιλιάρδου, η σύγκρουση των νετρονίων μέσα σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, η σφαίρα του μπόουλιγκ που συγκρούεται με τις κορύνες, όπως βέβαια και ακόμα άλλες περιπτώσεις.

Η κρούση είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αναφέρεται στη στιγμιαία επαφή δύο σωμάτων. Με τον όρο κρούση περιγράφουμε την άσκηση δυνάμεων μεταξύ των δύο προαναφερθέντων σωμάτων, για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αν κατά τη διάρκεια της κρούσης, οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα δύο σώματα είναι συντηρητικές, η ολική κινητική ενέργεια του συστήματος είναι η ίδια πριν και μετά την κρούση. Μια τέτοια κρούση ονομάζεται “ελαστική κρούση”. Σε μια τέτοια κρούση, τα σώματα που συγκρούονται, αλληλεπιδρούν στιγμιαία και αφού αλληλεπιδράσουν, απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Στη περίπτωση που η ολική κινητική ενέργεια μετά την κρούση είναι μικρότερη από ότι πριν, η κρούση ονομάζεται “μη ελαστική κρούση”. Σε ένα τέτοιο είδος μη ελαστικής κρούσης, όταν τα συγκρουόμενα σώματα συσσωματώνονται και κινούνται ως ένα σώμα μετά την κρούση, αυτή ονομάζεται “πλαστική” ή “πλήρως ανελαστική κρούση”. Στην εικόνα 7.3 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των παραπάνω αναφερθέντων κρούσεων.



**Εικόνα 7.3.** : Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής κρούσης ( αριστερά ) & της πλήρως ανελαστικής κρούσης ( δεξιά ).

Οι δοκιμές κρούσης στα υλικά είναι πολύ σημαντικές, μιας και έχουν σα σκοπό να διερευνήσουν τη φύση και την επίδραση στη συμπεριφοράς των υλικών, καταστάσεων ακαριαίας φόρτισης, αλλά και το μηχανισμό απορρόφησης της προσφερόμενης ενέργειας από το υλικό και πως αυτή επηρεάζει εν γένει την κατάστασή του και τη συμπεριφορά του, μετά το πέρας της κρούσης. Οι δοκιμές κρούσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι οι κρούσεις χαμηλής ενέργειας (low-velocity ή low energy) και οι κρούσεις υψηλής ενέργειας (high-velocity ή high energy). Οι χαμηλής ενέργεια κρουστικές καταπονήσεις δεν προκαλούν στα υλικά και ειδικά στα σύνθετα, κάποια βλάβη εμφανή διά γυμνού οφθαλμού, αλλά είναι δυνατόν να προκαλέσουν δραστική υποβάθμιση των

μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού και ουσιαστικά να οδηγήσουν στην πρόωρη και αναπάντεχη αστοχία του.

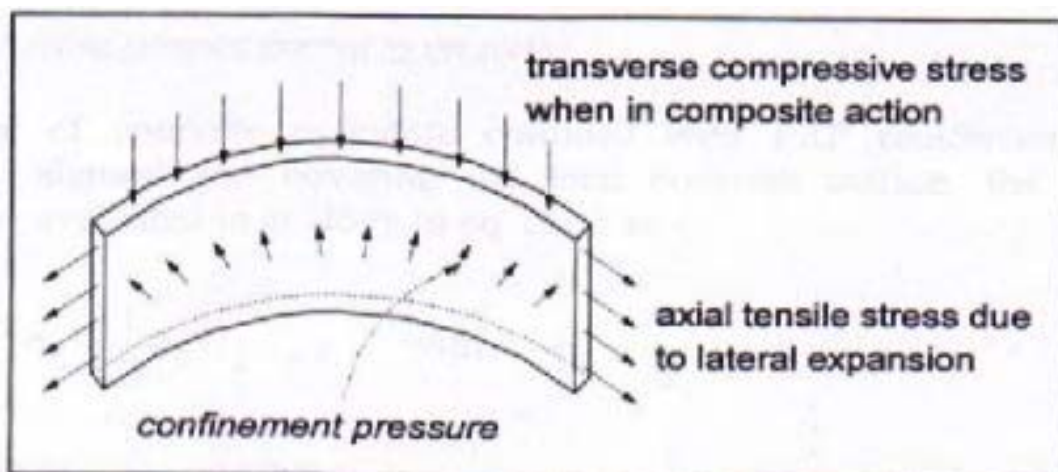
## **8. Ενίσχυση φέροντος οργανισμού**

### **8.1. Περίσφιξη υποστρωμάτων**

Ένας πολύ συχνός και εξαιρετικά αποτελεσματικός τρόπος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι η περίσφιξη σκυροδέματος. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σημαντικής καταπόνησης υποστρωμάτων η περίσφιξη τους εμποδίζει την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος ( βαρελοποίηση ), μέσω ενεργοποίησης του μανδύα. Οι ίνες του, παραλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις εκμεταλλευόμενες έτσι την εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική τους αντοχή [36].

Οι τάσεις περίσφιξης που επιβάλλονται στο μέλος έχουν ως αποτέλεσμα :

- i) Την αύξηση της θλιπτικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος.
- ii) Την αύξηση της πλαστιμότητας του μέλους.
- iii) Την βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές μάτισης.
- iv) Την καθυστέρηση εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων.

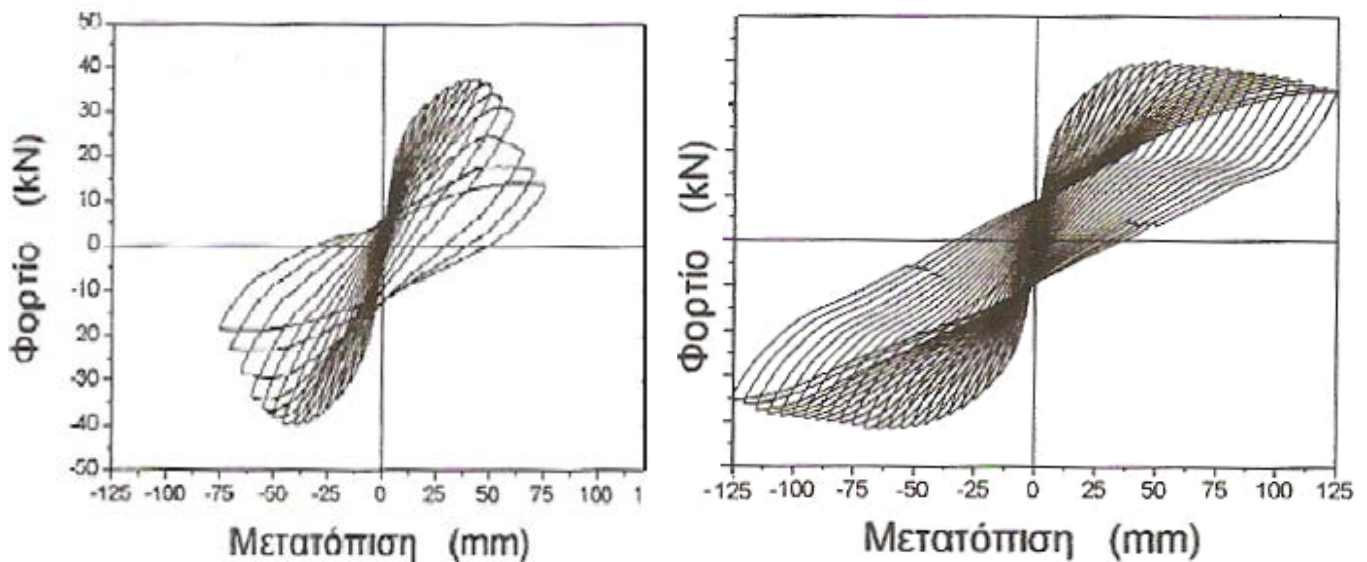


**Εικόνα 8.1.:** Τριαξονική κατάσταση τάσης σε μανδύα FRP .

## 8.2. Αύξηση πλαστιμότητας υποστυλωμάτων

Μια σημαντική εφαρμογή των μανδύων σύνθετων υλικών είναι σε περιπτώσεις που υπάρχει απαίτηση αύξησης της πλαστιμότητας του μέλους. Οι μανδύες περισφίγγουν τις κρίσιμες διατομές υποστυλωμάτων (κορυφή και βάση) τα οποία παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σεισμικές καταπονήσεις (π.χ. παλαιές κατασκευές με αραιούς συνδετήρες στα υποστυλώματα).

Όπως έχει διαπιστωθεί από πειραματικές διαδικασίες, η απόκριση των ενισχυμένων υποστυλωμάτων βελτιώνεται σημαντικά λόγω της περίσφιξης στις κρίσιμες διατομές. Η αστοχία των μελών προέρχεται από καμπτική διαρροή στην κρίσιμη διατομή στο ίδιο περίπου φορτίο, ωστόσο ο επακόλουθος λυγισμός των διαμήκων ράβδων είναι ελεγχόμενος λόγω της περίσφιξης. Έτσι, καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη μεγάλης οριζόντιας μετατόπισης, η οποία συνοδεύεται από μικρή πτώση του φορτίου για ενίσχυση με FRP.



**Διαγράμματα 8.2.** : διαγράμματα δύναμης- μετατόπισης: i) δοκίμιο χωρίς ενίσχυση, ii) δοκίμιο ενισχυμένο με FRP [37].

## 8.3. Ενίσχυση έναντι κάμψης

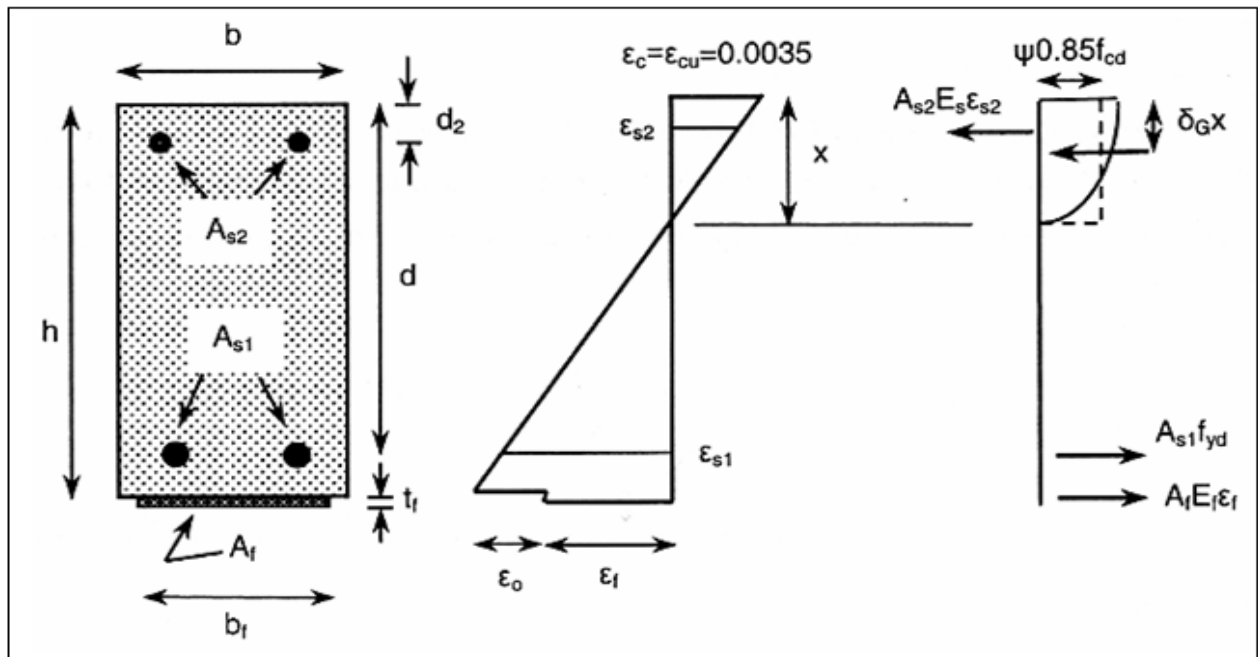
Η εφαρμογή σύνθετων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις. Η εφαρμογή σε υποστυλώματα όμως με τον προαναφερθέν τρόπο είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Στη περίπτωση που θα χρησιμοποιήσουμε ράβδους FRP θα πρέπει να επικαλυφθεί με σκυρόδεμα ώστε να υπάρξει συνεργασία με το στοιχείο προς ενίσχυση. Στην ουσία δηλαδή θα δημιουργηθεί ένας οπλισμένος μανδύας με FRP αντί για χάλυβα. Πάνω στο συγκεκριμένο θέμα έχουν γίνει αρκετές έρευνες (π.χ. Håkan Nordin, Calvin D. Austin) για τα πλεονεκτήματα των ράβδων FRP, καθώς και για προντεταμένους ράβδους, οι οποίες δείχνουν ότι σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά όταν έχουμε πρόβλημα διάβρωσης (π.χ. σε υποστυλώματα γεφυρών) συμφέρει η χρησιμοποίηση

των ράβδων FRP. Όμως επειδή το κόστος τους είναι πολύ αυξημένο, λόγω της μικρής ζήτησης τους καθιστά οικονομικά ασύμφορη τη χρησιμοποίησή τους έναντι του χάλυβα.

Ο μηχανισμός αστοχίας σε κάμψη (υπό την προϋπόθεση επαρκούς αγκύρωσης) θα είναι :

1. Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος .
2. Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών
3. σύνθλιψη σκυροδέματος .

Ο πιο επιθυμητός τρόπος αστοχίας είναι ο πρώτος σύμφωνα με τον οποίο έχουμε πρώτα διαρροή του διαμήκουσ οπλισμού σε εφελκυσμό και ακολούθως σύνθλιψη του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος (στην βάση του δηλαδή) για αυτό το μηχανισμό αστοχίας γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του ασυμβίβαστου των παραμορφώσεων :



Σχήμα 8.3.1.: διάγραμμα εσωτερικών δυνάμεων [38].

Υπολογισμός θλιβόμενης ζώνης:

$$0.85\psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f + N_{sd}$$

Όπου  $\psi=0.8$  ,  $f_{cd}$  = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος(τιμή σχεδιασμού) ,  $x$ =ύψος θλιβόμενης ζώνης ,  $f_{yd}$  = τάση διαρροής χάλυβα (τιμή σχεδιασμού) και  $A_f$  = εμβαδό διατομής σύνθετων υλικών ,  $\varepsilon_{s2}$  και  $\varepsilon_f$  είναι οι παραμορφώσεις του θλιβόμενου χάλυβα και των σύνθετων υλικών αντίστοιχα, όπου :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \frac{(x - d_2)}{x} \quad , \quad \varepsilon_f = \varepsilon_c \left[ \frac{(h - x)}{x} \right] - \varepsilon_0$$

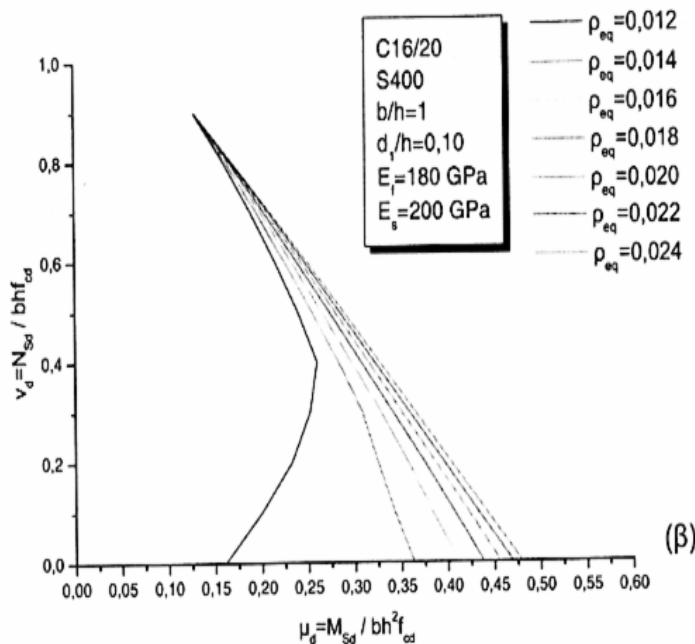
όπου  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ , με  $\epsilon_{cu}$  = είναι η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος ( $= 0.0035$ ) και  $\epsilon_0$  η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα. Ακόμα πρέπει  $E_c \epsilon_{c2} > f_{yd}$

Υπολογισμός ροπής αντοχής :

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G \chi) + A_{sf} E_s \epsilon_{sf} (h - \delta_G \chi) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (\delta_G \chi - d_2) + N_{sd} [(h/2) - \delta_G \chi] ,$$

όπου  $\delta_G = 0.4$

Ο δεύτερος τρόπος αστοχίας είναι και ο πιο σπάνιος και ενδέχεται να εμφανιστεί μόνο αν το εμβαδό της διατομής των σύνθετων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό. Σύμφωνα με τον τρίτο μηχανισμό, η θραύση σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας και αντιστοιχεί σε ψαθυρή συνπεριφορά. Αυτός ο τρόπος δεν είναι αποδεκτός.



**Σχήμα 8.3.2 :**

Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τετραγωνικής διατομής για μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη. Π.χ C16/20 S400  $d_1/h=0.1$   $E_f=180\text{GPa}$  και  $A_{stot} = 1.2\%$  [38].

Από το παραπάνω διάγραμμα αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών στην αύξηση της ροπής αντοχής εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του αξονικού φορτίου, και πάντως μειώνεται όσο αυτό αυξάνεται. Επίσης φαίνεται ότι οι καμπύλες αλληλεπίδρασης συγκλίνουν προς σημείο πάνω από το οποίο ολόκληρη η διατομή βρίσκεται σε θλίψη, και επομένως η δράση των σύνθετων υλικών μπορεί (προσεγγιστικά) να αγνοηθεί (οπότε όλες οι καμπύλες ταυτίζονται). Οπότε σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή των σύνθετων υλικών για την αύξηση της καμπτικής αντοχής υποστυλωμάτων δεν είναι πάντοτε πρακτικά (κατασκευαστικά) εφικτή, ενώ είναι γενικά περιορισμένης αποτελεσματικότητας, εκτός αν η αξονική δύναμη διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (π.χ  $v_d < 0.2$ ).

## 8.4. Ενίσχυση έναντι διάτμησης

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων ή σπανιότερα ελασμάτων, τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κύριων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα στις ρωγμές. Τούτο βέβαια δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό, όπως στην περίπτωση της χρήσης συνδετήρων, οι ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών μελών.

Υπάρχουν τρεις τρόποι αστοχίας λόγω τέμνουσας:

1. Θραύση των σύνθετων υλικών : Αναμένεται να συμβεί κατά κανόνα σε επαρκώς αγκυρωμένους μανδύες. Στην περίπτωση αυτή  $\epsilon_{fd,max} = f_{fde} / E_f$  όπου  $f_{fde}$  είναι η (μειωμένη ως προς των εφελκυστική αντοχή, λόγω συγκεντρώσεων τάσεων στις γωνίες του μέλους) αντοχή σχεδιασμού που προκύπτει από τη σχέση :  $f_{fde} = \eta_e f_{fd}$ . Λόγο έλλειψη περισσότερων στοιχείων θεωρούμε  $\eta_e = 0.8$ . Οπότε μετά από πράξεις  $t_f = V_{fd} / 2 (0.9d) (1 - 0.5d_f / 0.9d) 0.8 f_{fd}$
2. Αποκόλληση των σύνθετων υλικών : Μεγαλύτερη πιθανότητα για να συμβεί τέτοιου είδους αστοχία είναι οι μη επαρκώς αγκυρωμένοι μανδύες, όπως είναι οι τρίπλευροι και δίπλευροι, οπότε και η πιθανότητα αστοχίας από θραύση είναι σχετικά μικρή. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι σχετικά απίθανος για τα υποστυλώματα μιας και είναι επαρκώς αγκυρωμένος ο μανδύας αφού θα είναι κλειστού τύπου.
3. Πρώρη αστοχία λόγω μεγάλου ανοίγματος της λοξής ρωγμής : Η ανάπτυξη μεγάλου ανοίγματος ρωγμής ενδέχεται να μειώσει σημαντικά τη συνεισφορά των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας (λόγω σημαντικής μείωσης της αλληλεμπλοκής των αδρανών και/ή της θλιβόμενης ζώνης), με αποτέλεσμα να βρεθεί στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας πριν αστοχήσουν (λόγω θραύσης ή αποκόλλησης) τα σύνθετα υλικά.

Συμπερασματικά βλέπουμε ότι μόνος πιθανός μηχανισμός αστοχίας είναι ο πρώτος και το απαιτούμενο πάχος μανδύα είναι:

$$t_f = V_{fd} / 2 (0.9d) (1 - 0.5d_f / 0.9d) 0.8 f_{fd}$$

Βέβαια η αύξηση των στρώσεων δεν έχει νόημα να αυξάνεται επ' άοριστον καθώς μας περιορίζει το γεγονός ότι για μια συγκεκριμένη διατομή θα υπάρχει αστοχία λόγω λοξής θλίψης,  $V_{Rd2}$ . Άρα :

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2})$$

Η τέμνουσα δύναμη που λαμβάνεται από μανδύα FRP δίνεται σε αναλογία με τους συνδετήρες από τη σχέση:

$$V_{fd} = 2t_f d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2 \alpha$$

$d_f$  = ύψος του μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού και ίσος με 0.9d αν μανδύας καλύπτει πλήρως τις πλευρές.

Συνήθως οι ίνες εφαρμόζονται κάθετα στον άξονα του υποστυλώματος. Άρα  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\theta$  = γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους. Μπορεί να θεωρηθεί ίση με  $45^\circ$ .

Άρα με τις παραδοχές αυτές καταλήγουμε στη σχέση

$$V_{fd} = 2 t_f (0.9d) \varepsilon_{fe,d} E_f \quad \text{Άρα } t_f = V_{fd} / 2 (0.9d) \varepsilon_{fe,d} E_f$$

$\varepsilon_{fe,d}$  = μέση τιμή κατά μήκος της ρωγμής, της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας (“ενεργή” παραμόρφωση)

$$\varepsilon_{fe,d} = (1 - 0.5d / 0.9d) \varepsilon_{fd,max}$$

Όπου μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού σύνθετων υλικών. Εξαρτάται από το μηχανισμό αστοχίας. Οι μόνες διαφορές που της  $V_{fd}$  με τη συνεισφορά  $V_{wd}$  του συμβατικού οπλισμού διάτμησης είναι :  $\varepsilon_{fe,d} E_f$  αντι για  $f_{ywd}$  και  $2 t_f \sin \alpha$  αντι  $A_{sw}$  [39].

## **8.5. Ενίσχυση δοκού ή πλάκας με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών**

Οι τεχνικές ενίσχυσης των δοκών διακρίνονται ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο, σε αυτές που στοχεύουν είτε στην αύξηση της καμπτικής αντοχής, είτε στην αύξηση της διατμητικής αντοχής, είτε και στα δύο. Οι τεχνικές ενίσχυσης των πλακών στοχεύουν κυρίως στην αύξηση της καμπτικής αντοχής. Η απαίτηση αύξησης της καμπτικής αντοχής δοκού ή πλάκας αλλά και διατμητικής αντοχής δοκού οπλισμένου σκυροδέματος, μπορεί να παρουσιαστεί στις εξής περιπτώσεις :

- Αύξηση των φορτίων ή αλλαγή χρήσης του χώρου.
- Ανάγκη προσαρμογής παλαιών κατασκευών σε νέους κανονισμούς.
- Γήρανση των δομικών υλικών, διάβρωση του οπλισμού, ελλιπή συντήρηση ή και κατασκευαστικών ελαττωμάτων.
- Ανάγκη αποκατάστασης μετά από σεισμό.

## **8.6. Ενίσχυση δοκού ή πλάκας σε κάμψη**

Η ενίσχυση σε κάμψη στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (δοκοί ή πλάκες), επιτυγχάνεται με την εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω της κάμψης, δηλαδή παράλληλα στον άξονα του μέλους. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για τη χρήση αυτή βιομηχανικά ελάσματα, καθώς επίσης και υφάσματα από νήματα μίας διεύθυνσεως, τα οποία τοποθετούνται με τις ίνες τους κατά τη διεύθυνση του οπλισμού του στοιχείου.



Εικόνα 8.6.: Ενίσχυση δοκού σε κάμψη [42].



Με την εν λόγω ενίσχυση επιτυγχάνεται :

- Αύξηση της καμπτικής αντοχής.
- Αύξηση της καμπτικής ακαμψίας (μείωση των παραμορφώσεων).
- Μείωση της αναμενόμενης ρηγμάτωσης.
- Βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση.

Σε σχέση με τις συμβατικές επεμβάσεις ενίσχυσης, όπως είναι η επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων, τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα :

- Αντέχουν στην κόπωση, της υγρασία και τη διάβρωση.
- Έχουν μικρό πάχος και καλύπτονται / βάζονται πολύ εύκολα.
- Έχουν μικρό βάρος, διατίθενται σε ρολά και κόβονται επί τόπου στο επιθυμητό μήκος. Γενικά η εφαρμογή τους είναι εύκολη, γρήγορη και οικονομική.

### **8.6.1. Μηχανισμοί αστοχίας της ενισχυόμενης δοκού ή πλάκας (κάμψη)**

Ανάλογα με το ποσοστό εξωτερικού οπλισμού, η δοκός ή πλάκα μπορεί να αστοχήσει σύμφωνα με αρκετούς διαφορετικούς μηχανισμούς. Αν τα ποσοστά υπάρχοντος και εξωτερικού οπλισμού είναι σχετικά μικρά, η αστοχία οφείλεται σε θραύση του σύνθετου πολυμερούς, της οποίας έχει ήδη προηγηθεί διαρροή του χάλυβα. Αν το ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού είναι σχετικά υψηλό, η αστοχία οφείλεται σε θραύση του σκυροδέματος ενώ ο χάλυβας μπορεί να διαρρεύσει ή όχι, ανάλογα με το ποσοστό του. Στους προαναφερθέντες μηχανισμούς αστοχίας προστίθενται και οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την απώλεια συνάφειας.

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις :

- i. Διάδοση οριζοντίων ρωγμών στη διεπιφάνεια μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού.  
Μπορεί να οφείλονται :
  - σε ενδεχόμενες ατέλειες στην εφαρμογή της εποξειδικής ρητίνης
  - στην ενδεχόμενη ανάπτυξη κατακόρυφων ρωγμών λόγω κάμψης
  - σε τοπική αποκόλληση του σύνθετου υλικού όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος δεν είναι τελείως επίπεδη
  - σε καταπόνηση του μέλους σε κόπωση

Υπεύθυνες για τη διάδοση τέτοιου είδους ρωγμών είναι κυρίως οι διατμητικές τάσεις στη στρώση της εποξειδικής ρητίνης.

- ii. Αποκόλληση του σύνθετου υλικού λόγω του κατακόρυφου και οριζόντιου ανοίγματος ενδεχομένων λοξών (διατμητικών) ρωγμών.
- iii. Διατμητική αστοχία της στρώσης του σκυροδέματος μεταξύ του οπλισμού ενίσχυσης και του υπάρχοντος διαμήκους οπλισμού, κοντά στα άκρα του σύνθετου υλικού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για σχετικά υψηλά ποσοστά οπλισμού ενίσχυσης οι αποκολλήσεις των σύνθετων υλικών συνήθως προηγούνται των κλασικών μηχανισμών. Για το λόγο αυτό θεωρείται αναγκαία η αγκύρωση των σύνθετων υλικών με μηχανικούς τρόπους, όπως η εξωτερική περίσφιξη των άκρων των υλικών μέσω κατακόρυφου εξωτερικού οπλισμού. Τέτοιου είδους αγκυρώσεις είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές και αποτρέπουν αστοχίες που οφείλονται σε απώλεια συνάφειας. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής ενίσχυσης είναι ιδιαίτερα μεγάλη για μέλη με σχετικά μικρά ποσοστά υπάρχοντος οπλισμού. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται υλικά με ίνες γυαλιού ή αραμιδίου αποκλείεται το ενδεχόμενο εμφάνισης μηχανισμού αστοχίας λόγω θραύσης των υλικών αυτών (λόγω της μεγάλης μήκυνσης θραύσης που τα χαρακτηρίζει) . Χαρακτηριστικό είναι ότι για την περίπτωση ενίσχυσης με υλικά από ίνες άνθρακα, η πλαστιμότητα αυξάνει με το ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης, πράγμα που δεν ισχύει σε περιπτώσεις ενίσχυσης με χαλυβοελάσματα. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που το ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης είναι μικρότερο αυτού που αντιστοιχεί στη μετάβαση από το μηχανισμό διαρροή χάλυβα - θραύση σκυροδέματος στο μηχανισμό διαρροή χάλυβα – θραύση του σύνθετου φύλλου.

Στις σπάνιες σχετικά περιπτώσεις ενίσχυσης μελών σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα από την κατασκευή τους (οπότε και οι ερπυστικές παραμορφώσεις δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως) σημαντικό ρόλο αποτελεί ο τύπος και το ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού στις χρόνιες παραμορφώσεις δοκού οπλισμένου σκυροδέματος. Έτσι σε μακροχρόνιες δράσεις εξαιρετικά καλή συμπεριφορά παρουσιάζουν τα υλικά με ίνες άνθρακα τα οποία χαρακτηρίζονται από ουσιαστικά μηδενικές ερπυστικές παραμορφώσεις. Σχεδόν εξίσου ικανοποιητική είναι και η συμπεριφορά των υλικών με ίνες γυαλιού, τα οποία όμως χάνουν ποσοστό μεγαλύτερο από 50% της βραχυχρόνιας ελκυστικής αντοχής τους όταν τα φορτία είναι μακροχρόνια. Αντίθετα, υλικά με ίνες αραμιδίου αναπτύσσουν σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε διάστημα μερικών ωρών ή ημερών και επηρεάζουν δυσμενώς τα βέλη κάμψης. Σημειωτέων, τα μικρά ποσοστά οπλισμού ενίσχυσης μειώνουν σημαντικά τόσο τα βραχυχρόνια όσο και τα μακροχρόνια, λόγω ερπυσμού, βέλη κάμψης. Συμπερασματικά, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα εμφανίζουν σαφή πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων, τουλάχιστον σε ότι αφορά μακροχρόνιες δράσεις.

## **8.7. Ενίσχυση δοκού σε διάτμηση**

Η ενίσχυση σε διάτμηση εξασφαλίζεται μέσω της επικόλλησης υφάσματος σε διεύθυνση κάθετη προς αυτή των δοκών.

Με την εν λόγω ενίσχυση επιτυγχάνεται :

- Αύξηση της διατμητικής αντοχής
- Δραστική μείωση της πιθανότητας ψαθυρής αστοχίας
- Σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς των δοκών σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις (σεισμούς) και αύξηση της πλαστιμότητας.



**Εικόνα 8.7.:** Ενίσχυση δοκού σε διάτμηση [42].

Η ενίσχυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μορφή λωρίδων ή συνεχούς υφάσματος σε σχήμα U στις πλευρές και στην κάτω παρειά της δοκού. Αν και οι κλειστοί τύποι ενίσχυσης αποτελούν την βέλτιστη λύση από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς, αυτό δεν είναι εφικτό στις περισσότερες περιπτώσεις δοκών, λόγω της ύπαρξης πλακών και άλλων στοιχείων στηριζόμενων σε αυτές που δεν επιτρέπουν το τύλιγμα του υφάσματος πάνω από την παρειά της δοκού.

Σε σχέση με τις συμβατικές επεμβάσεις ενίσχυσης ,όπως είναι τα μεταλλικά ελάσματα, τα υφάσματα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα :

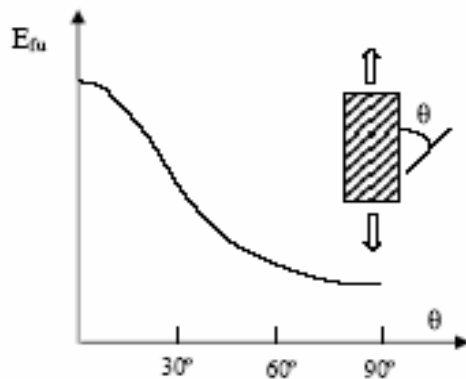
- Ευκολία και ταχύτατη εφαρμογή
- Αύξηση της αντοχής των δομικών στοιχείων χωρίς μεταβολή της γεωμετρίας ή αύξηση της δυσκαμψίας τους.
- Ανθεκτικότητα στο χρόνο και προστασία του οπλισμού από την υγρασία και τη διάβρωση.

### **8.7.1. Μηχανισμοί αστοχίας της ενισχυόμενης δοκού (τέμνουσα)**

Λόγω της σχετικής πολυπλοκότητας των τάσεων που καλούνται να μεταφέρουν τα σύνθετα υλικά στην περίπτωση διάτμησης, και με δεδομένη την πολύ μικρή αντοχή και δυσκαμψία των υλικών με ίνες μίας διεύθυνσης, επιβάλλεται η χρήση ινών σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις. Έτσι για την ενίσχυση σε διάτμηση χρησιμοποιούνται κυρίως ελάσματα, τα οποία και επικολλώνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κύριων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα στις πιθανές ρωγμές. Επιβάλλεται δηλαδή η χρήση ινών σε

δύο τουλάχιστον διευθύνσεις. Σύμφωνα λοιπόν και με τις τροχιές των κύριων τάσεων, τα φύλλα με ποσοστό ινών της τάξης του 30-50 % επικολλώνται σε γωνία

περίπου  $45^\circ$  ως προς τον άξονα του μέλους και σε κάποιο μικρότερο ποσοστό της τάξης του 10-20 % στην εγκάρσια διεύθυνση.



**Σχήμα 8.7.1 :** Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας – γωνίας ινών για Ι.Ο.Π. [42].

Με την προϋπόθεση ότι δεν εμφανίζονται άλλες μορφές αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών, όπως είναι η αποκόλληση τους, η προσέγγιση του προβλήματος έγκειται στην θεώρηση των τάσεων στους εξωτερικούς οπλισμούς ίσες με μια επιτρεπόμενη τιμή, που δίνεται σαν κάποιο ποσοστό της αντοχής των οπλισμών αυτών στην κύρια διεύθυνση των ινών. Η ανεπιθύμητη πρόωρη αποκόλληση από την επιφάνεια του σκυροδέματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι η ποιότητα (εφελκυστική αντοχή) της επιφάνειας του σκυροδέματος, το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών, το γεωμετρικό ποσοστό τους και ο βαθμός στερέωσης τους στο σκυροδέμα με μηχανικούς τρόπους (όπως αγκύρια στα άκρα), πέραν της εποξειδικής ρητίνης.

Αποτέλεσμα του οπλισμού ενίσχυσης είναι η σαφώς βελτιωμένη συμπεριφορά των μελών, χαρακτηριστικό της οποίας είναι η μετάβαση από τον ψαθυρό μηχανισμό διατμητικής αστοχίας στο μηχανισμό αστοχίας λόγω κάμψης. Ενδεικτική είναι επίσης η λιγότερο πλάσσιμη συμπεριφορά του μέλους με το υψηλότερο ποσοστό ενίσχυσης έναντι αυτού με το χαμηλότερο.

Συμπερασματικά, προέκυψε ότι η διατμητική αντοχή των δοκών αυξάνει σημαντικά μετά την ενίσχυσή τους με σύνθετα υλικά. Η αποδοτικότητα όμως των σύνθετων υλικών ελέγχεται από τον μηχανισμό αστοχίας τους. Επίσης η εφαρμογή σύνθετων υλικών έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ακαμψίας των δοκών, αλλά και τον ψαθυρό μηχανισμό αστοχίας τους το οποίο μπορεί να αλλάξει όταν το σύνθετο υλικό είναι επαρκώς αγκυρωμένο και η αύξηση της διατμητικής αντοχής είναι τέτοια ώστε η κατασκευή να αστοχήσει τελικά σε κάμψη (πλάσσιμη αστοχία).



**Σχήμα 8.7.2 :** Ενδεικτικοί τρόποι ενίσχυσης σε διάτμηση

## Σημειώσεις

Τα στοιχεία προς ενίσχυση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό αποφορτισμένα δεδομένου ότι να σύνθετα υλικά αρχίζουν να ενεργούν με την αύξηση της υπάρχουσας παραμόρφωσης. Η μέγιστη δυνατή συγκόλληση του ελάσματος (άριστη προετοιμασία υποστρώματος), καθώς και η επαρκής αγκύρωσή του (πέραν της περιοχής που απαιτείται καμπτική ενίσχυση), είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης. Συνίσταται να αποφεύγονται οι ματίσεις, οι οποίες ούτως ή άλλως δεν είναι απαραίτητες λόγω της διαθεσιμότητας των υλικών σε μεγάλα μεγέθη, ενώ επιτρέπονται οι διασταυρώσεις ελασμάτων ή υφασμάτων (με επικόλληση στις επιφάνειες επαφής). Ο χρόνος κατεργασίας των εποξειδικών συστημάτων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Επειδή κατά την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην κατασκευή (π.χ. περιπτώσεις πυρκαγιάς), μειώνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, είναι απαραίτητη η εξωτερική προστασία του μανδύα συνθετών υλικών (ειδικά επιχρίσματα, γυψοσανίδες κλπ). Η προστασία είναι απαραίτητη και σε περιπτώσεις έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία.

## **9. Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών**

Γενικά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών που σχεδιάζονται και παρασκευάζονται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά υπό φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, για μακρές χρονικές περιόδους, παρουσιάζουν ένα λογικό εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, οι οποίες περιλαμβάνουν :

- i. Θερμοκρασία
- ii. Υγρασία
- iii. Θαλάσσιο περιβάλλον
- iv. Υπεριώδη ακτινοβολία
- v. Γαλβανική διάβρωση
- vi. Επίδραση ψύξης - απόψυξης

### **9.1. Επίδραση της θερμοκρασίας**

Για το φυσιολογικό εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες χρησιμοποιούνται τα περισσότερα συστήματα ινοπλισμένων πολυμερών, δεν αναμένονται σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά τους, με την προϋπόθεση ότι τόσο η επιλογή όσο και η εφαρμογή του συστήματος έχει γίνει με τον ενδεδειγμένο τρόπο. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου ( $T_g$ ) είναι το σημείο πέρα από το οποίο η συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς αλλοιώνεται δραματικά παρουσιάζοντας σημαντική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Η παρεχόμενη θερμική ενέργεια για αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από την  $T_g$  επιτρέπει στις χημικές αλυσίδες της ρητίνης να μετακινηθούν και να γίνουν πιο εύκαμπτες. Ως εκ τούτου μειώνεται η συμμετοχή της ρητίνης στην ανάληψη φορτίου αλλά και η ικανότητά της να μεταφέρει τα φορτία ισομερώς στις ίνες, προκαλώντας περαιτέρω φόρτιση μεμονωμένων ινών, κυρίως των κοντύτερων από αυτές. Κατά συνέπεια, είναι πιθανό να υπάρξει υπέρβαση της αντοχής και ενδεχόμενη αστοχία. Η διαδικασία είναι

εξελικτική και έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της φέρουσας ικανότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς κατά 30 με 40% σε ακραίες περιπτώσεις.

Κατά το σχεδιασμό συστημάτων ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή επιβλαβής επίδραση θερμοκρασιών μεγαλύτερων από 80°C, καθώς μειώνεται σημαντικά η ικανότητα ανάληψης δυνάμεων από τις ρητίνες και επομένως καθίσταται προβληματική η μακροχρόνια συμπεριφορά των κατασκευών, στις οποίες τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί. Σκούρες επιφάνειες που εκτίθενται άμεσα στο ηλιακό φως, έχουν καταγράψει θερμοκρασίες της τάξης των 70°C. Σύνθετα υλικά έχουν επίσης δοκιμαστεί σε ακραίες αρνητικές θερμοκρασίες της τάξης των -40°C και δεν έχουν διαπιστωθεί δυσμενείς επιπτώσεις στην εν γένει συμπεριφορά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε θερμοκρασίες μεταξύ 10 και -30°C αυξάνεται σημαντικά η δυσκαμψία του υλικού με συνέπεια μία εξαιρετικά παθυρή μορφή αστοχίας, αλλά και μείωση της αντοχής σε κρούση [22].

Όσον αφορά στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε περίπτωση πυρκαγιάς, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, τα σύνθετα υλικά που έρχονται σε άμεση επαφή με τη φωτιά αναφλέγονται και επομένως τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να φέρουν τάσεις, εκτός εάν επιχριστούν ή επαλειφθούν με ειδική ρητίνη. Οι θερμοκρασίες 'αποσύνθεσης' των ινών είναι 1000 °C για το γυαλί, 650 °C για τον άνθρακα και 200 °C για το αραμίδιο. Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών έδειξαν ότι μανδύες συνθέτων υλικών με ίνες άνθρακα σε εποξειδική μήτρα υφίστανται απώλεια αντοχής για θερμοκρασίες πάνω από περίπου 260 °C. Για το λόγο αυτό τα σύνθετα υλικά που δε διαθέτουν πυροπροστασία θεωρούνται ανενεργά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Πυροπροστασία επιτυγχάνεται με ειδικά επιχρίσματα ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους (40 – 50 mm). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ειδικά προστατευτικά όπως γυψοσανίδες. Το επίχρισμα προστατεύει τα υλικά και ιδιαίτερα τη ρητίνη όχι μόνο από τη φωτιά και γενικά τις υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και από τη γήρανση λόγω της υπερϊώδους ακτινοβολίας. Επίσης, η τοποθέτηση επιχρίσματος αποτελεί οικονομικότερη λύση και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα βαφής και διακοσμητικής επέμβασης στο δομικό στοιχείο που ενισχύεται.

## **9.2. Επίδραση της υγρασίας**

Είναι καλά γνωστό ότι η έκθεση των σύνθετων υλικών σε υγρά περιβάλλοντα, τόσο υπό κανονικές όσο και υπό το μηδέν συνθήκες, οδηγεί σε ορισμένη αποικοδόμηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, που απαιτεί ορθή κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ της υγρασίας περιβάλλοντος και της δομικής τους ακεραιότητας. Κύρια μέριμνα, όσον αφορά στα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών, είναι η αντοχή της μήτρας σε παρατεταμένη έκθεση σε νερό. Η υγρασία έχει μικρή επίδραση στη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών και χρειάζεται εξαιρετικά μακρά χρονική περίοδο για να εκδηλωθεί. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού, οι χημικές αλυσίδες του πολυμερούς είναι πλήρως υδατοδιαλυτές, μεταλλικά ιόντα διηθούνται από τις ίνες του και το σύνθετο υλικό γίνεται εύθραυστο.

Οι άμεσες συνέπειες της απορρόφησης νερού από την μήτρα είναι συνήθως η μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ) και η απώλεια της δυσκαμψίας της ρητίνης. Αυτά τα δυο φαινόμενα όμως είναι μερικώς ανατρέψιμα σε συστήματα με εποξειδικές ρητίνες. Αντίθετα στις πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες, οι μεταβολές μπορεί να είναι ανατρέψιμες ή όχι, ανάλογα με τον χρόνο και την θερμοκρασία της έκθεσης. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το

συμπέρασμα ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερες και δυσμενέστερες είναι οι μόνιμες επιπτώσεις της διείσδυσης υγρασίας. Προσεγγιστικά, η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C.

Η υγρασία αποκτά πρόσβαση στο ινοπλισμένο πολυμερές μέσω τριών διαφορετικών οδών :

- Μέσο της τριχοειδούς δράσης κατά μήκος του διαμήκους άξονα της ίνας στη διεπιφάνεια ρητίνης και ίνας.
- Μέσο ρωγμών και κενών στη δομή του σύνθετου υλικού.
- Μέσο διάχυσης διαμέσου της μήτρας .

Τα υαλονήματα, λόγω της υψηλής πολικότητας των μορίων τους, απορροφούν υγρασία κατά τη διάρκεια της παρασκευής, αποθήκευσης, μεταφοράς και εφαρμογής τους στο δομικό στοιχείο. Οι ίνες αραμιδίου απορροφούν υγρασία έως και 13% του βάρους τους, που μπορεί να έχει επιβλαβή επίδραση στην εφελκυστική τους αντοχή, καθώς και στη διεπιφάνεια ρητίνης και ινών. Τα ανθρακονήματα είναι αδρανή στο νερό, ενώ τα υαλονήματα παρουσιάζουν μικρή μείωση αντοχής. Επομένως, η επίδραση της υγρασίας σε αυτού του είδους τα υλικά περιορίζεται στην επίδραση που έχει στη ρητίνη της μήτρας.

### **9.3. Επίδραση θαλάσσιου περιβάλλοντος**

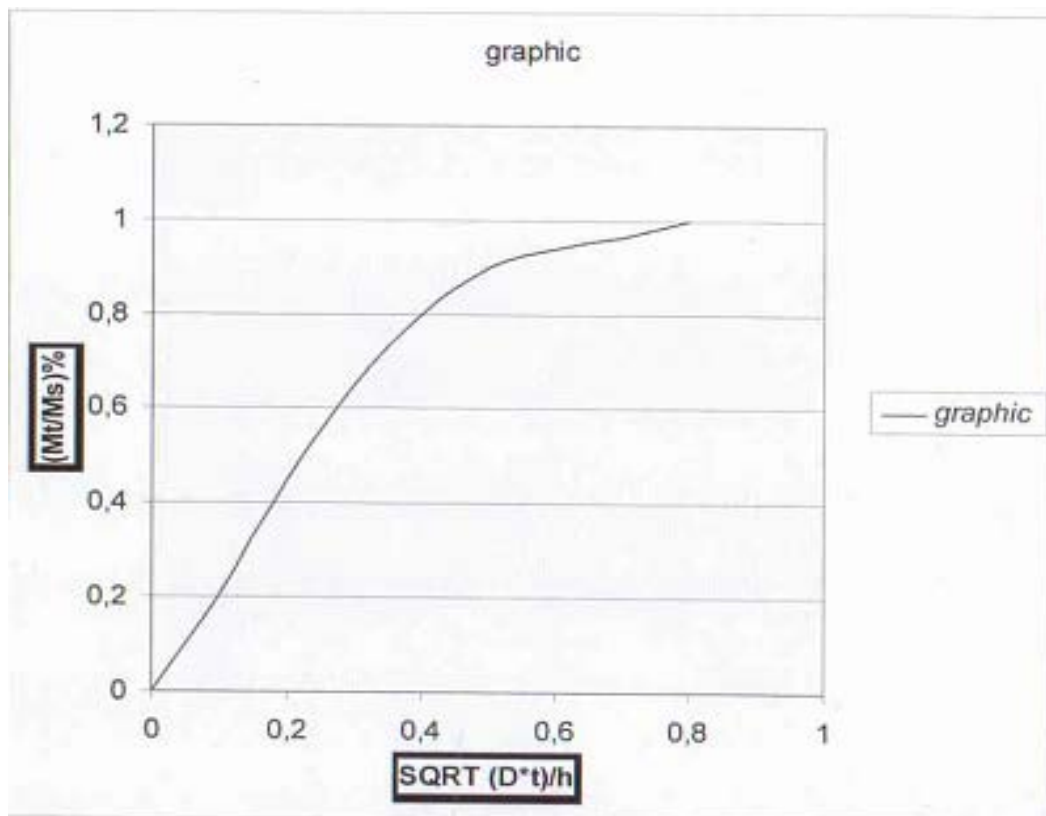
Έκθεση στο θαλάσσιο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να είναι πολύ δυσμενή, αλλά πολύ λίγες είναι μέχρι τώρα οι μελέτες που έχουν γίνει πάνω στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Διαφορετικές συμπεριφορές μπορούμε να περιμένουμε ανάλογα την φύση της ρητίνης, των ινών και τις ιδιότητες του περιβάλλοντος έκθεσης.

- Υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων λόγω βιολογικής επίθεσης :  
Σύμφωνα με μελέτη που έκανε η Γαλλική εταιρεία IFREMER στα πειραματικά αποτελέσματα δεν παρουσιάστηκαν φαινόμενα βιολογικής επίθεσης σε όλα τα υπό εξέταση υλικά, εκτός από ένα υλικό polyester-glass-mat laminate, το οποίο παρουσίασε τα παραπάνω φαινόμενα μετά από έκθεση χρονικής διάρκειας 3 ετών και σε βάθος 1000 ποδών.
- Γήρανση λόγω απορρόφησης νερού :  
Τα σύνθετα υλικά είναι συνηθισμένο να παρουσιάζουν το παραπάνω φαινόμενο. Η απορρόφηση του νερού περιγράφεται από τους νόμους της διάχυσης, οι οποίοι ονομάζονται νόμοι του FICK, προς τιμή του ομώνυμου επιστήμονα, ο οποίος και τις εισήγαγε στην επιστημονική κοινότητα. Οι νόμοι του FICK συσχετίζουν τον χρόνο έκθεσης στο νερό  $t$  με το ποσό του απορροφημένου νερού  $M_t$  διαιρούμενου με το ποσό  $M_s$ , το οποίο είναι το πόσο του νερού που είναι εναποθετημένο στην επιφάνεια του υλικού (στρώμα νερού), σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

Για υλικό δύο στρώσεων με :

- πάχος = h
- συντελεστή διάχυσης = D

$$\frac{Mt}{Ms}\% = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left( \frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{h^2} \right)}$$



Το παραπάνω γράφημα είναι αποτέλεσμα της έρευνας της προαναφερθείσας γαλλικής εταιρίας INFREMER [29].

Κάθε ρητίνη μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο παραμέτρους Ms και D. Η διάχυση είναι ένα φαινόμενο που ενεργοποιείται μέσω της θερμοκρασίας. Ο νόμος της διάχυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λείες ρητίνες και στρώσεις. Πρέπει όμως επίσης να ληφθεί υπόψη και η επιφάνεια μεταξύ της ρητίνης και των ινών. Τα κενά περιεχόμενα μπορούν επίσης να επηρεάσουν την τιμή του Ms. Η υδροστατική πίεση μειώνει τον ελεύθερο όγκο και έτσι μειώνεται και η τιμή του Ms.



Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι:

- Για σύνθετα ενισχυμένα με ίνες: Οι νόμοι του FICK κατά κανόνα ακολουθούνται. Οι τιμές του  $M_s$  και  $D$  δεν επηρεάζονται άμεσα από την πίεση.
- Για συντακτικούς αφρούς οι  $M_s$  και  $D$  δείχνουν να επηρεάζονται ελαφρά από την πίεση και το επίπεδο γήρανσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω εταιρίας η απορρόφηση νερού μπορεί να προκαλέσει:

- πλαστικοποίηση της ρητίνης, που είναι φαινόμενο αναστρέψιμο και
- υδρόλυση της ρητίνης ( για θερμοσκληρυνόμενα υλικά), που είναι φαινόμενο μη αναστρέψιμο.

Με τον καιρό, όλες οι μηχανικές ιδιότητες μειώνονται, συμπεριλαμβανόμενο το ελαστικό μοντέλο και το όριο αντοχής. Οι μηχανικές ιδιότητες όλου του υλικού δεν μειώνονται με τον ρυθμό τον αντίστοιχο της ρητίνης, λόγω αντοχής των ινών σε σχέση με την αντοχή της ρητίνης [28].

#### 9.4. Επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας

Η υπεριώδη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει μήκη κύματος που εκτείνονται από τα 4 ως τα 400 nm. Ξεκινά από το μικρότερο μήκος κύματος της ορατής ακτινοβολίας (ιώδες) και φτάνει μέχρι το μήκος κύματος των ακτινών Χ. Σημαντικά φαινόμενα που σχετίζονται με την υπεριώδη ακτινοβολία είναι βιολογικές διεργασίες και εφαρμογές, χημικές αναλύσεις μέσω χαρακτηριστικής απορρόφησης και το φαινόμενο φθορισμού.

Η υπεριώδης ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης έχει μήκη κύματος στην περιοχή των 290-400 nm και αποτελεί μόνο το 5% της συνολικής ηλιακής ενέργειας που δέχεται η γη. Παρόλα αυτά, η αντίστοιχη ενέργεια φωτονίων που είναι 418-293 kJ/mol είναι αρκετά ισχυρή ώστε να προκαλέσει διάσπαση δεσμών στα πολυμερή. Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αντίστροφα ανάλογη του μήκους κύματος, σύμφωνα με την εξίσωση  $E = hc/\lambda$ , όπου  $h$ : η σταθερά του Planck,  $c$ : η ταχύτητα του φωτός (300000km/sec) και  $\lambda$ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η υπεριώδης ακτινοβολία που έχει μικρό μήκος κύματος, έχει πολύ περισσότερη ενέργεια, τόσο από την ορατή ακτινοβολία όσο και από την υπέρυθη.

Γενικά η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου ( UV ) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών ( ευτυχώς μόνο επιφανειακά ) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η χρωματική αλλοίωση και η μικρορηγμάτωση των εκτιθέμενων επιφανειών. Στην περίπτωση των συνθέτων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της. Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι πιο ευαίσθητες από τις εποξειδικές στην επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας, αν και παρουσιάζουν περίπου ίδια πτώση αντοχής. Με εξαίρεση τις ίνες αραμιδίου, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς, τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα δεν επηρεάζονται από την δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Ως μέθοδος προστασίας στην περίπτωση της απευθείας έκθεσης στον ήλιο συνίσταται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV εξωτερικών βαφών ανοικτού χρώματος. Αναφέρεται ότι σκούρες επιφάνειες, που εκτίθενται άμεσα στο ηλιακό φως, έχουν καταγράψει θερμοκρασίες της τάξης των 70 °C .

## 9.5. Επίδραση της γαλβανικής διάβρωσης

Πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών άνθρακα με χάλυβα. Η επαφή των δύο υλικών προκαλεί γαλβανική διάβρωση του χάλυβα. Το πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά με ίνες υάλου ή πολυαραμιδής [18].

## 9.6. Επίδραση της ψύξης – απόψυξης

Η ύπαρξη πιθανών ρωγμών στην διεπιφάνεια του σκυροδέματος και των τοποθετούμενων συνθέτων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε τοπική αποκόλληση τους σε περίπτωση εγκλωβισμού νερού και μετατροπής του σε πάγο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Ο Kaiser (1989) σε πειράματα που έκανε σε δοκούς οι οποίες υπεβλήθησαν σε 100 κύκλους ψύξης-απόψυξης σε θερμοκρασίες μεταξύ -250C και 200C δεν παρατήρησε κάποια μείωση της αντοχής των δοκών. Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν και από άλλες ερευνητικές εργασίες ( Green 1998, Tysl 1998, Yagi 1997). Η επιρροή της ψύξης-απόψυξης είναι έντονη όταν η ποιότητα του υποστρώματος από σκυρόδεμα είναι αρκετά χαμηλή .

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η αξιολόγηση των ινών με βάση την ανθεκτικότητά τους σε μια σειρά παραγόντων.

Κριτήριο	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Γυαλιού	Ίνες Αραμιδίου
Υψηλές θερμοκρασίες	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Υγρασία	+	-	-
Αλκαλικό & όξινο περιβάλλον	++	--	+
Γαλβανική διάβρωση	--	+	+
Ερπυσμός	++	--	-
Θραύση υπο τάση, Διάβρωση υπό τάση	++	--	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητά [38].

## **10. Πειραματικό μέρος**

### **10.1. Τεχνική περιγραφή**

Το πειραματικό μέρος της παρούσας πτυχιακής είναι η μελέτη υφιστάμενου κτιρίου και λόγω αύξησης των φορτίων του, η ενίσχυση του κτιρίου με τη μέθοδο των σύνθετων υλικών FRP, όπως αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στο θεωρητικό μέρος της πτυχιακής. Συγκεκριμένα υπάρχει ένα ισόγειο κτίσμα με χρήση κατοικίας ,συνολικού εμβαδού Δόμησης: 102,96 m<sup>2</sup> , και Κάλυψης : 113,04 m<sup>2</sup> και αναλύεται ως κατωτέρω:

Ισόγειο Τμήμα Κατοικίας : 102,96 m<sup>2</sup>

Εξώστες : 23,50 m<sup>2</sup>

Ημιυπαίθριοι Χώροι : 10,08 m<sup>2</sup>

Η οικοδομή είναι κατασκευασμένη όσο αφορά το φέρων οργανισμό απο οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 . Η οροφή είναι απο σκυρόδεμα πάχους 20 cm και ο οργανισμός πληρώσεως αποτελείται από διπλή δρομική εξωτερική τοιχοποιία με ενδιάμεση μόνωση πάχους 5cm . Το κτίριο εξωτερικά είναι επιχρισμένο με λευκό επίχρισμα σε τρεις στρώσεις.

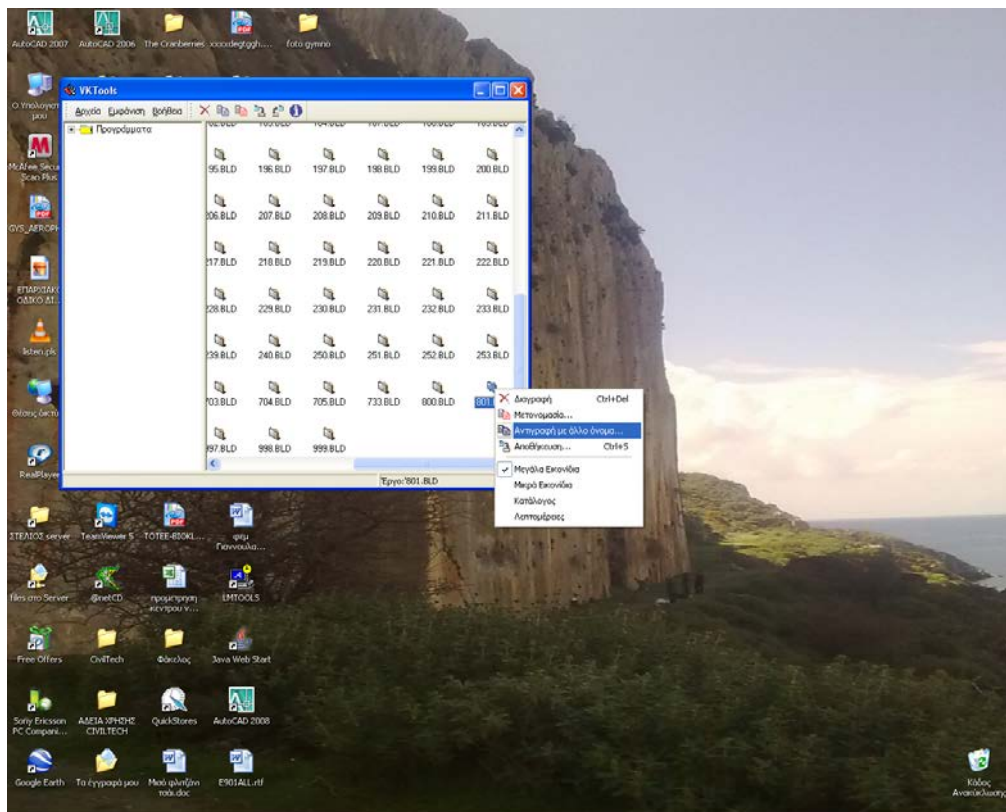
Η κύρια χρήση αλλά και η εξωτερικές όψεις του κτιρίου είναι απόλυτα συναφής με τον γύρω οικιστικό τομέα της συγκεκριμένης περιοχής. Η κύρια πρόσβαση στο κτίριο είναι από την βόρεια πλευρά του οικοπέδου, όπου και συνορεύει με δημοτική οδό κυμαινόμενου πλάτους 2,50 εως 4.00 μ. Η οικοδομή έχει τοποθετηθεί στο νότιο τμήμα του οικοπέδου με προσανατολισμό το βορρά όπου βρίσκεται και η θέα του.

Στο κτίριο αυτό θα πραγματοποιηθούν αλλαγές. Το ισόγειο θα τροποποιηθεί, με μια αλλαγή χρήσης θα αλλάξει από κατοικία σε κατάστημα ρούχων και στο δώμα θα λειτουργήσει μαγαζί νυκτερινής διασκέδασης- bar. Για τη λειτουργία του μαγαζιού είναι απαραίτητη η προσθήκη ορόφου στο δώμα E= 35,61 m<sup>2</sup>.

Το κτίριο αυτό δεν ήταν αρχικά σχεδιασμένο να αντέχει τα φορτία, μόνιμα και κινητά, τα οποία απαιτούνται στη περίπτωση αυτή. Μετά τις απαραίτητες επεμβάσεις, το στατικό πρόγραμμα μας υπέδειξε που παρουσιάζει ευαισθησία το κτίριο. Έτσι λοιπόν για την πραγματοποίησή του εν λόγω έργου είναι απαραίτητη η ενίσχυση του στα εξής δομικά στοιχεία, τις δοκούς Δ1 , Δ2 , Δ3, Δ11, Δ12, Δ13 όπως επίσης και το υποσύλωμα Κ2. Παρακάτω αναλύεται βήμα βήμα πως καταλήξαμε σε αυτό το συμπέρασμα με τη βοήθεια δυο στατικών προγραμμάτων , του STRAD 2009 και του FRP – Analysis .

## 10.2. Στατική επίλυση του κτιρίου με το πρόγραμμα Strad 2009 σε συνεργασία με το AutoCAD 2007

Για να κάνουμε στατική επίλυση στο εν λόγω κτίριο χρειαζόμαστε μία μελέτη μίας ισόγειας κατοικίας όπως η δικιά μας. Σε αυτό το στάδιο χρειαζόμαστε το πρόγραμμα VK tools (Διαχείριση Αρχείων Μελετών). Ανοίγουμε λοιπόν το πρόγραμμα VK tools και κάνουμε σε μία προϋπάρχουσα μελέτη, **αντιγραφή με νέο όνομα**.



Τώρα λοιπόν έχουμε μια μελέτη, άρα μένει πάνω σε αυτήν να πραγματοποιήσουμε τη δική μας επίλυση. Στο επόμενο βήμα ανοίγουμε το πρόγραμμα strad 2009 και επιλέγουμε να δουλέψουμε τη μελέτη που δημιουργήσαμε προηγουμένως. Πηγαίνουμε στη γραμμή μενού και επιλέγουμε **File** → **Επιλογή Μελέτης** και επιλέγω τη μελέτη ,την οποία δημιούργησα προηγουμένως. Για να δουλέψουμε το σχέδιο μας θα πρέπει να διαγράψουμε τα δεδομένα από όλες τις στάθμες της προϋπάρχουσας μελέτης. Για εναλλαγή στις στάθμες της παρούσας μελέτης οδηγούμαστε από τα εξής εικονίδια :

Προηγούμενη Στάθμη				declev
Επόμενη Στάθμη				inclev

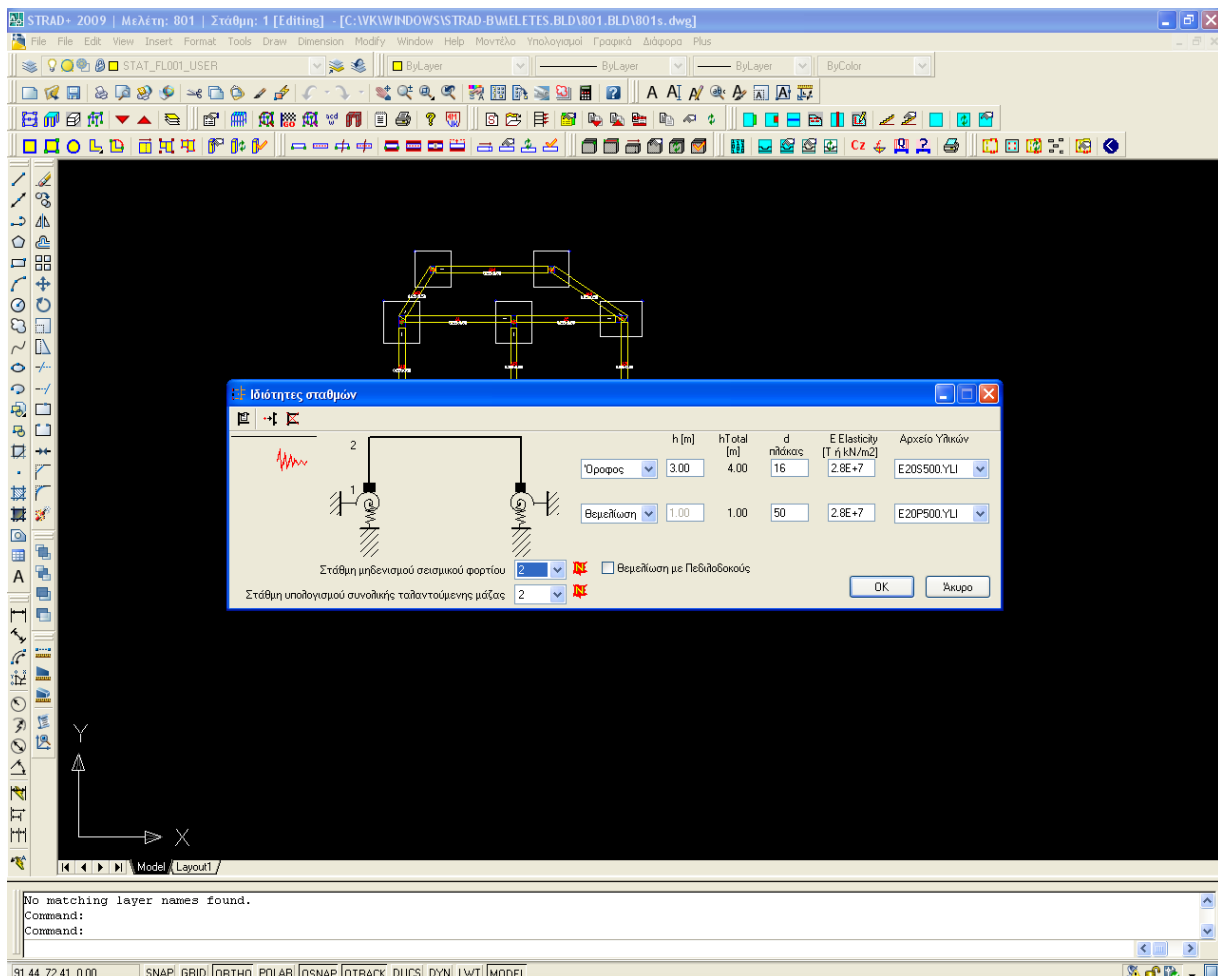
Για να ενημερωθεί το πρόγραμμα για τις αλλαγές που έχουμε πραγματοποιήσει θα πρέπει από τη γραμμή μενού να επιλέξουμε : **Μοντέλο** → **Ενημέρωση** → **Όλων**. Η εντολή αυτή είναι απαραίτητη για την ενημέρωση του προγράμματος, αλλά και τη σωστή λειτουργία του.

Το πρόγραμμα θα πρέπει να ενημερώνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να γνωρίζει τις αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί και να ενεργεί κατάλληλα.

Εφόσον λοιπόν η μελέτη, πάνω στην οποία, δουλεύουμε είναι άδεια σε όλες τις στάθμες, μπορούμε να επεξεργαστούμε (προσθέσουμε- αφαιρέσουμε) τις στάθμες και να τις διαμορφώσουμε σε όσες επιθυμούμε από το εξής εικονίδιο :



Το κτίριο μας πρόκειται για μία ισόγεια κατοικία, εφόσον όσον αφορά τις στάθμες θα πρέπει να υπάρχουν 2 στάθμες. Μία θεμελίωση και άλλη μία ο ισόγειος όροφος. Οπότε όσον αφορά τις ιδιότητες σταθμών θα πρέπει να έχουμε ένα παράθυρο όμοιο με το παρακάτω:



Όπως έχουμε επεξεργαστεί το πρόγραμμα έως τώρα θα μπορούμε να έχουμε 2 εναλλαγές σταθμών. Δουλεύουμε από τον όροφο προς τα θεμέλια. Ξεκινάμε από τη Στάθμη 2, δημιουργούμε ένα θετικό τεταρτημόριο κάπου στο μαύρο της οθόνης μας και τοποθετούμε και δίπλα την κάτοψη του ισογείου μας σε block με αντιγραφή από το AutoCAD 2007.



Ξεκινάμε λοιπόν ,εφόσον έχουμε ενδεικτικά τα υποστυλώματα στις κατόψεις, και εισάγουμε τα εξής δομικά στοιχεία και με την ακόλουθη σειρά :

- Υποστυλώματα

Υποστύλωμα >	Ορθογώνιο	√		rscs <span style="color: red;">■</span>
	Με 3 σημεία	√		rc3s
	Κυκλικό	√		ccs
	Γάμμα	√		gcol
	Πι	√		pcol
	Αλλαγή Σταθερού Σημείου	√		crccp
	Επέκταση	√		escbe <span style="color: red;">■</span>
	Ένωση	√		urcs <span style="color: red;">■</span>
	Διάσπαση	√		ercs
	Αλλαγή	√		esrc <span style="color: red;">■</span>
	Ενημέρωση			colrefresh <span style="color: red;">■</span>
Φυτευτό >	Ορθογώνιο	√		rcsp
	Κυκλικό	√		ccsp
	Αλλαγή	√		esfc
	Ενημέρωση			fceref
	Προκαθορισμένο			fcdef
Τοίχιο Υπογείου >	Σημεία	√		wcs
	Κεντροβαρικά	√		wcsa
	Αλλαγή	√		eswc
	Ενημέρωση			wcrefresh

- Δοκοί (θα πρέπει να τονιστεί ότι σε κάθε στάθμη θα πρέπει να σημειώνουμε τις συνέχειες των δοκαριών.)

Δοκός >	Σημεία	√		beams	
	Με κεντροβαρικό άξονα	√		beamsa	
	Σημεία με ενδιάμεσα σπασίματα	√		csbab	
	Με κεντροβαρικό άξονα και ενδιάμεσα σπασίματα	√		beamsabr	
	Επέκταση	√		extbs	
	Αλλαγή	√		esb	
	Ενημέρωση			bref	

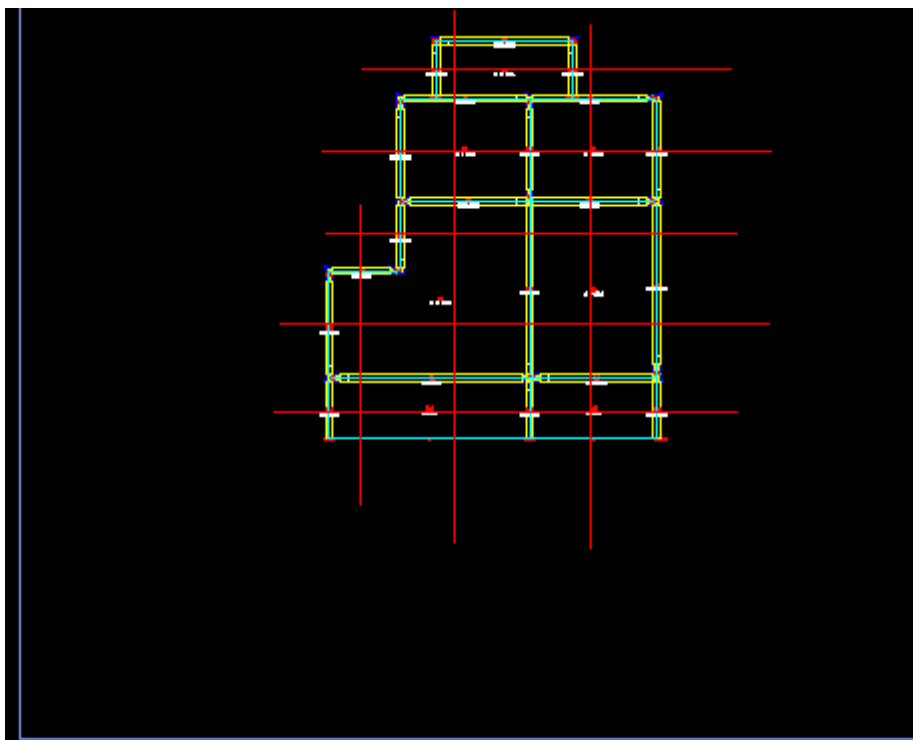
- Πλάκες

	Αυτόματη αναγνώριση	√		csslab	
--	---------------------	---	--	--------	--

- Προβόλοι

	Πρόβολοι	√		csprob	
--	----------	---	--	--------	--

Στη παρούσα πτυχιακή χρειαστήκαμε μόνο τα σημειωμένα εικονίδια. Εφόσον έχουμε ολοκληρώσει τα δομικά στοιχεία της κατασκευής μας (κολώνες ,δοκάρια ,πλάκες), συνεχίζω δημιουργώντας τις ζώνες επίλυσης, όπου θα πρέπει να κόβω όλα τα δοκάρια του κτιρίου μας και θα πρέπει να έχουμε φτάσει στο εξής σημείο.



Έπειτα επιλέγω την εντολή Επίλυση Πλακών και στο παραθυράκι που θα εμφανιστεί, με τη **μέθοδο Marcus**, έπειτα **Παράκαμψη Μηνυμάτων** και στη συνέχεια **OK**. Στο τέλος της διαδικασίας αυτής το σύστημα θα μας εμφανίσει τυχόν αδυναμίες στα πάχη των πλακών που έχουμε ορίσει. Μετά τον έλεγχο των οπλισμών, πρέπει να γίνεται ο έλεγχος των πλακών σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) από βέλη. Αρχικά, εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου για τον έλεγχο λυγηρότητας, σύμφωνα με την Παρ. 16,2 ΕΚΟΣ εάν σε κάποια πλάκα δεν ικανοποιείται η αντίστοιχη ανισότητα (ανάλογα με τον τύπο της πλάκας), εμφανίζεται στην οθόνη πίνακας που περιλαμβάνει τον αύξοντα αριθμό, το μήκος της πλάκας και τον συντελεστή  $\alpha$  (ο οποίος εξαρτάται από τις συνθήκες στήριξης) για τα οποία προκύπτει η υπέρβαση και προτείνεται το απαραίτητο πάχος ώστε να ικανοποιηθεί ο έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός θα πρέπει να πραγματοποιείται σε κάθε στάθμη.

Πίνακας 5-6: Πλαίσιο Διαλόγου «Λυγηρότητα-Βέλη- Έλεγχος σε λυγηρότητα»

Πεδίο	Περιγραφή
Πλάκα	Οι πλάκες στις οποίες είναι απαραίτητος ο έλεγχος βέλους κάμψης.
Μήκος (m)	Το μήκος της πλάκας για το οποίο γίνεται ο έλεγχος παραμόρφωσης.
$\alpha$	Πιν. 16.2 ΕΚΟΣ. Τιμές του $\alpha$ ανάλογα με τον τύπο πλάκας και τις συνθήκες στήριξης.
Χωρίς διαχωριστικά $h_{opt}$	Το απαιτούμενο πάχος της πλάκας χωρίς ευαίσθητους διαχωριστικούς τοίχους ώστε να ικανοποιείται ο έλεγχος λυγηρότητας.
Με διαχωριστικά $h_{opt}$	Το απαιτούμενο πάχος της πλάκας με ευαίσθητους διαχωριστικούς τοίχους ώστε να ικανοποιείται ο έλεγχος λυγηρότητας.
Μεταφορά φορτίων πρόσθετων δοκών (ζώνες, ειδικοί σύνδεσμοι κ.λ.π.)	Επιλογή για το να θα γίνει μεταβίβαση φορτίων από πρόσθετα στοιχεία( ειδικούς συνδέσμους κτλ) στις δοκούς.

Με την επιλογή <<OK>> εμφανίζεται ο πίνακας αναλυτικής εκτύπωσης των παραμορφώσεων για όλες τις πλάκες κατά τη μικρότερη τους διάσταση.

Πίνακας 5-7: Πλαίσιο Διαλόγου «Λυγηρότητα-Βέλη- Έλεγχος σε βέλος ρηγματωμένων διατομών»

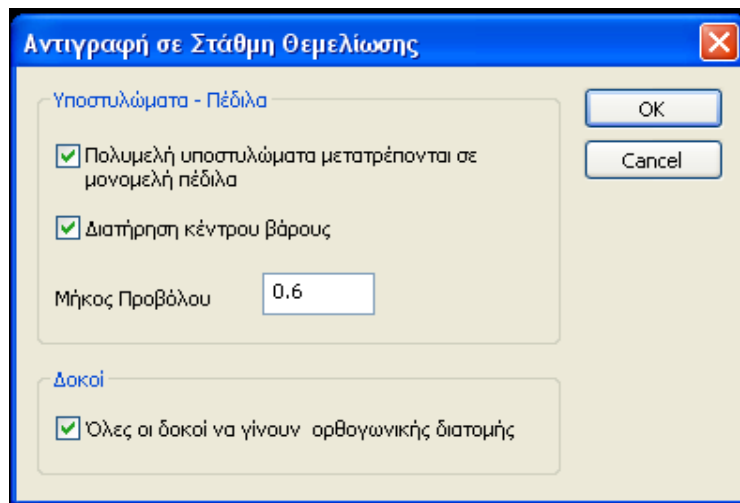
Πεδίο	Περιγραφή
Πλάκα	Ο αύξων αριθμός της πλάκας.
L(m)	Το μήκος της πλάκας, για το οποίο γίνεται ο έλεγχος βέλους κάμψης.
P(KN/m)	Το φορτίο της πλάκας σε KN/m (ζώνη πλάτους 1m).
$\alpha$	Πιν. 16.2 ΕΚΟΣ. Συντελεστής $\alpha$ που εξαρτάται από τις συνθήκες στήριξης.
Ζώνη	Η διεύθυνση της Ζώνης Επίλυσης (κατά x ή y) για την οποία προκύπτουν τα βέλη
L/250, L/500	Παρ.16.1 ΕΚΟΣ. Επιτρεπόμενο όριο βέλους κάμψης
$a$ (mm)	Ελαστικό βέλος, σε mm.
$a_0$ (mm)	Βέλος κάμψης, για βραχυχρόνιο συνδυασμό φόρτισης σε mm.
$a_i$ (mm)	Βέλος κάμψης, για μακροχρόνιο συνδυασμό φόρτισης σε mm. (συμπεριλαμβανομένου και του ερπυσμού)
$M_r$ (KNm)	Ροπή ρηγμάτωσης σε KNm
$M_d$ (KNm)	Ροπή σχεδιασμού σε KNm. Αν $M_d > M_r$ , η διατομή είναι σε στάδιο II (ρηγματωμένο σκυρόδεμα) και προκύπτει $\alpha_o > \alpha_e$ Αν $M_d < M_r$ , η διατομή είναι σε στάδιο I, και $\alpha_o = \alpha_e$
$\Phi$	Συντελεστής ερπυσμού



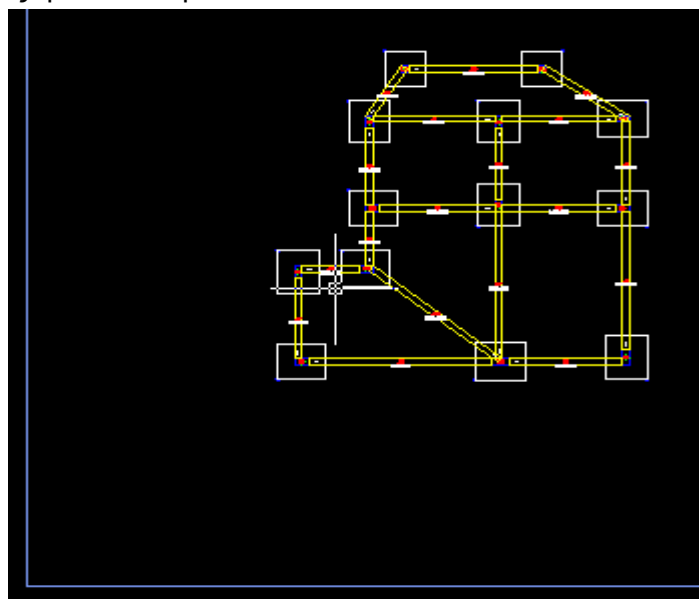
Εφόσον πρόκειται για ισόγεια κατοικία και αφού έχουμε τελειώσει τον όροφο, βρισκόμαστε στο στάδιο όπου πρέπει να κάνουμε και τα θεμέλια. Γνωρίζουμε ότι οι κολώνες φτάνουν έως κάτω στα θεμέλια, άρα επιλέγουμε τα υποστυλώματα και έπειτα την εντολή **Αντιγραφή Στάθμης στην Προηγούμενη**.

Αντιγραφή Στάθμης στην Προηγούμενη				copydownlev <span style="color: red;">■</span>
Αντιγραφή Στάθμης στην Επόμενη				copydownlev

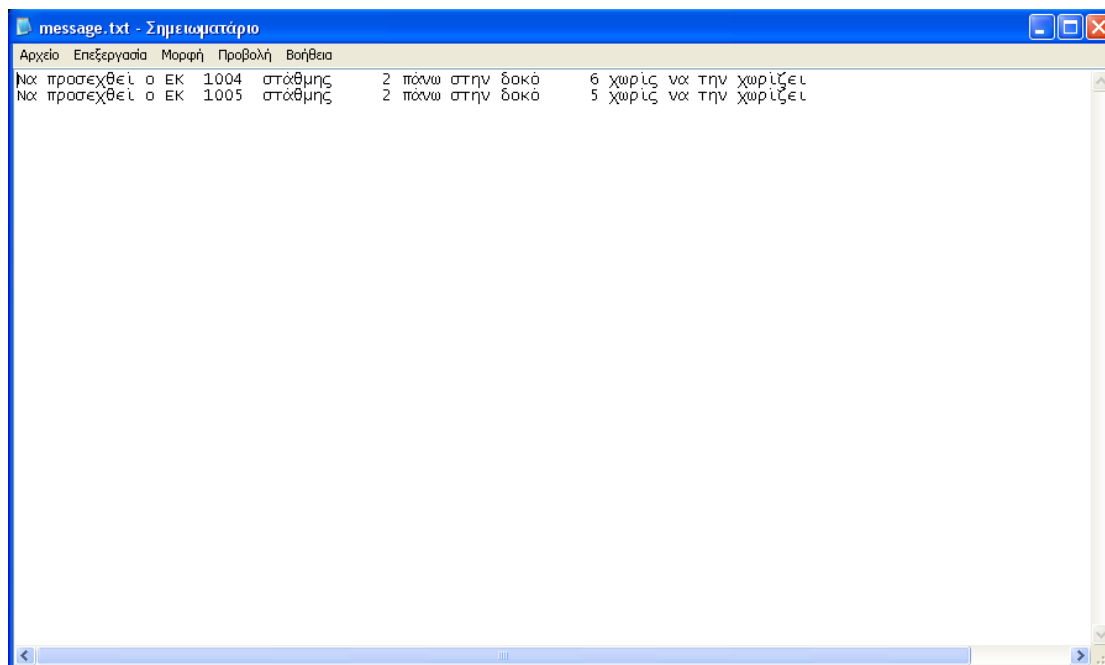
Έπειτα από την εντολή αυτή το σύστημα μας ρωτάει άμα επιθυμούμε να μετατρέψουμε τα πολυμελή υποστυλώματα σε μονομερή πέδιλα και υπάρχει και η αντίστοιχη εντολή για να επιλέξουμε το 'φτερό' του πέδιλου, όπως εμφανίζεται παρακάτω.



Έχοντας λοιπόν επιλέξει το 'φτερό' του πέδιλου από την εντολή **Μήκος Προβόλου**, θα εμφανιστεί αυτόματα η προηγούμενη στάθμη και στο μαύρο της οθόνης θα υπάρχουν τα πέδιλα 'κάτω' από τις επιλεγμένες κολώνες. Για να ολοκληρώσουμε τη θεμελίωση μένει να εισάγουμε και τις συνδετήριες δοκούς. Τις συνδετήριες δοκούς τις επιλέγουμε από εκεί όπου επιλέγουμε τις κανονικές δοκούς της κατοικίας, απλά αυτές είναι μορφής | . Οπότε θα πρέπει να έχουμε μια κατάσταση όπως η ακόλουθη:



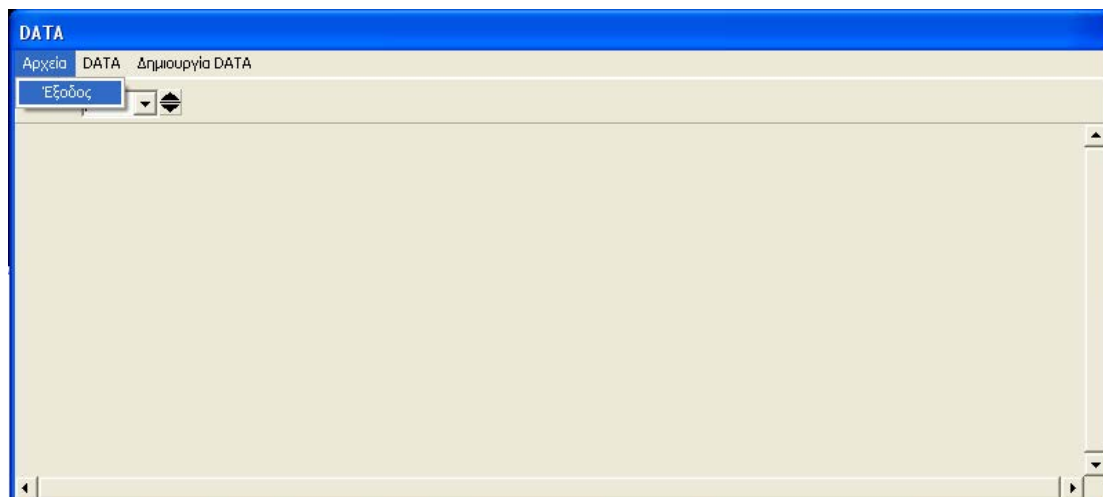
Το επόμενο βήμα είναι η πραγματοποίηση **Λογικού Ελέγχου**, όπου πραγματοποιείται μία σειρά ελέγχων των δεδομένων και είναι απαραίτητο πριν από το υπολογιστικό μέρος του προγράμματος. Το παραθυράκι που μπορεί να προκύψει από το Λογικό Έλεγχο είναι όμοιο με το παρακάτω. Απλά πατάμε <<ENTER>> και συνεχίζουμε διορθώνοντας τα προβλήματα που μας υποδεικνύει και στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.



Επιλέγοντας την εντολή '**Γενικές Παράμετροι**', το οποίο είναι και η επόμενη κίνηση μας, εμφανίζεται πλαίσιο διαλόγου για την επιλογή του Αρχείου Υλικών προς προβολή και τροποποίηση.

Το Αρχείο Υλικών περιέχει αρκετές πληροφορίες, με τη μορφή παραμέτρων, με βάση τις οποίες θα γίνει επίλυση, ο έλεγχος και η διαστασιολόγηση των στοιχείων του φορέα. Το πλαίσιο διαλόγου του αρχείου υλικών αποτελείται από τις καρτέλες : Κανονισμοί, Υλικά, Προσομοίωση-DATA, Φορτία, Κατασκευαστικά, Συνδ. Φόρτισης. Το Αρχείο Υλικών αποθηκεύεται ως αντίγραφο στο φάκελο μελέτης. Συνεπώς υπάρχουν στο δίσκο τόσα αρχεία υλικών όσες και οι μελέτες.

Το επόμενο βήμα, το οποίο προηγείται πάντα και αυτό της επίλυσης του φορέα είναι το **Χωρικό Μοντέλο** και η **Δημιουργία** αρχείου **DATA**. Κατά τη δημιουργία Χωρικού Μοντέλου υπολογίζονται τα αδρανειακά χαρακτηριστικά, τα φορτία και η συνδεσμολογία του φορέα. Οπότε επιλέγουμε : **Υπολογισμοί** → **Χωρικό Μοντέλο** → **Δημιουργία DATA** → **Αρχείο** → **Έξοδος**, όπως εμφανίζεται παρακάτω.



Οι **Προέλεγχοι** δεν αποτελούν υποχρεωτικό βήμα στη πορεία μιας μελέτης, ωστόσο, μπορούν να προλάβουν μεγάλο μέρος της εργασίας αναζήτησης και διόρθωσης σφαλμάτων κατά τη περιγραφή του φορέα. Η διαδικασία των προελέγχων έπεται πάντα του χωρικού μοντέλου και προηγείται πάντα της Επίλυσης. Ασχολούμαστε λοιπόν μόνο με τον έλεγχο «**Τοπολογία φορέα**», ο οποίος αποτελεί τον τελευταίο έλεγχο αριότητας του μοντέλου πριν την επίλυση και για αυτό και δεν υπάρχει παρατήρηση πριν την επίλυση του φορέα. Αν υπήρχαν προβλήματα που δεν εντοπίστηκαν στα άλλα σημεία ελέγχου του προγράμματος, βρίσκονται σε αυτό το σημείο. (**Υπολογισμοί** → **Προέλεγχοι Φορέα** → **Γενικοί Προέλεγχοι** → **Τοπολογίας** ). Συγκεκριμένα ο έλεγχος τοπολογίας ελέγχει αν υπάρχει διπλή συνδεσμολογία, δηλαδή εάν δύο ή περισσότερα μέλη ξεκινούν από έναν συγκεκριμένο κόμβο και καταλήγουν σε έναν άλλο συγκεκριμένο. Ελέγχεται εάν υπάρχει υποφορέας στο χωρικό μοντέλο, δηλαδή μέλος ή ομάδα μελών ασύνδετων με τον υπόλοιπο φορέα.

Γίνεται έλεγχος εάν υπάρχουν στο φορέα ασύνδετοι κόμβοι και μέλη με μηδενικό μήκος. Όταν οι έλεγχοι της Τοπολογίας ικανοποιούνται εμφανίζονται στην οθόνη τα παρακάτω μηνύματα :

- ✓ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΙΝΗΣ ΑΡΧΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΟΥΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ DATAM
- ✓ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ DATAKM
- ✓ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΣΥΝΔΕΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ
- ✓ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΔΟΚΩΝ
- ✓ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΣΥΝΔΕΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Αμέσως μετά, φτάνουμε στη διαδικασία τροποποίησης των συντελεστών **a<sub>cd</sub>** , εκτελείται στη περίπτωση που απαιτείται από τους κανονισμούς να γίνει έλεγχος αποφυγής σχηματισμού μηχανισμού ορόφου (Παρ. 4.1.4.1 , 4.1.4.1 ΕΑΚ 2000) . Μέσω της εντολής αυτής δίνεται η δυνατότητα τροποποίησης μέγιστης τιμής των συντελεστών **a<sub>cd</sub>** . Οι συντελεστές **a<sub>cd</sub>** και **γ<sub>i</sub>** αφορούν στους Ελληνικούς Κανονισμούς, ενώ οι δυναμικοί συντελεστές **ω** αφορούν στους Κυπριακούς Κώδικες και τον Ευροκώδικα 8. Ωστόσο ,ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται Ελληνικοί Κανονισμοί θα πρέπει να ελέγχονται οι πίνακες των δυναμικών συντελεστών ,γιατί τυχόν λανθασμένες τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλμα.

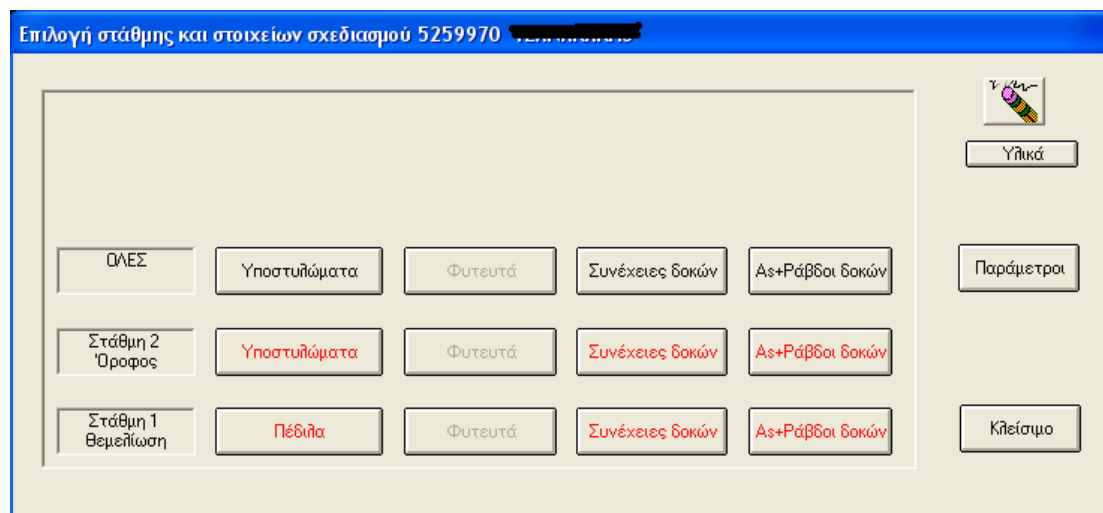
Στη συγκεκριμένη εργασία οι συντελεστές  $a_{CDX_{max}}$ ,  $a_{CDY_{max}}$ , που αφορούν τα υποστυλώματα μεταβλήθηκαν όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα, και έχουν σχετικά χαμηλή τιμή, εφόσον πρόκειται για ισόγεια κατοικία :

A/A	$a_{CDX_{max}}$	$a_{CDY_{max}}$	$γ_{rd}$	$a_{CD'_{min}}$	$M > a_{CD} \times Mec$ $a_{CD'_{min}}$
1	3.5	3.5	1.4	1	1
2	3.5	3.5	1.4	1	1
3	3.5	3.5	1.4	1	1
4	3.5	3.5	1.4	1	1
5	3.5	3.5	1.4	1	1
6	3.5	3.5	1.4	1	1
7	3.5	3.5	1.4	1	1
8	3.5	3.5	1.4	1	1
9	3.5	3.5	1.4	1	1
10	3.5	3.5	1.4	1	1
11	3.5	3.5	1.4	1	1
12	3.5	3.5	1.4	1	1
13	3.5	3.5	1.4	1	1

Φτάνουμε τελικά στο σημείο του **Σχεδιασμού** (είναι αναγκαίο να έχει προηγηθεί η Δημιουργία DATA που αναφέρθηκε προηγουμένως). Η διαδικασία διαστασιολόγησης των στοιχείων του φορέα πραγματοποιείται κάνοντας χρήση των εντατικών μεγεθών που προέκυψαν από την επίλυση του Χωρικού Πλαισίου και λαμβάνοντας υπόψη τις επιλογές και τις ρυθμίσεις που έχουν γίνει στο Αρχείο Υλικών. Η σωστή πορεία που πρέπει να ακολουθείται κατά το Σχεδιασμό είναι η ακόλουθη και πάντα από την ανώτερη προς την κατώτερη στάθμη :

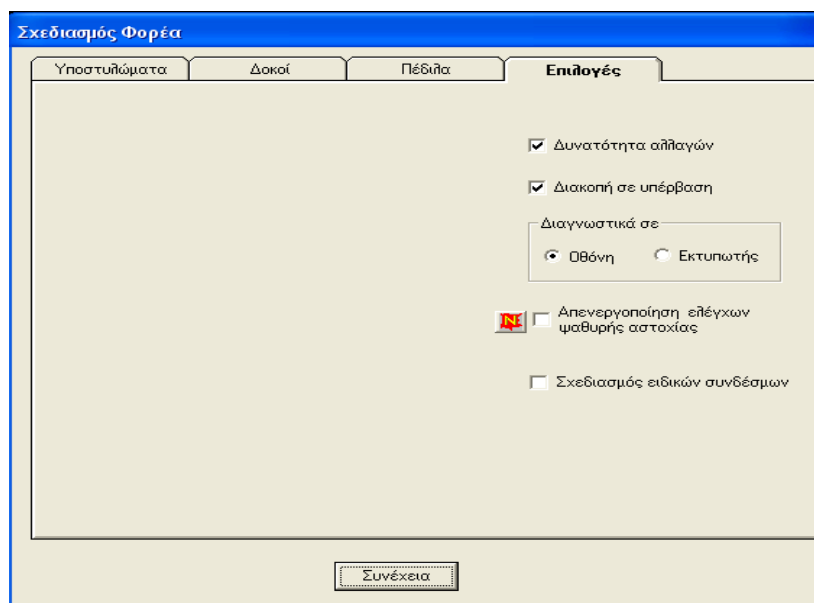
1. Συνέχειες Δοκών
2. As+ Ράβδοι
3. Υποστυλώματα

Δίνοντας στο σύστημα την εντολή για το Σχεδιασμό, όπως φαίνεται και παρακάτω, μπορούμε να επεξεργαστούμε κάθε μια στάθμη χωρία ή και **ΟΛΕΣ** μαζί.



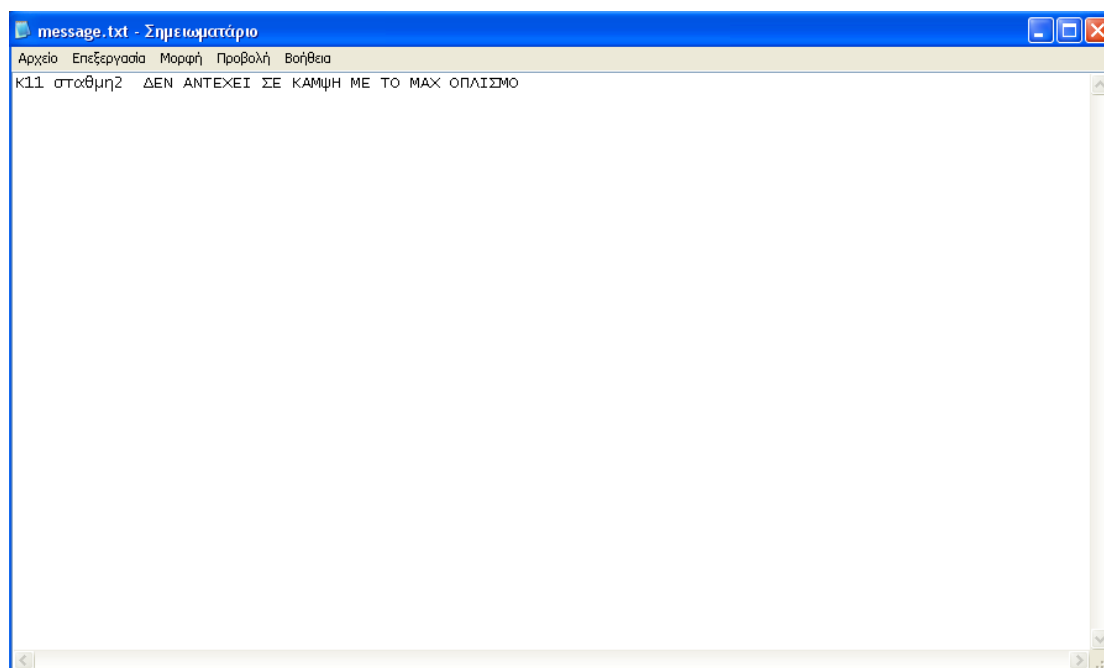
Ξεκινάμε ελέγχοντας τις Συνέχειες Δοκών, δηλαδή τις Σ . Δ που θα μας εμφανίσει αμέσως μόλις το επιλέξουμε, με τις Σ . Δ που έχουμε σημειώσει νωρίτερα. Την ενέργεια αυτή θα την πραγματοποιήσουμε είτε από την επιλογή όλες είτε, εφόσον πρόκειται για ισόγεια κατοικία, απευθείας από την στάθμη 2. Από την εντολή Παράμετροι ξετσεκάρουμε τις επιλογές Δυνατότητα αλλαγών και τη Διακοπή σε

υπέρβαση έτσι ώστε μόνο στο τέλος να μας εμφανίσει τις αδυναμίες του οπλισμού των δοκών και όχι κατά τη διάρκεια.

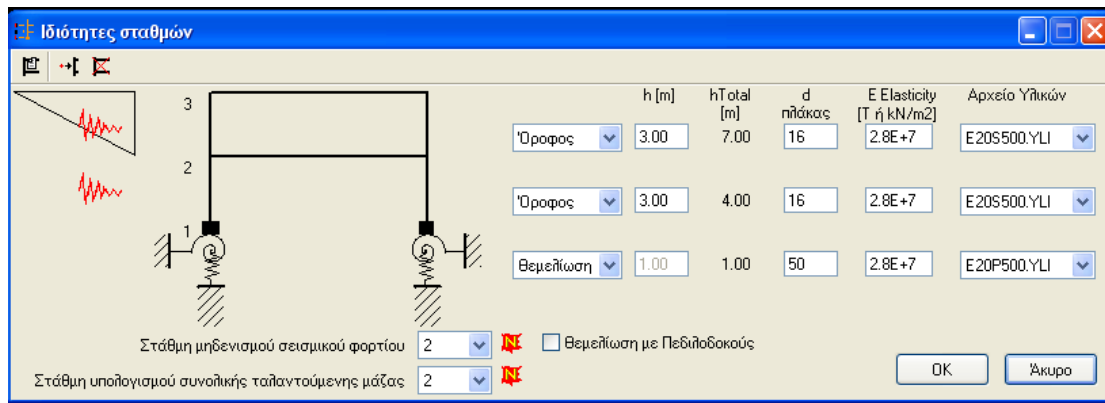


Οπότε σε αυτό το στάδιο πατάμε **Συνέχεια** → **Συνέχεια** → **Κλείσιμο** και αμέσως μετά εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου στο οποίο περιγράφονται αναλυτικά τι και που παρουσιάζουν αδυναμίες οι δοκοί.

Εφόσον τελειώσαμε με τις δοκούς και διορθώσαμε και τα τυχόν προβλήματα, συνεχίζουμε με τα υποστυλώματα. Ξεσεκάρωντας λοιπόν ξανά τις επιλογές που φαίνονται στη παραπάνω εικόνα, επιλέγουμε από το πλαίσιο διαλόγου του Σχεδιασμού την εντολή **Υποστυλώματα** → (**Μόνο τα Μαρκαρισμένα**) **ΟΧΙ** → **Κλείσιμο** και σε περίπτωση που κάποιο υποστύλωμα από τα ορισμένα έχει πρόβλημα θα μας το εμφανίσει σε ένα παραθυράκι όπως το παρακάτω.

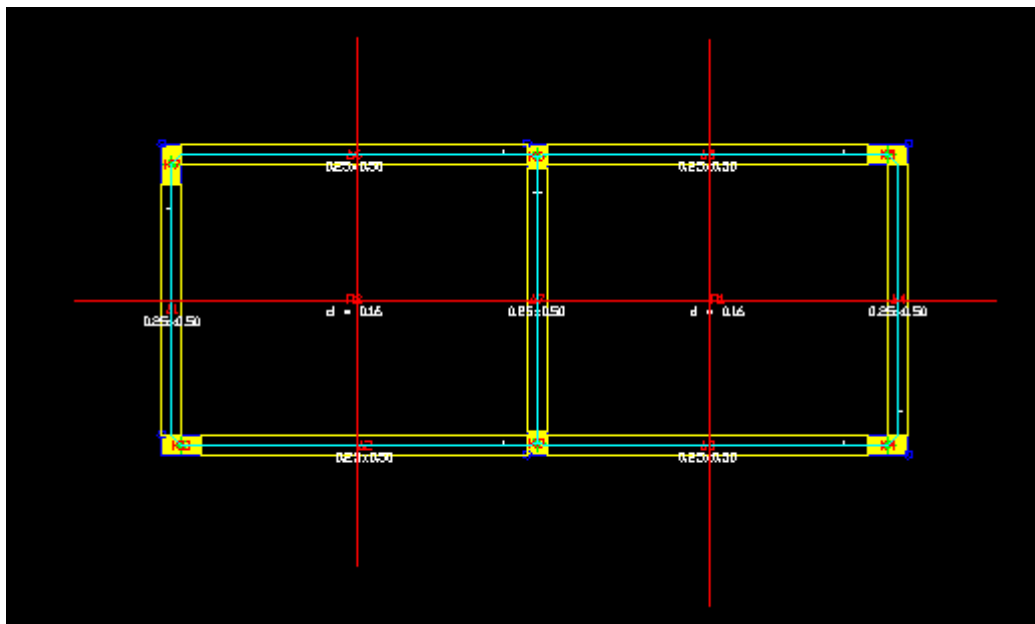


Εφόσον έχουμε ολοκληρώσει όλα τα βήματα και φτάνουμε στο Σχεδιασμό χωρίς να έχουν παρουσιαστεί προβλήματα, η επίλυση των στατικών αυτής της κατασκευής έχει ολοκληρωθεί. Ξεκινάμε τώρα να δουλεύουμε από την αρχή για μια νέα μελέτη (τη προσθήκη). Ανοίγουμε λοιπόν ξανά το Vkttools βρίσκουμε τη μελέτη που ολοκληρώσαμε προηγουμένως (π.χ 801BLD) και κάνουμε αντιγραφή με νέο όνομα. Οπότε έχουμε το αρχείο της επέκτασης έτοιμο να το δουλέψουμε στο strad. Ανοίγουμε λοιπόν το στατικό πρόγραμμα και ξεκινάμε ανοίγοντας τη νέα μελέτη που δημιουργήσαμε προηγουμένως. Η προηγούμενη μελέτη όμως επρόκειτο για ισόγεια κατοικία, άρα υπάρχουν 2 στάθμες (θεμελίωση, ισόγειο). Εφόσον επιθυμούμε να κάνουμε εν μέρει προσθήκη ορόφου, χρειαζόμαστε 3 στάθμες (θεμελίωση, ισόγειο, όροφος). Σε αυτή τη περίπτωση, χρειάζεται να κάνουμε προσθήκη στάθμης στη μελέτη. Δηλαδή η μελέτη μας θα διαμορφωθεί ως εξής.



Οδηγούμαστε λοιπόν στη στάθμη No 2 και κάνουμε **Αντιγραφή στην επόμενη στάθμη** τις 6 κολώνες που υπάρχουν στο Νότιο τμήμα του κτιρίου μας. Ξεκινάμε λοιπόν διαμορφώνοντας τη νέα αυτή στάθμη, επεξεργαζόμαστε τα υποστυλώματα, τοποθετήσαμε τα δοκάρια και σημειώσαμε τις συνέχειες τους και κάναμε αναγνώριση των πλακών. Στη συνέχεια ακολουθήσαμε όλη τη πορεία που περιγράψαμε προηγουμένως από την **Επίλυση πλακών** μέχρι και το **Σχεδιασμό** για τη συνολική επίλυση του **Μοντέλου**.

Το στατικό προσομοίωμα της προσθήκης που πραγματοποιήσαμε θα είναι η εξής :



Τα φορτία της πλάκας , του πριν δώματος και τώρα ορόφου, μεταβλήθηκαν. Με τη προσθήκη ορόφου, το οπλισμένο σκυρόδεμα και οι τοιχοποιίες που χρησιμοποιήθηκαν, επιβάρυναν την προηγούμενη στάθμη ( +4,00 μ.) στο Νότιο τμήμα της κατασκευής. Επίσης το βόρειο τμήμα του κτιρίου, επειδή θα πραγματοποιηθεί χώρος συναθροίσεως – BAR, θα χρειαστεί μια μεταβολή των κινητών φορτίων του τμήματος. Τα κινητά φορτία λοιπόν, θα αυξηθούν από 2000 N/m<sup>2</sup> σε 20000 N/m<sup>2</sup>. Εφόσον ακολουθήσουμε τη πορεία επίλυσης από την αρχή ,όπως περιγράφηκε παραπάνω, για τη διαμόρφωση της 3<sup>ης</sup> στάθμης.

Όταν φτάσαμε στο **Σχεδιασμό** παρουσιάστηκαν τα εξής προβλήματα :

```

message.txt - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια

Ανοιγμα 1ποσοστό οπλισμού ω= .6338348>max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων δοκού (Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .5833749 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 1(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .793227 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 2(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν βρέθηκε συνδυασμός οπλισμών να καλύπτει το Asαπαιτ.( 18.39883) -B(-5)(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν προσδιορίστηκε οπλισμός στη στήριξη 2(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν βρέθηκε συνδυασμός οπλισμών να καλύπτει το Asαπαιτ.( 16.36183) -B(-5)(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν προσδιορίστηκε οπλισμός στη στήριξη 2(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ακτίνα αγκύρωσης κάτω ραβδού ανοιγματος= 18cm (lβmin= 26)> πλάτους στήριξης K 3= 25(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ακτίνα αγκύρωσης άνω ραβδού ανοιγματος= 18cm (lβmin= 35) > πλάτους στήριξης K 3= 25(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Στο άνοιγμα 1 για έλεγχο πέλματος ο απαιτούμενος οπλισμός πλάκας (εγκόρσια στην δοκό) σε m2 τρέχων μέτρ
Fd=(A1/Atot) x M / (0.87xD)= .4573408 x 427.755 / .40889998962879 av= 1.798999 vsd= 266.0583
vrd2 = 0.2 x ( 20 x .85 / 1.5 x 1000!) x .16= 362.6667
vrd3= .0003 x ( 500 / 1.15 x 1000) + 2.5 x ( 20 / 100 + .06) x 1000) x .16= 234.4348(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Διωνυστικό διαίτησης vsd/vrdmax + Tsd/Trdmax > 1 στο άνοιγμα 1(Σ.Δ.1 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .3824634 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 3(Σ.Δ.2 ΣΤΑΘΜΗ 2)

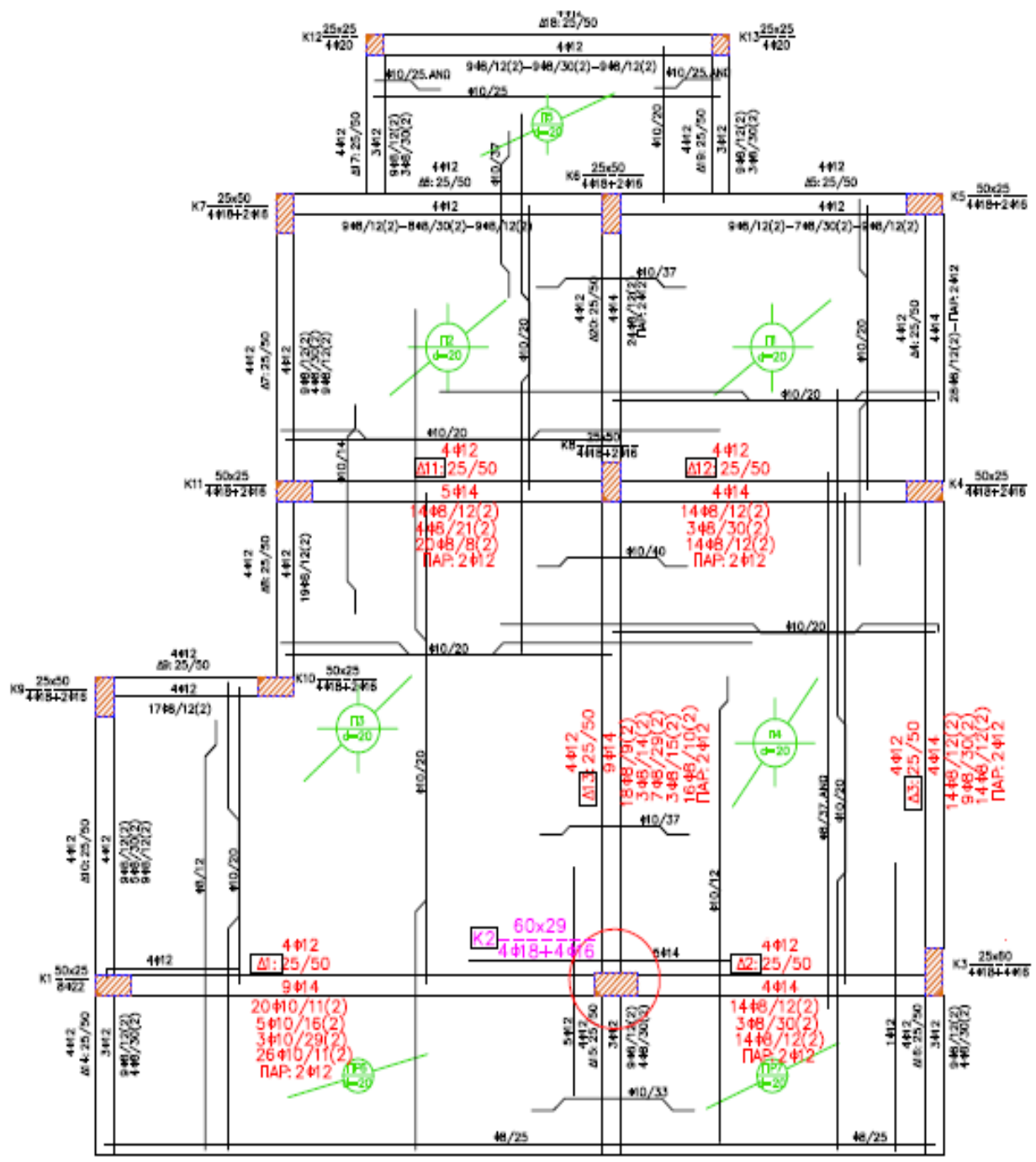
Στο άνοιγμα 2 για έλεγχο πέλματος ο απαιτούμενος οπλισμός πλάκας (εγκόρσια στην δοκό) σε m2 τρέχων μέτρ
Fd=(A1/Atot) x M / (0.87xD)= .7063728 x 119.79 / .40889998962879 av= .6160023 vsd= 336.03
vrd2 = 0.2 x ( 20 x .85 / 1.5 x 1000!) x .16= 362.6667
vrd3= .0003 x ( 500 / 1.15 x 1000) + 2.5 x ( 20 / 100 + .06) x 1000) x .16= 234.4348(Σ.Δ.4 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ακτίνα αγκύρωσης κάτω ραβδού ανοιγματος= 18cm (lβmin= 26)> πλάτους στήριξης K 9= 25(Σ.Δ.5 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ακτίνα αγκύρωσης άνω ραβδού ανοιγματος= 18cm (lβmin= 35) > πλάτους στήριξης K 9= 25(Σ.Δ.5 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .4391903 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 1(Σ.Δ.7 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .6610497 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 3(Σ.Δ.7 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Διωνυστικό διαίτησης vsd/vrdmax + Tsd/Trdmax > 1 στο άνοιγμα 2(Σ.Δ.7 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ανοιγμα 2ποσοστό οπλισμού ω= .6068245>max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων δοκού (Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .7747759 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 2(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν βρέθηκε συνδυασμός οπλισμών να καλύπτει το Asαπαιτ.( 17.76952) -B(-6)(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν προσδιορίστηκε οπλισμός στη στήριξη 2(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν βρέθηκε συνδυασμός οπλισμών να καλύπτει το Asαπαιτ.( 14.06335) -B(-6)(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν προσδιορίστηκε οπλισμός στη στήριξη 2(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Ποσοστό οπλισμού ω= .6636667 > max αρχείου υλικών, απαιτείται αλλαγή διαστάσεων στήριξης 3(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν βρέθηκε συνδυασμός οπλισμών να καλύπτει το Asαπαιτ.( 14.14513) -B(-5)(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)
Δεν προσδιορίστηκε οπλισμός στη στήριξη 3(Σ.Δ.8 ΣΤΑΘΜΗ 2)

```

Συνοψίζοντας, το στατικό μοντέλο, παρουσίαζε προβλήματα στα εξής δοκάρια Δ1, Δ2, Δ3, Δ11, Δ12, Δ13 και στο υποστύλωμα K2.

### 10.3. Στατική επίλυση κτιρίου με το πρόγραμμα Frp- Analysis

Στο υπάρχων κτίριο μας έπειτα απο μελέτες με το στατικό πρόγραμμα STRAD είχε ως αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η προσθήκη στο δώμα ενός επιπλέον ορόφου που προβλέπεται και είναι αναγκαίο για την σωστή λειτουργία του κέντρου διασκέδασης-bar ,διότι ο φέρων οργανισμός του κτιρίου όπως οι κολώνες και τα δοκάρια δεν αντέχουν επιπλέον καταπόνηση κυρίως απο τα κινητά αλλά και απο την επιπλέον προσθήκη μόνιμων φορτίων . Συγκεκριμένα χρειάζονται ενίσχυση τα δοκάρια Δ1 , Δ2 , Δ3, Δ11, Δ12, Δ13 και η κολώνα Κ2.





Το πρόγραμμα με το οποίο θα ασχοληθούμε στην ενότητα των ενισχύσεων είναι της εταιρίας Sika και ονομάζεται Frp-analysis .Θα ενισχύσουμε το φέρων οργανισμό του υπάρχων κτιρίου που είναι αναγκαίο ώστε να μην υπάρξει αστοχία μελλοντικά , με ινοπλισμένα πολυμερή - Frp. Το πακέτο λογισμικού Frp- analysis είναι απλό και αξιόπιστο εργαλείο σχεδιασμού για την επιλογή των ινοπλισμένων πολυμερών. Το πρόγραμμα αυτό μας παρέχει τη δυνατότητα για καμπτική ενίσχυση , διατμητική ενίσχυση και ενίσχυση μέσω περισφιγξης . Ουσιαστικά, το λογισμικό χωρίζεται σε δύο διαδικασίες. Η πρώτη σχετίζεται με τους ορισμούς των δεδομένων εισόδου, τις επιλογές λύσεων και τις επιλογές εκτύπωσης, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, την επιλογή του κατάλληλου αριθμού των λωρίδων Frp ή στρωμάτων και εκτύπωση των πληροφοριών.



Όταν ξεκινήσει το πρόγραμμα, ο χρήστης καλείται να "Εισάγει δεδομένα" για μία από τις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις : καμπτική ενίσχυση , διατμητική ενίσχυση ή την περισφιγξη. Όταν όλα τα δεδομένα παρέχονται, ο χρήστης μπορεί είτε να προχωρήσει στην "Λύση" ή μπορεί να αρχικοποιήσει τις παραμέτρους εισόδου μέσω της επιλογής "Νέας Εισόδου". Κατά τη διαδικασία εισαγωγής δεδομένων, το πρόγραμμα ελέγχει την εγκυρότητα των παραμέτρων εισόδου και παρέχει προειδοποιήσεις εφόσον λαμβάνονται λανθασμένες ενέργειες. Μέσα από μια σειρά "Επιλογές", ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τρόπους εκτύπωσης που σχετίζονται με τις πληροφορίες, ή ακόμη και να αλλάξετε τις προεπιλεγμένες τιμές για τους συντελεστές ασφαλείας του σύνθετου υλικού. Πατώντας το κουμπί "Λύση", που είναι η "καρδιά" του προγράμματος, η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων ενεργοποιείται. Όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί, τα αποτελέσματα που παρέχονται από την άποψη του προγράμματος της Sika είναι το εμβαδόν διατομής των Frp (σε περίπτωση που έχουμε καμπτική ενίσχυση) ή το ολικό πάχος των FRP ( στην περίπτωση που έχουμε διατμητική ενίσχυση ή περισφιγξη ) που απαιτείται για ένα δεδομένο πρόβλημα. Τέλος έχουμε την επιλογή να χρησιμοποιήσουμε τις διαστάσεις των πραγματικών προϊόντων FRP (π.χ. πάχος και το πλάτος των λωρίδων στην περίπτωση της καμπτικής ενίσχυσης, το πάχος κάθε στρώματος στην περίπτωση της διατμητικής ενίσχυση ή την περισφιγξη ) και το πρόγραμμα απαντά με τον υπολογισμό του αριθμού από λωρίδες ή στρωμάτων και την αντίστοιχη ικανότητα σε κάμψη, διάτμηση ή περισφιγξης τμημάτων απο οπλισμένο σκυρόδεμα.

### 10.3.1. Καμπτική ενίσχυση:

Επιλέγουμε για παράδειγμα το δοκάρι Δ13 που βάσει το στατικό μας πρόγραμμα έχει αναφερθεί ότι χρειάζεται ενίσχυση. Για την καμπτική ενίσχυση απαιτούνται αρχικά κάποια δεδομένα εισόδου :

#### Τύπος Διατομής :

Η επιλογή "T-beam" αφορά σχήματα για T διατομές και η "Rectangular beam» για ορθογώνια τμήματα. Η τελευταία επιλογή αφορά επίσης τμήματα πλάκας. Εμείς επιλέγουμε τον τυπο διατομής "T-beam" για το Δ13.

#### Γεωμετρία τμήματος :

Πλάτος b: το πλάτος διατομής σε m.

Ύψος h: το ύψος διατομής σε m.

Πλάτος beff : αφορά το συνεργαζόμενο πλάτος σε m (μόνο στην περίπτωση του T-δοκών).

Πάχος hf: το πάχος της πλάκας σε m (μόνο στην περίπτωση του T-δοκών).

#### Σκυροδέμα :

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη είτε να επιλέξει την κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος (εφόσον είναι γνωστή) ή να εισάγει τη μέση δύναμη ( $f_{cm}$ ) σε N/mm<sup>2</sup>. Η υποθετική σχέση μεταξύ των δύο είναι:  $f_{ck} = f_{cm} - 1,64 \times 5$ . Η κατηγορία σκυροδέματος του Δ13 είναι γνωστή και επιλέγουμε το C20/25. Επιπλέον, ο χρήστης έχει την επιλογή να εισάγει το συντελεστή ερπυσμού (εκτιμάται σύμφωνα με τον EC2) . Θεωρείται στο πρόγραμμα σαν προεπιλεγμένη τιμή του συντελεστή ερπυσμού  $\phi = 2,5$  .

The screenshot shows the FRP-Analysis software interface. The main window is titled "FRP-Analysis" and has three tabs: "FLEXURAL STRENGTHENING", "SHEAR STRENGTHENING", and "CONFINEMENT". The "FLEXURAL STRENGTHENING" tab is active. On the left, there is a "Data Input" section with a diagram of a T-beam cross-section showing dimensions:  $b_{eff}$ ,  $d_2$ ,  $h$ ,  $h_f$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{11}$ ,  $b$ , and  $A_f$ . Below the diagram, there are options for "Type of Cross Section" (T-beam selected) and "Cross Section Geometry" (Width  $b = 0,25$  m, Effective width  $b_{eff} = 1,09$  m, Height  $h = 0,50$  m, Slab thickness  $h_f = 0,20$  m). The right side of the interface contains input fields for "Concrete" (Strength class C 20/25,  $f_{cm} = 28,20$  N/mm<sup>2</sup>, Creep coefficient  $\phi = 2,5$ ), "Composite Materials" (Elastic modulus  $E_f = 165$  kN/mm<sup>2</sup>, Limiting strain  $\epsilon_{f,lim} = 0,008$ ), and "Steel Reinforcement" (Elastic modulus  $E_s = 200$  kN/mm<sup>2</sup>, Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>, Top  $A_{s2} = 452,16$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_2 = 0,04$  m, Bottom  $A_{s12} = 615,44$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{12} = 0,09$  m, Bottom  $A_{s11} = 769,3$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{11} = 0,04$  m). The "Bending Moments" section shows: Bending moment during strengthening  $M_0 = 83,23$  kNm, Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 250$  kNm, Acting moment - Rare load  $M_{ser,r} = 0$  kNm, and Acting moment - Quasi-permanent load  $M_{ser,q-p} = 0$  kNm. At the bottom, there are buttons for "About...", "Exit", "Options", "Help", "Open", "Save", "Solution", and "New Input". The Sika CarboDur logo is also present. The status bar at the bottom shows "Project:", "Name:", "Company:", "12/12/2012", and "11:00 α".

## **Σύνθετα Υλικά :**

Πατώντας το κουμπί "Ιδιότητες Sika CarboDur", εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων ινοπλισμένων πολυμερών απο ανθρακόνημα που διατίθενται απο τη εταιρία Sika και διαλέγεις βάση τις ανάγκες της κατασκευής .

Ελαστικότητα Ef: Εισάγουμε το μέτρο ελαστικότητας των  $F_{pr}$  σε  $\text{KN/mm}^2$  (που παρέχονται από τον κατασκευαστή του υλικού).

Ένταση ef, lim: Εισάγουμε την τάση των  $F_{pr}$  . Πέρα από αυτή την τιμή, μπορεί να υπάρξει αποκόλληση των  $F_{pr}$  στους τομείς των υψηλών ροπών κάμψης (καμπτικές ρωγμές). Προτεινόμενη (προεπιλογή) τιμή  $ef, lim = 0,008$ .

## **Ενίσχυση χάλυβα :**

Ελαστικότητα Es: Εισάγουμε το μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους οπλισμού σε  $\text{kN/mm}^2$ . Η προεπιλεγμένη τιμή είναι  $200 \text{ kN/mm}^2$ .

Χαρακτηριστικό  $f_{yk}$ : Τάση διαρροής του διαμήκους οπλισμού σε  $\text{N/mm}^2$ , π.χ. 500 για χάλυβα S500.

$A_{s2}$ : Το συνολικό εμβαδόν διατομής του χαλύβδινου οπλισμού στη ζώνη συμπίεσης (αν υπάρχει) σε  $\text{mm}^2$  .

Απόσταση  $d_2$ : Η επικάλυψη του χαλύβδινου οπλισμού  $A_{s2}$  σε m.

$A_{s12}$ : Το συνολικό εμβαδόν διατομής του δεύτερου στρώματος (εάν υπάρχει) του οπλισμού στη ζώνη τάσεως σε  $\text{mm}^2$ .

Απόσταση  $d_{12}$ : Η απόσταση από το κεντροειδές της  $A_{s12}$  στην ακραία ίνα εφελκυσμού της διατομής σε m.

$A_{s11}$ : Το συνολικό εμβαδόν διατομής του πρώτου στρώματος του οπλισμού στη ζώνη τάσεως σε  $\text{mm}^2$ .

Απόσταση  $d_{11}$ : Η απόσταση από το κεντροειδές της  $A_{s11}$  στην ακραία ίνα εφελκυσμού της διατομής σε m.

## **Στιγμές κάμψης :**

Ροπή κάμψης  $M_o$ : Εισάγουμε τη ροπή κάμψης που εφαρμόζεται στην διατομή κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης, που είναι η στιγμή που αναπτύσσεται (π.χ. λόγω φορτία βαρύτητας) σε  $\text{KNm}$ . Στο παραδειγμά μας βάση του στατικού προγράμματος STRAD το  $M_o = 83,23 \text{ KNm}$  για το Δ13.

Ροπή σχεδιασμού  $M_{sd}$ : Εισάγουμε τη τιμή σχεδιασμού της αντίστασης ροπής κάμψης μετά την ενίσχυση σε  $\text{KNm}$ , για την επαλήθευση. Η τιμή αυτή είναι η μικρότερη δυνατή ώστε να μην εμφανιστεί το φαινόμενο της αστοχίας μετά την ενίσχυση στο δομικό στοιχείο μας.

Ροπή  $M_{ser,r}$ : Είναι η ροπή κάμψης που ενεργοποιείται στο κρίσιμο τμήμα (σταυρό), λόγω του σπάνιου συνδυασμού φορτίου της οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σε  $\text{KNm}$ . Εμείς το πήραμε  $M_{ser,r} = 0 \text{ KNm}$  διότι έτσι μας είπε ο τεχνικός της Sika.

Ροπή  $M_{ser,q}$ : Είναι η ροπή κάμψης που ενεργείται στην κρίσιμη διατομή λόγω του μόνιμου συνδυασμού φορτίων του στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σε  $\text{KNm}$ . Εμείς το πήραμε  $M_{ser,q} = 0 \text{ KNm}$  διότι έτσι μας είπε ο τεχνικός της Sika.

Είσαγουμε όλα αυτά τα απαραίτητα στοιχεία για κάθε ένα δοκάρι που επιλύουμε και συνεχίζουμε πατώντας τη "Λύση".

## Αποτελέσματα :

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας , εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο .

**Flexural Strengthening - Results**

**Ultimate Limit State**

Resisting design moment before strengthening	$M_{rd,o} = 249,06$ [kNm]
Required FRP cross section for ULS	$A_f = 6,22$ [mm <sup>2</sup> ]
Resisting design moment after strengthening	$M_{rd} = 250,08$ [kNm]
Degree of strengthening	$\frac{M_{rd}}{M_{rd,o}} = 1,004$

**Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load**

Moment capacity before strengthening	$M_{ser,q-p,o} = 200,41$ [kNm]
Required FRP cross section for SLS	$A_f = 0,00$ [mm <sup>2</sup> ]
Moment capacity	$M_{ser,q-p} = 276,12$ [kNm]
Steel stress	$f_{s11} = 500,00 > 0,8 \times f_{yk} = 400,00$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Concrete stress	$\sigma_c = 9,00 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00$ [N/mm <sup>2</sup> ]

**Serviceability Limit State - Rare Load**

Moment capacity before strengthening	$M_{ser,r,o} = 211,58$ [kNm]
Required FRP cross section for SLS	$A_f = 0,00$ [mm <sup>2</sup> ]
Moment capacity	$M_{ser,r} = 280,62$ [kNm]
Steel stress	$f_{s11} = 500,00 > 0,8 \times f_{yk} = 400,00$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Concrete stress	$\sigma_c = 12,00 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00$ [N/mm <sup>2</sup> ]

**Flexural Strengthening - Final**

Design is controlled by: Ultimate Limit State

Final required FRP cross section  $A_f = 6,22$  [mm<sup>2</sup>]

Bond check | Cross section strain profile

Print | Input of FRP dimensions

Help | Return | Exit

## Οριακή κατάσταση :

Τιμή σχεδιασμού πριν από την ενίσχυση  $M_{rd, o}$ : Η τιμή της υπολογίζεται χωρίς τη χρήση των Fpr.

Απαιτούμενα Fpr- διατομή  $A_f$ : Σύνολο του εμβαδόν διατομής των Fpr που πρέπει να προστεθεί στο πρόσωπο τάσεως με σκοπό την επαλήθευση .

Ροπή σχεδιασμού μετά ενίσχυση  $M_{rd}$ : Αυτή είναι η τιμή της αντίστασης ροπή σχεδιασμού που αντιστοιχεί στην ανωτέρω Fpr με διατομή  $A_f$ .

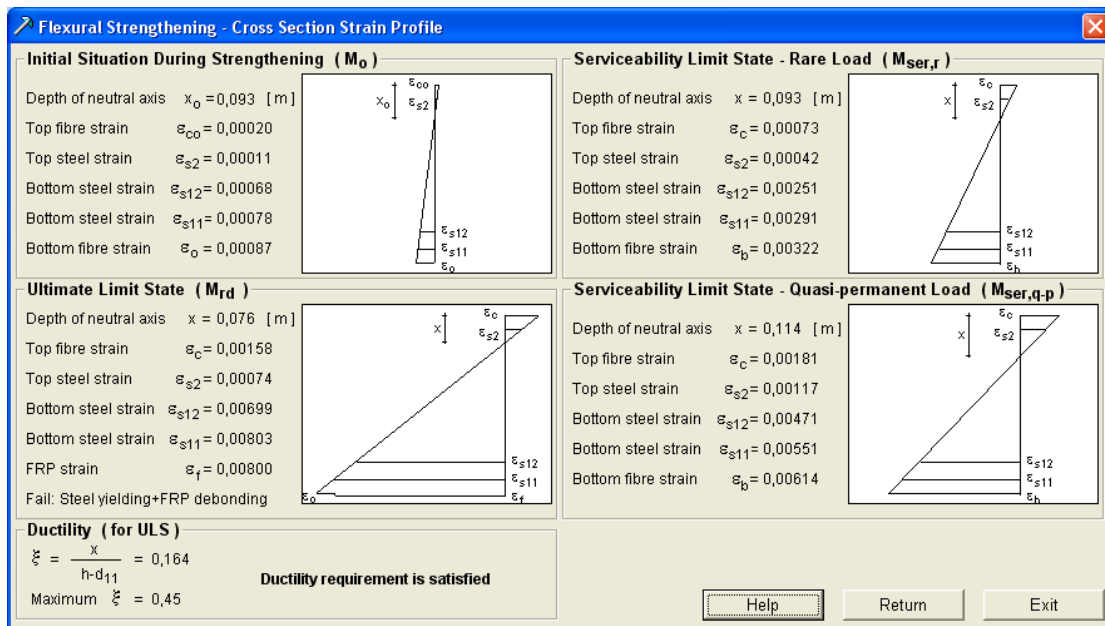
Βαθμός ενίσχυση  $M_{rd} / M_{rd, o}$ : Ο λόγος της αντίστασης του σχεδιασμού μετά την ενίσχυση με εκείνη πριν από την ενίσχυση.

## Καμπτική Ενίσχυση – Τελικό :

Τελική απαιτούμενη διατομή  $A_f$  με Fpr: Η μέγιστη από τις τρεις τιμές  $A_f$  μας παρέχεται σε αυτό το βήμα .

## Cross section strain profile:

Ενεργοποιεί ένα παράθυρο με τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης της διατομής, γραφικά και με αριθμούς.



### **Κατά τη διάρκεια της αρχικής κατάστασης (M<sub>0</sub>):**

- **Βάθος του ουδέτερου άξονα x<sub>0</sub>:** το βάθος του ουδέτερου άξονα σε m, κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης (λόγω M<sub>0</sub>).
- **Πάνω τάση ινών ε<sub>co</sub>:** αφορά την τάση στην ακραία θλίψη σκυροδέματος κατά τη διάρκεια ενίσχυση ινών (λόγω M<sub>0</sub>).
- **Η πάνω τάση του χάλυβα:** αφορά την τάση στην κορυφή οπλισμού κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης (λόγω M<sub>0</sub>).
- **Κάτω τάση του χάλυβα:** αφορά το κάτω οπλισμό χάλυβα κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης (λόγω M<sub>0</sub>).
- **Η κάτω τάση της ίνας:** αφορά την ακραία ίνα εφελκυσμού σκυροδέματος κατά την ενίσχυση (λόγω M<sub>0</sub>).

### **Οριακή κατάσταση αστοχίας (M<sub>rd</sub>):**

- **Βάθος του ουδέτερου άξονα x :** βάθος ουδέτερου άξονα σε m όταν M<sub>rd</sub> έχει επιτευχθεί.
- **Πάνω τάση ινών:** αφορά την ακραία ίνα σκυροδέματος σε θλίψη όταν M<sub>rd</sub> επιτευχθεί. Εάν αυτή η τιμή ισούται με 0.0035, συμβαίνει συμπίεστική σύνθλιψη του σκυροδέματος.
- **Πάνω τάση του χάλυβα:** αφορά την τάση στην κορυφή οπλισμού όταν M<sub>rd</sub> επιτευχθεί.
- **Κάτω τάση του χάλυβα:** αφορά το κάτω οπλισμού όταν M<sub>rd</sub> έχει επιτευχθεί.
- **Τάση των FRP:** Αν η τιμή αυτή ισούται με το περιορισμό ε<sub>f, lim</sub> (προεπιλογή = 0,008), εμφανίζεται αποκόλληση του FRP.

### **Ductility (Πλαστιμότητα ) :**

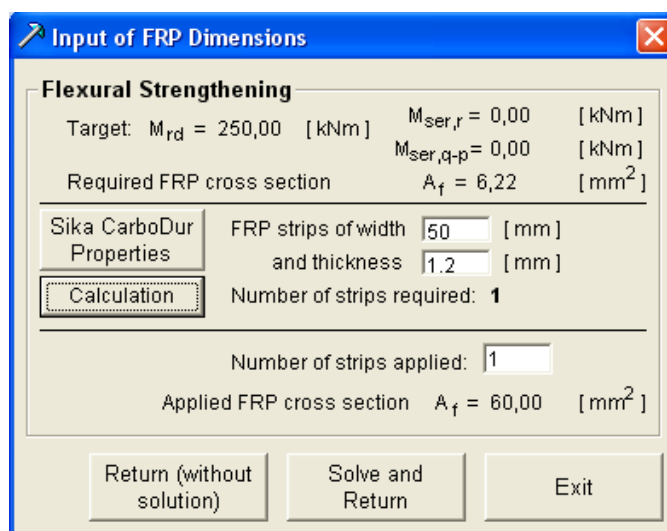
Η αναλογία βάθους του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται και συγκρίνεται με τη μέγιστη τιμή που παρέχεται από EC2. Είναι μια δήλωση που σχετίζεται με την απαίτηση της πλαστιμότητας.

### **Input of FRP dimensions :**

Ενεργοποιεί ένα παράθυρο όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις διαστάσεις (πλάτος και πάχος, σε mm) των FRP υλικών (οι τιμές αναφέρονται σε μία μόνο λωρίδα) που θα χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο έργο ενδυνάμωση.

Κάνοντας κλικ στο κουμπί «ιδιότητες Sika CarboDur», εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων συστημάτων CarboDur που προβλέπονται από την εταιρία Sika.

Πατώντας «Υπολογισμός», υπολογίζεται ο αριθμός των λωρίδων που απαιτούνται στην αντίστοιχη περιοχή FRP (τελική διατομή) .



### **Solve and return:**

Το παράθυρο "Αποτελέσματα" ενεργοποιείται με ενημερωμένες πληροφορίες, με βάση τη νέα εφαρμοσμένη διατομή των FRP.

### **Bond Check:**

Όταν ο χρήστης έχει επιλέξει το FRP, διαστάσεις και τον αριθμό των ταινιών (n), αυτό το κουμπί ενεργοποιεί ένα παράθυρο, όπου εκτελείται ο έλεγχος .

**Flexural Strengthening - Bond Check**

**Data Input**

**Section's Properties**

Substrate tensile strength  $f_{ctm} = 2,21$  [ N/mm<sup>2</sup> ]

Design moment at section A  $M_{sd,A} = 165,81$  [ kNm ]

**Steel Reinforcement at Section A**

Elastic modulus  $E_s = 200$  [ kN/mm<sup>2</sup> ]

Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500$  [ N/mm<sup>2</sup> ]

Top  $A_{s2} = 452,16$  [ mm<sup>2</sup> ] at distance  $d_2 = 0,04$  [ m ]

Bottom  $A_{s12} = 615,44$  [ mm<sup>2</sup> ] at distance  $d_{12} = 0,09$  [ m ]

Bottom  $A_{s11} = 769,3$  [ mm<sup>2</sup> ] at distance  $d_{11} = 0,04$  [ m ]

**FRP Arrangement**

Total number of 1 strips is placed in 1 layers

**Bond Check**

$N_{fd,A} = 11,51 < N_{bd,max} = 16,53$  [ kN ] **Check is OK**

$l_{bd,A} = 99$  [ mm ]  $l_{bd,max} = 220$  [ mm ]

Υπόστρωμα  $f_{ctm}$  αντοχή εφελκυσμού: βάζουμε τη μέση τιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό κοντά στην επιφάνεια (σε N/mm<sup>2</sup>). Η προεπιλεγμένη τιμή υπολογίζεται με βάση την χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε θλίψη.

Ροπή σχεδιασμού στο τμήμα A  $M_{sd,A}$ : Τοποθετούμε τη ροπή κάμψης που ενεργεί στη διατομή A (σε kNm). Οι υπολογισμοί παρέχουν το απαιτούμενο μήκος δεσμού που αντιστοιχεί σε αυτή τη συγκεκριμένη διατομή, δηλαδή πόσο μακριά από αυτό το τμήμα το Frp θα πρέπει να εκτείνεται, παράλληλα με την οριζόντια μετατόπιση της ροπής κάμψης,  $a_L$  διαγράμματος.

### FRP Arrangement :

Ο συνολικός αριθμός (n) λωρίδων τοποθετείται σε m στρώματα: Ο αριθμός των λωρίδων (n) έχει υπολογιστεί από την προηγούμενη διαδικασία. Με δεδομένο τον αριθμό αυτό, μπορούμε να αποφασίσουμε τον αριθμό των στρώσεων (m). Για παράδειγμα, εάν ένα σύνολο χρειάζεται δύο λωρίδες και δεν ταιριάζουν η μία δίπλα στην άλλη, θα πρέπει να τοποθετούνται η μία στην κορυφή της άλλης, έτσι ώστε  $m = 2$ . Ο αριθμός των στρωμάτων (m) θα πρέπει να παρέχεται εδώ ως είσοδο από τον χρήστη. Σημειώνουμε ότι εάν  $m > 1$ , ο συνολικός αριθμός των λωρίδων που διαιρείται με τον αριθμό των στρωμάτων πρέπει να είναι ένας ακέραιος αριθμός, έτσι ώστε οι ταινίες να μπορούν να είναι ομοιόμορφα κατανομημένες. Δηλαδή πρέπει το αποτέλεσμα να γίνει  $n / m =$  ακέραιος.

### Calculation:

Πατώντας το κουμπί «Υπολογισμός», το πρόγραμμα προβλέπει τη συνολική δύναμη εφελκυσμού που λαμβάνετε από το Frp στο τμήμα A.  $N_{fd,A}$  είναι η αντίστοιχη τιμή της μέγιστης δύναμης που πρέπει να είναι μικρότερη από τη  $N_{bd,max}$ , έτσι ώστε να μη συμβεί αποκόλληση (αποτυχία αγκύρωσης). Αν ο έλεγχος δεν είναι εντάξει πιθανόν θα πρέπει να αυξήσουμε την διατομή των Frp (που αυτή η λύση δεν είναι τόσο πιθανό να είναι επιτυχής), και / ή να χρησιμοποιήσουμε μια μηχανική αγκύρωση στα άκρα του Frp.

### 10.3.2. Διατμητική Ενίσχυση

Επιλέγουμε για παράδειγμα το υποστύλωμα Κ2 που βάσει το στατικό μας πρόγραμμα έχει αναφερθεί ότι χρειάζεται ενίσχυση. Για την διατμητική ενίσχυση απαιτούνται αρχικά τα εξής δεδομένα εισόδου :

#### Μέθοδος :

Επιλέγουμε "Κλειστό σακάκι" ή "Άνοιχτο σακάκι", αυτό εξαρτάται από το είδος του δομικού στοιχείου του συστήματος που χρησιμοποιούμε για ενίσχυση.

Διατμητική ενίσχυση των στηλών όπου όλες οι τέσσερις πλευρές είναι προσβάσιμες είναι τυπικά του κλειστού τύπου. Επιπλέον, διατμητική ενίσχυση των δοκών-Τ με μηχανικά συστήματα αγκύρωσης που εξασφαλίζουν τη βέλτιστη στερέωση του στην ζώνη συμπίεσης, μπορεί να θεωρηθεί του κλειστού τύπου πάρα πολύ. Αυτή είναι η περίπτωση, για παράδειγμα, με τα στοιχεία CarboShear Sika, εάν υπάρχει επαρκές μήκος αγκύρωσης μέσα από την πλάκα.

#### Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά :

Β Πλάτος: Εισάγουμε το πλάτος, σε m.

Βάθος d: Είναι η απόσταση από το κεντροειδές του οπλισμού τάσεως έως την ακραία συμπιεστική ίνα, σε m.

Γωνία μεταξύ ινών και την κατεύθυνση του άξονα του μέλους : Είναι η γωνία (σε μοίρες) που σχηματίζεται μεταξύ της κύριας κατεύθυνσης ίνας  $F_{fr}$  και τον άξονα του μέλους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η γωνία είναι  $\alpha = 90$  μοίρες.

The screenshot shows the 'FRP-Analysis' software interface with the 'FLEXURAL STRENGTHENING' tab selected. The 'Data Input' section includes a 3D diagram of a rectangular concrete beam with FRP strips applied to its sides. The diagram labels the width as 'b', the static depth as 'd', and the angle between the FRP strips and the beam axis as 'α'. The software interface contains the following input fields and options:

- Concrete:** Strength class: C 20/25; Mean strength:  $f_{cm} = 28,20$  [N/mm<sup>2</sup>].
- Composite Materials:** Elastic modulus:  $E_f = 231$  [kN/mm<sup>2</sup>]; Ultimate tensile strain:  $\epsilon_{fu} = 0,017$  [-]; Limiting strain:  $\epsilon_{r,lim} = 0,006$  [-]; Type of fibres: Carbon (CFRP). A 'Sika CarboDur Properties' button is also present.
- Method of Anchorage:** Closed jacket (selected) or Open jacket.
- Cross Section Geometry:** Width:  $b = 0,3$  [m]; Static depth:  $d = 0,56$  [m]; Angle between fibres direction and member axis:  $\alpha = 90$  [degrees].
- Type of Application:** Continuous jacket (selected) with Width  $b_f = 0$  [m] and Spacing  $s_f = 0$  [m]; Discrete strips.
- Increase of Shear Capacity:** Additional shear:  $V_{fd} = 192$  [kN].

At the bottom, there are buttons for 'About ...', 'Exit', 'Options', 'Help', 'Open', 'Save', 'Solution', and 'New Input'. The status bar shows 'Project:', 'Name:', 'Company:', '13/12/2012', and '11:19 δ'.



## Σκυρόδεμα :

Έχουμε την επιλογή είτε να επιλέξουμε την κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος (εφόσον είναι γνωστή) ή να εισάγουμε την μέση αντοχή σε  $\text{N/mm}^2$ . Η υποθετική σχέση μεταξύ των δύο είναι:  $f_{ck} = f_{cm} - 1,64 \times 5$ .

## Σύνθετα Υλικά :

Κάνοντας κλικ στο κουμπί "Ιδιότητες Sika CarboDur", εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων συστημάτων CarboDur .

Ελαστικότητα  $E_f$ : Εισάγουμε το μέτρο ελαστικότητας του FRP που επιλέγουμε σε  $\text{kN/mm}^2$  (που παρέχεται από τον κατασκευαστή του υλικού).

$f_{tu}$  αντοχή σε εφελκυσμό: Εισάγουμε την απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό του FRP . Τυπικά αυτό παρέχεται από τον προμηθευτή υλικών.

Ο περιορισμός αντοχής  $\epsilon_{f,lim}$ : Εισάγουμε τον περιορισμό της αντοχής του FRP . Η υπέρβαση αυτής της τιμής θα συνεπαγόταν σημαντικές ρωγμές και, ως εκ τούτου μειωμένη συμβολή του σκυροδέματος στην διατμητική ικανότητα ως αποτέλεσμα της μειωμένης συνολικής αλληλοσύνδεσης . Προτεινόμενη (default) τιμή = 0,006.

Τύπος των ίνων: Επιλέγουμε τον τύπο των ινών για το υλικό FRP. Αυτό σχετίζεται με την ασφάλεια και τις ικανότητες που προσφέρει το υλικό, ανάλογα την περίπτωση και τις ανάγκες της εκάστοτε φοράς.

## Τύπος Εφαρμογής :

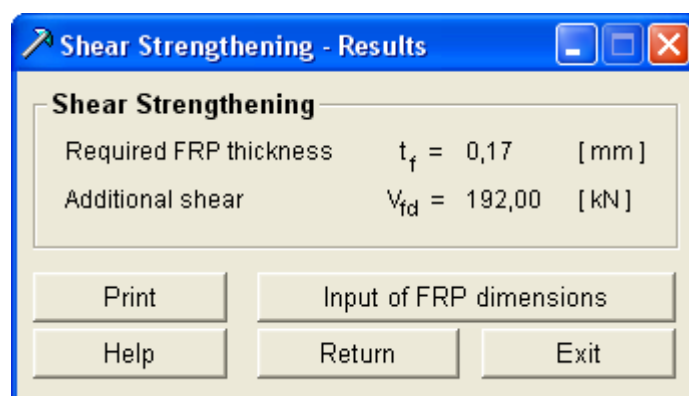
Εδώ επιλέγουμε τη χρήση συνεχούς σακακιού ή τη χρήση διακριτών λωρίδων . Στην τελευταία περίπτωση θα πρέπει να παρέχονται σε m το πλάτος και η απόσταση (άξονα προς άξονα) των λωρίδων. Η απόσταση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε μια πιθανή ρωγμή διάτμησης θα πρέπει να διασχίζει τουλάχιστον μία λωρίδα. Κατά γενικό κανόνα, έχει εγκριθεί ότι η μέγιστη απόσταση του θα πρέπει να είναι  $0,8 \cdot d$  .

## Αύξηση της διατμητική ικανότητας :

$V_{fd}$  διάτμησης: Εισάγουμε τη διατμητική δύναμη (σε kN) που μεταφέρεται από τα FRP.

## Αποτελέσματα:

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κάνουμε κλικ στο "Solution" (λύση) και εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο .



Απαιτούμενο πάχος  $t_f$  Frp: Το συνολικό πάχος του μανδύα Frp που παρέχεται.  
 $V_{fd}$  διατμήσεως : Αυτή είναι η τιμή της δύναμης που αντιστοιχεί στο μανδύα Frp με πάχος  $t_f$  . Αυτή η τιμή μπορεί να διαφέρει από αυτή που έχουμε δώσει στην είσοδο, λόγω κάποιων έκτακτων μέτρων .

### **Input of Frp dimensions:**

Ενεργοποιεί ένα παράθυρο όπου μπορούμε να εισάγουμε το πάχος (σε mm) από ένα ενιαίο στρώμα του υλικού Frp που θα χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο έργο ενδυνάμωσης. Πατώντας το κουμπί «Ιδιότητες Sika CarboDur», εμφανίζονται οι ιδιότητες των διαφόρων συστημάτων CarboDur. Κάνοντας κλικ στο κουμπί «Υπολογισμός», προσδιορίζεται ο αριθμός των στρωμάτων που απαιτούνται.

**Input of FRP Dimensions**

**Shear Strengthening**

Target:  $V_{fd} = 192,00$  [kN]

Required FRP thickness  $t_f = 0,17$  [mm]

Sika CarboDur Properties Thickness of single FRP layer:  [mm]

Calculation Number of layers required: **2**

Number of layers applied:

Applied FRP thickness  $t_f = 0,240$  [mm]

Return (without solution) Solve and Return Exit

### **Λύστε και επιστροφή :**

Το παράθυρο "Αποτελέσματα" ενεργοποιείται με ενημερωμένες πληροφορίες, με βάση το νέο πάχος των Frp. Εδώ σημειώνω ότι το πάχος των Frp ονομάζεται πλέον "εφαρμόζομενο πάχος". Η  $V_{fd}$  είναι η τιμή της διατμητικής δύναμης που αντιστοιχεί στο μανδύα Frp με το νέο πάχος  $t_f$  .

**Shear Strengthening - Results**

**Shear Strengthening**

Applied FRP thickness  $t_f = 0,24$  [mm]

Additional shear  $V_{fd} = 268,24$  [kN]

Print Input of FRP dimensions

Help Return Exit

### 10.3.3. Αποτελέσματα προγράμματος Frp-Analysis

Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου τα οποία χρειάστηκε να επέμβουμε παρουσίασαν τα εξής αποτελέσματα πριν και μετά την ενίσχυση τους με τα σύνθετα υλικά .

Κολώνα	K2	V = 137 KN	V = 268,24 KN
Δοκός	Δ1	Mo = 137,42 KNm	Mrd = 290,46 KNm
Δοκός	Δ2	Mo = 64,96 KNm	Mrd = 154,23 KNm
Δοκός	Δ3	Mo = 59,16 KNm	Mrd = 155,28 KNm
Δοκός	Δ11	Mo = 46,79 KNm	Mrd = 182,40 KNm
Δοκός	Δ12	Mo = 32,80 KNm	Mrd = 154,11 KNm
Δοκός	Δ13	Mo = 83,23 KNm	Mrd = 282,34 KNm

Τα αποτελέσματα απο την ενίσχυση των μεμονωμένων στοιχείων με ινοπλισμένα πολυμερή είναι ικανοποιητικά αφού στα περισσότερα δομικά στοιχεία παρατηρήσαμε ότι αυξήθηκε η διατμητική ή καμπτική τους αντοχή κατά 100% έως και 300% απο ότι μπορούσαν να αντέξουν χωρίς να υπάρξει κάποια ανεπιθύμητη αστοχία.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι ποσότητες των Frp που χρειάστηκαν ώστε να ενισχυθούν τα απαραίτητα στοιχεία του κτιρίου .

Δομικά Στοιχεία	Αριθμός Στρωμάτων Frp	Πάχος tf (mm)	Πλάτος bf (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας Ef (KN/mm <sup>2</sup> )
Δ1	1	1.2	50	165
Δ2	1	1.2	50	165
Δ3	1	1.2	50	165
Δ11	1	1.2	50	165
Δ12	1	1.2	50	165
Δ13	1	1.2	50	165
K2	2	0.17	-	70

#### Κοστολόγηση Ενίσχυσης :

Όπως αναφέρεται και στον πίνακα έπειτα από την επίλυση του κτιρίου με το πρόγραμμα ενίσχυσης με σύνθετα υλικά καταλήξαμε πως στα δοκάρια θα χρησιμοποιηθεί προκατασκευασμένο έλασμα της εταιρίας Sika το κατηγορίας CarboDur-S512, το οποίο έχει πάχος 1,2mm και πλάτος 5cm με επιφάνεια ενεργής διατομής 60mm<sup>2</sup>. Στο έλασμα θα χρησιμοποιηθεί αντίστοιχη ρητίνη SikaDur-30. Για αγορά των αντίστοιχων ελασμάτων, το κόστος είναι 26,50€ το μέτρο και η αντίστοιχη ρητίνη, η οποία συσκευάζεται σε 6κιλη συσκευασία και κοστολογείται 10€ το κιλό. Η αναλογία είναι 0,70kg ρητίνη ανά μέτρο υφάσματος.

Στη κολώνα θα τοποθετηθεί ύφασμα Sika Wrap Hex- 230C, το οποίο έχει πάχος 0.12mm και 60cm πλάτος. Το ύφασμα χρεώνεται 22,30€ το μέτρο, δηλαδή το κομμάτι 1\*0,60 και η αντίστοιχη ρητίνη υπάρχει στην αγορά σε 5κιλη συσκευασία, η οποία κοστίζει 20€ το κιλό. Η αναλογία υφάσματος και ρητίνης είναι 1kg το μέτρο.

Το υποσύλωμα έχει καθαρό ύψος 3,80 καθαρό, οπότε τοποθετούμε τις στρώσεις υφάσματος καθ' ύψος. Για να επενδυθεί ολόκληρη η κολώνα χρειάζονται 8 στρώσεις υφάσματος, οι οποίες τοποθετούνται η μία 10-12cm πάνω στη προηγούμενη στρώση.

Θα πρέπει να προστεθούν ακόμα 2 μέτρα υφάσματος για τις αγκυρώσεις των ελασμάτων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην ενίσχυση των δοκαριών.

FRP							Ρητίνες			
	<i>m</i>	<i>τιμή μέτρου</i>	<i>κόστος FRP</i>	<i>kg/m</i>	<i>στρ. ρητινης</i>	<i>kg ρητίνη</i>	<i>συσκευασία</i>	<i>kg συσκευασίας</i>	<i>σύνολο kg</i>	<i>κόστος</i>
Δ1	6,42	26,5	170,13	0,7	1	4,494				
Δ2	3,98	26,5	105,47	0,7	1	2,786				
Δ3	5,60	26,5	148,4	0,7	1	3,92				
Δ11	4,02	26,5	106,53	0,7	1	2,814				
Δ12	3,98	26,5	105,47	0,7	1	2,786				
Δ13	5,90	26,5	156,35	0,7	1	4,13				
συνολο			<b>792,35 €</b>			20,93	4	6	24	<b>240,00 €</b>
K2	2,00	22,3	44,6	1	2	4	1	5	5	100,00 €
στρ. 8	16	22,3	356,8	1	2	32	7	5	20	<b>700,00 €</b>
αγκυρώσεις	2,00	22,3	44,6							
			<b>446,00 €</b>							

Αναλυτικά εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα τα δομικά στοιχεία και τα αντίστοιχα κόστη ενίσχυσης τους. Συνολικά το κόστος αυτών είναι 2.178,35 €.

Στο Παράρτημα Γ βρίσκονται τα αποτελέσματα αναλυτικά βάση του προγράμματος Frp-analysis που αφορούν την ποσότητα των Frp τα οποία είναι αναγκαία για την ενίσχυση του κτιρίου, καθώς και τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη που θα αποκτηθούν από την ενίσχυση .

## 11. Συμπεράσματα

Τα σύνθετα υλικά που σήμερα χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, γνωστά και ως Fiber Reinforced Polymers (FRP) – Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) αποτελούνται από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με “θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη” της οποίας τα χαρακτηριστικά δεν είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες κάτω των 60 °C . Οι συνήθεις τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι από γυαλί ή αραμίδιο ή άνθρακα με πολύ μικρή διάμετρο, της τάξης των 5-25 μm. Έχουν μικρό βάρος, εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή, υψηλή αντοχή σε διάβρωση και δεν επηρεάζονται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Σε αντίθεση με ό, τι συμβαίνει στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα, στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP υπάρχουν δύο τύποι αστοχίας, η διάρρηξη του οπλισμού FRP και ο θρυμματισμός σκυροδέματος. Τελικά, ενώ οι οικονομικές απαιτήσεις δείχνουν προτίμηση στον πρώτο τύπο αστοχίας, δηλαδή στη διάρρηξη του οπλισμού, οι απαιτήσεις λειτουργικότητας και πλαστιμότητας του δομικού στοιχείου ακυρώνουν μία τέτοια επιλογή.

Όμως δύο είναι παράγοντες που προκαλούν την υπολειτουργία των ενισχύσεων από ινοπλισμένα πολυμερή, το φαινόμενο της αποκόλλησης και της ανεπαρκούς αγκύρωσης .Συνήθως το φαινόμενο της ανεπαρκούς αγκύρωσης έρχεται δεύτερο σε σχέση με την αποκόλληση των σύνθετων υλικών. Αυτό οφείλεται στην κακή γνώση των θεμάτων ανάμεσα στη συνεργασία του υποβάθρου και ινοπλισμένου πολυμερούς .Το φαινόμενο αυτό μπορούμε να το αντιμετωπίσουμε με τη δημιουργία ενός ισχυρού δεσμού, ο οποίος εξασφαλίζεται μέσω της συγκολλητικής ύλης μεταξύ του οπλισμού και της υποκείμενης επιφάνειας. Η συνεργασία τους αυτή είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης ή επισκευής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σημαντική αντοχή σε βάθος χρόνου ενώ είναι ανθεκτικά απέναντι σε πολλούς από τους συνηθισμένους διαβρωτικούς παράγοντες όπως το νερό και η υγρασία. Παράλληλα παρουσιάζουν σημαντική ανθεκτικότητα έναντι κόπωσης, ερπυσμό και κρουστικών καταπονήσεων . Ωστόσο η υπεριώδη ακτινοβολία είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα που δεν συμβαδίζει με το χρόνο καθώς επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στην μήτρα των σύνθετων υλικών που εκτίθενται σε αυτή με το χρόνο. Ως μέθοδος προστασίας από τον ήλιο συνίσταται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV εξωτερικών βαφών ανοικτού χρώματος .

Μέχρι σήμερα, τα σύνθετα υλικά δεν έχουν τύχει ευρεία εφαρμογή στις κατασκευές. Τρεις είναι κυρίως οι λόγοι. Ο πρώτος είναι το υψηλό τους κόστος, ο δεύτερος είναι ότι ο χάλυβας είναι ένας “υψηλής κλάσης” αντίπαλος και ο τρίτος είναι η έλλειψη σαφών προδιαγραφών και προτύπων για την εφαρμογή τους καθώς και ενός απαραίτητου κώδικα για τον σχεδιασμό.

Η πλέον επιτυχής εφαρμογή των σύνθετων υλικών αφορά τον τομέα των επεμβάσεων. Η χρήση σύνθετων υλικών ως βασικού δομικού στοιχείου για επεμβάσεις σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα τόσο από στατική όσο και από αρχιτεκτονική άποψη σε σχέση με τη χρήση χαλύβδινων στοιχείων. Επίσης η ταχύτητα εκτέλεσης, η προσαρμοστικότητα και η ευκολία μελέτης είναι καλύτερες στην περίπτωση των FRP. Η εφαρμογή τους πάντως είναι περιορισμένη καλύπτοντας κυρίως αδυναμίες μεμονωμένων στοιχείων και δέν

μπορεί σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιηθεί για αντισεισμική ενίσχυση του συνόλου της κατασκευής.

Στο πρακτικό μέρος της πτυχιακής προσπαθήσαμε και καταφέραμε να ενισχύσουμε τα απαραίτητα δομικά στοιχεία του κτιρίου ώστε να πληρούν τις νέες προϋποθέσεις για την αλλαγή χρήσης και την προσθήκη ορόφου στο δώμα του κτιρίου. Τα υπάρχοντα δοκάρια μας εμφάνισαν προβλήματα όσο αφορά την καμπτική τους αντοχή και μία κολώνα μας παρουσίασε προβλήματα που σχετίζονται με τη διατμητική της αντοχή. Τα αποτελέσματα από την ενίσχυση των μεμονωμένων στοιχείων με ινοπλισμένα πολυμερή είναι πολύ ικανοποιητικά αφού στα περισσότερα στοιχεία αυξήθηκε η διατμητική ή καμπτική τους αντοχή κατά 100% έως και 300% από ότι μπορούσαν να αντέξουν χωρίς να υπάρξει κάποια ανεπιθύμητη αστοχία.

Τα σύνθετα υλικά όπως αναφέραμε είναι μία τεχνολογία επισκευής και ενίσχυσης των κατασκευών που ακόμα έχει πολλά περιθώρια εξέλιξης και βελτίωσης. Συνεχώς γίνονται έρευνες για την εύρεση νέων υλικών και τρόπων ενίσχυσης κατασκευών. Ως η πλέον επιτυχής εφαρμογή των σύνθετων υλικών θα πρέπει να θεωρηθεί η εφαρμογή μανδύων σε υποστυλώματα για αύξηση της πλαστιμότητας ή της διατμητικής τους αντοχής. Αντίθετα ο τομέας στον οποίο παρουσιάζονται αρκετές αδυναμίες και δυσκολίες εφαρμογής είναι η μορφή των ανοικτών ενισχύσεων για καμπτική ή διατμητική ενίσχυση .

Επειδή τα σύνθετα υλικά είναι σχετικά νέα προϊόντα για τις κατασκευές απουσιάζει η σχετική εμπειρία από την εφαρμογή τους και ο βαθμός αξιοπιστίας για την συμπεριφορά τους είναι μειωμένος. Ο Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) αποτελεί ένα καλό υπόβαθρο για τον σχεδιασμό των ενισχύσεων με σύνθετα υλικά, η χρήση τους όμως στην κατασκευή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, σύνεση και σχολαστική επιβεβαίωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών σε βάθος χρόνου.

## 12. Βιβλιογραφία

1. Σ. Δρίτσος (2006), " Καμπτική Ενίσχυση με Επικολλητά Φύλλα από Χάλυβα ή Ινοπλισμένα Πολυμερή ", Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε ,τεύχος 335, σελ.22-27.
2. Σ. Δρίτσος (2006), " Τεχνικές Ενίσχυσης Υποστρωμάτων με Περίσφηση " , Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε , τεύχος 338, σελ.22-26 .
3. Σ. Δρίτσος (2007), " Τα σύνθετα Υλικά στις Νέες Κατασκευές " , Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε , τεύχος 345 , σελ.30-37 .
4. Μιχάλης Ι. Καραντζίκης (2007), " Ενίσχυση Κτιρίων με Σύγχρονα Υλικά " , Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα.
5. Κ. Σπυράκος (1999), " Επισκευή και Ενίσχυση Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά", Τεχνικό Περιοδικό ΚΤΙΡΙΟ , σελ.39-44.
6. Αλέξανδρος- Δημήτριος Γ.Τσώνος (2003), " Εκτίμηση της Αποδοτικότητας της Ενίσχυσης Δομικών Στοιχείων από Ο.Σ. με Σύνθετα Υλικά ",Τεχνικό Περιοδικό ΚΤΙΡΙΟ, Επιστημονική Έκδοση Α-Β.
7. Τριανταφύλλου Αθ.Χ. (2008), " Δομικά Υλικά " , Βιβλιοπωλεία Παπασωτηρίου.
8. Πανταζοπούλου Σταυρούλα (2000), " Μανδύες από Σύνθετα Υλικά ως Μέσο Επισκευής Στοιχείων απο Ο.Σ. ", Τεχνικό Περιοδικό ΚΤΙΡΙΟ ,Τόμος Α/2000 , σελ.35-44 .
9. Τριανταφύλλου Αθ.Χ. (2000), " Ενισχύσεις Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά " , Ημερίδα ΤΕΕ , Ξάνθη .
10. Κουτσούκος Π.Κωνσταντίνος (2001), " Αντισεισμικές Ενισχύσεις με Σύνθετα Υλικά " , Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε. τεύχος 291, σελ.52-53 .
11. Αλέξανδρος-Δημήτριος Τσώνος,Χριστίνα Αθανασιάδου (2008), " Μία Καινοτόμος Λύση για τις Ενισχύσεις Κατασκευών Ο.Σ. με Σύνθετα Υλικά " , 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα .
12. Λυραντζάκη Φωτεινή (2008), " Συγκριτική Παρουσίαση των Ιδιοτήτων Ανοξειδωτου Χάλυβα και Ραβδων FRP " , Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε τεύχος 360 , σελ.16-24 .
13. Τριανταφύλλου Θ. (2000), " Ενισχύσεις Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά-Υπολογισμοί " , Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε τεύχος 275 .
14. Graigie Larry (2004), " New Research on the Behaviour of FRP Strengthened Concrete Elements in Fire " , American Composites Fabricators Assosiation ACMA .

15. Tang Benjamin (1997), " Fiber Reinforced Polymer Composites Applications in USA ", FRP Library, Federal Highway Administration, Washington .
16. Λαμπρινού Ε. (1998), " Ενίσχυση Υποστυλωμάτων απο Οπλισμένο Σκυρόδεμα μέσω Υφάσματος με Ίνες Άνθρακα ", Διπλ. Εργασία Ε.Μ.Π.
17. Μπόγγρης Αθανάσιος (2010), " Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Πολυμερών και Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών μετά απο Επαναληπτική Κρούση ", Μεταπτυχιακή εργασία , Πανεπιστήμιο Πατρών .
18. Σπυράκος Κ. (2004), " Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά φορτία ", Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας , Αθήνα .
19. Σ. Δρίτσος (2007), " Στρατηγικές και Σχεδιασμός Αντισεισμικής Ενίσχυσης Κτιρίων ", Τ.Ε.Ε Αθήνα .
20. Σ. Δρίτσος (2006), " Τα σύνθετα Υλικά στις Κατασκευές ", 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος , Τ.Ε.Ε , ΕΤΕΚ , Αλεξανδρούπολη .
21. ΚΑΝ.ΕΠΕ (2012), Εφημερις της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας , Τεύχος 2 , Αρ. Φύλλου 42
22. Μπαβέλας Χρήστος- Μπουζουκου Μαριάννα (2005), " Συγκριτική Μελέτη Ενισχύσεων Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά Οργανικής και Ανόργανης Μήτρας", Διπλωματική εργασία , Πανεπιστήμιο Πατρών .
23. Ντελμεκουρα Κ. (2005), " Ενίσχυση Κατασκευών απο Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Χρήση Σύνθετων Υλικών Ανόργανης Μήτρας ", 11<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο , Πάτρα .
24. Πανουτσοπούλου Λ. (2012), " Ενίσχυση Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος έναντι Εκρήξεων με Σύνθετα Υλικά ", 18<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο , Πάτρα .
25. Κορφιάτης Γ. (2007), " Ιδιότητες και Σύγκριση Επεμβάσεων με FRP και Προσθήκης Νέων Χαλύβδινων Στοιχείων ", 13<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο , Πάτρα .
26. Θεοδωράτος Α. – Παπαδόπουλος Θ. (2002), " Ιστορικά Κτίρια : Ενίσχυση και επισκευή τους με FRP ", 8<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο , Πάτρα .
27. Κασιόκας Ε. – Κουρτέσης Λ. (2002) ," Χαρακτηριστικά Ανθεκτικότητας σε Περιβαλλοντικές Επιδράσεις Δοκών Ενισχυμένων με Φύλλα FRP ", 8<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο , Πάτρα .
28. Κοντογούρης Γ. (2004), " Σύνθετα Υλικά και Επίδραση του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος στις Ιδιότητες τους ", Ε.Μ.Π , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών .
29. Infremer (1993), " Material Behaviour in Deep Sea Environment ", France .



30. Τριανταφύλλου Θ., " Ενισχύσεις Κατασκευών Σκυροδέματος με Ινο-Οπλισμένα Πλαστικά Υλικά ", 11<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος , Κέρκυρα .
31. Damian I. Kachlakev , " Strengthening Structures Using FRP Composite Materials ", California Polytechnic State University , San Luis Obispo .
32. Τριανταφύλλου Θ. (1999), " Νέα Τεχνική Ενίσχυσης Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Συνθετα Υλικά : Διαδικασία Ανάλυσης και Διαστασιολόγησης ", Πρακτικά 13<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος , Ρέθυμνο .
33. Σ.Δρίτσος (2006) , "Ενισχύσεις/Επισκευές Κατασκευών απο Οπλισμένο Σκυρόδεμα ", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών .
34. Αποστολόπουλος Χάρης (2011) , " Υλικά και Αντοχή σε Διάρκεια ", Διημερίδα ΤΕΕ , τμήμα Δυτ.Ελλάδας , Πάτρα .
35. Τριανταφύλλου Αθ.Χ. (2010) , " Προχωρημένη Διαστασιολόγηση Επεμβάσεων με Έμφαση στα Σύγχρονα Δομικά Υλικά (ΙΟΠ και ΚΑΝΕΠΕ) ", Ημερίδα Σάμος.
36. Α. Τριανταφύλλου (2006) , " Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά" , Α Ενότητα: Ενίσχυση Κτιρίων , ΤΕΕ Αθήνα .
37. Αθ.Τριανταφύλλου, Αικ.Παπανικολάου, Δ.Μπουρνάς, Π.Λόντου (2006) , " Νέα Γενιά Σύνθετων Υλικών Ανόργανης Μήτρας για την Ενίσχυση Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος ", 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη.
38. Α. Τριανταφύλλου (2004) , "Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (ΙΟΠ) ", Εκδότης Αυτοέκδοση .
39. Γιώργος Παπανικολάου- Διονύσης Μουζάκης (2007) , "Σύνθετα υλικά ", Εκδόσεις Κλειδάριθμος .
40. Σιούλα Βασιλική (2011) , " Μελέτη Φθοράς και Υποβάθμιση των Ιδιοτήτων Σύνθετων Πολυμερών ", Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι Κρήτης
41. Fib-Task Group 9.3 FRP (2001) , "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures ", Publisher : Fib Bulletin No. 14 .
42. [www.sika.gr](http://www.sika.gr)
43. <http://www.docstoc.com/docs/14970953/Carboxylic-Acid-Vinyl-Ester-Product-Lineup>

## 13. Παράρτημα Α

### Εντατικά Μεγέθοι Κτιρίου πριν την Προσθήκη και την Αλλαγή Χρήσης του με τη Βοήθεια του Strad 2009.

#### Στάθμη 2

#### Στατική Επίλυση Πλακών

Αριθμός Πλακών + Πρόβολοι = 7

---

Συμπαγείς Πλάκες και Προβόλοι

	d(cm)	ΠΕΡΙΒΑΛΟΥΣΣΣ	ΦΟΡΤΙΑ ( N/m <sup>2</sup> )			ΑΚΡΑΙΟ	ΟΛΙΚΟ
A/A	d1	ΔΟΚΟΙ	ΙΔΙΟ ΜΟΝΙΜΟ ΚΙΝΗΤΟ			( N/m)	ΦΟΡΤΙΟ
Π1	20	Δ4-Δ5-Δ12-Δ20	4000	1500	2000		7500
Π2	20	Δ6-Δ7-Δ11-Δ20	4000	1500	2000		7500
Π3	20	Δ1-Δ8-Δ9-Δ10-Δ11-Δ13	5000	1500	2000		8500
Π4	20	Δ2-Δ3-Δ12-Δ13	4000	1500	2000		7500
Π5	20	Δ5-Δ6-Δ17-Δ18-Δ19	4000	1500	2000		7500
ΠΡ6	20	Δ1-Δ14-Δ15-Δ1002	5000	1500	5000	1000	11500
ΠΡ7	20	Δ2-Δ15-Δ16-Δ1001	5000	1500	5000	1000	11500

#### Στατική Επίλυση Πλακών

Αριθμός Πλακών + Πρόβολοι = 7

---

Φορτία Δοκών

A/A	b x d (cm)	ΠΛΑΚΕΣ		ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ( N/m)				ΟΛΙΚΟ
		Π1	Π2	ΙΔΙΟ	G(Π1-Π2)	Q(Π1-Π2)	ΤΟΙΧΟΠ.	ΦΟΡΤΙΟ
1	25x50	3	ΠΡ6	3125	31271	17104	9000	60500
2	25x50	4	ΠΡ7	3125	23056	14722	9000	49903
3	25x50	4		3125	5944	2213	9000	20282
4	25x50	1		3125	2918	1061	9000	16104
5	25x50	1	5	3125	4020	1758	9000	17903
6	25x50	2	5	3125	9306	4162	9000	25593
7	25x50	2		3125	1370	498	9000	13993
8	25x50	3		3125	7286	2169	9000	21580
9	25x50	3		3125	6939	458	9000	19522
10	25x50	3		3125	4019	1197	9000	17341
11	25x50	2	3	3125	25167	6333	9000	43625

12	25x50	1	4	3125	11695	2640	9000	26460
13	25x50	3	4	3125	21575	7231	9000	40931
14	25x50	ΠΡ6		3125	6500	5000	9000	23625
15	25x50	ΠΡ6	ΠΡ7	3125	13000	10000	9000	35125
16	25x50	ΠΡ7		3125	6500	5000	9000	23625
17	25x50	5		3125	5500	2000	9000	19625
18	25x50	5		3125	4348	1253	9000	17726
19	25x50	5		3125	5500	2000	9000	19625
20	25x50	1	2	3125	7131	2593	9000	21849

## Εντατικά Μεγέθη Δοκών Στάθμης 2

A/A	Π.Φ	Mmax	ΜΥ(αρχη)	ΜΖ(αρχη)	QZ(αρχη)	QY(αρχη)	ΜΧ(αρχη)	N(τελ.)
			ΜΥ(τελ.)	ΜΖ(τελ.)	QZ(τελ.)	QY(τελ.)	ΜΧ(τελ.)	N(τελ.)
Δ 1	1	104,5	-101,50	-0,75	133,82	-4,63	0,88	-57,06
			-137,42	28,99	-145,00	-4,63	0,88	-57,06
Δ 2	1	26,9	-64,96	3,55	80,45	-1,25	-0,52	-18,95
			-23,10	8,50	-59,39	-1,25	-0,52	-18,95
Δ 3	1	27,1	-59,16	11,00	56,04	3,26	-0,28	-7,65
			-28,64	-7,25	-45,14	3,26	-0,28	-7,65
Δ 4	1	9,7	-29,08	3,14	34,18	1,35	-0,18	-1,17
			1,03	-1,37	-16,21	1,35	-0,18	-1,17
Δ 5	1	10,6	-15,99	-0,82	29,42	-2,28	-0,13	-15,64
			-26,59	8,22	-34,76	-2,28	-0,13	-15,64
Δ 6	1	28,5	-30,26	13,94	50,40	6,97	0,04	-15,38
			-10,64	-15,88	-41,22	6,97	0,04	-15,38
Δ 7	1	13,3	3,27	-13,56	16,44	-5,04	0,13	1,82
			-10,61	2,07	-25,40	-5,04	0,13	1,82
Δ 8	1	9,7	-14,85	24,69	30,86	-4,96	-0,89	3,95
			6,07	35,60	-11,84	-4,96	-0,89	3,95
Δ 9	1	10,0	-1,94	-19,47	21,40	-19,13	0,71	2,02
			2,74	18,79	-16,72	-19,13	0,71	2,02
Δ 10	1	0,5	-28,51	0,22	30,62	6,24	1,36	7,24
			-14,26	-20,05	-21,85	6,24	1,36	7,24
Δ 11	1	42,3	-19,57	21,69	68,29	14,24	-1,09	-31,32
			-46,79	-35,62	-81,81	14,24	-1,09	-31,32
Δ 12	1	20,4	-32,80	-8,49	50,42	-6,70	0,63	-21,68
			-20,56	18,16	-44,26	-6,70	0,63	-21,68
Δ 13	1	67,1	-83,23	27,68	100,68	5,06	-0,50	-4,82
			-76,24	-2,23	-98,32	5,06	-0,50	-4,82
Δ 14	1	-1,1	-44,28	0,00	40,76	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	3,51	0,00	0,00	0,00
Δ 15	1	-1,7	-61,75	0,00	56,00	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	5,75	0,00	0,00	0,00
Δ 16	1	-0,4	-37,25	0,00	37,25	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δ 17	1	0,0	-26,99	0,00	30,84	0,00	0,00	0,00

			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δ 18	1	33,9	-8,79	0,10	37,50	0,05	-0,36	-10,50
			-8,27	-0,11	-37,27	0,05	-0,36	-10,50
Δ 19	1	0,0	-26,99	0,00	30,84	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δ 20	1	-7,0	-12,84	-5,29	15,10	-3,89	0,05	1,01
			-47,99	5,79	-39,77	-3,89	0,05	1,01

## Εντατικά Μεγέθη Υποστυλωμάτων Στάθμης 2

Κ 2 60x30					
Σταθμη 2 4Φ16+4Φ18 (Σ.Φ.=Κεφ+1+8)(ρ=10.4/1000)					
fck=20 ΚΑΜΨΗ fyk=500		ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΣ		ΛΥΓΙΣΜΟΣ	
Nsd= 726	σc=11.33	Μεπ-γ=278	vd= .18	ey=0	
Msdγ=196	x 1 as=3.33		Sy= .66		
Msdχ=25	σs=370.97	Μεπ-χ=159	Sx= .69	ex=0	
Χ:Φ16 ο:Φ18					
Ειδη Συνδετηρων: Περιμετρικος +Ενδιαμεσος					
Συνδετ./Περιοχη: (60cm) Φ8/10 (79cm) Φ8/14 (60cm) Φ8/10					
Ικανοτικοι συντελεστες Τοιχειου: acdγ=0 acdχ=0					
>> >> Υποστυλωματος: κεφαλη acdχ=0 acdγ=0 ποδας:acdχ=0 acdγ=0					
παραμορφωσεις x 1000-Σ.Φ. (.116 -1 ) (.29 -1 ) (2.088-43 ) (1.277-43 )					
ΔΙΑΤΜΗΣΗ (Κ2.1 ) Περισφιξη: Wαπαιτ.=.251 Wτιθ.=.263 α=.31					fyk=500
z-z (τοπικο) Σκελη συνδετηρα=2 Vrd1=124 Vrd2=595					
.1AcFcd= -232 Nsd=-431 =>ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΟ ζ=1 As (δισδ)=0					Msd=2.899
Χωρις Σεισμο	Με Σεισ.Ποδα	Με Σεισ.μεσο	Με Σεισ.κεφ.	Trd1=52.85	
Vsd=81	Vsd=47	Vsd=47	Vsd=47	As =0	
Vcd=124	Vcd=111	Vcd=124	Vcd=111		
As/s=.01015	=0,01015	=0,01015	=0,01015	=0,0000	
γ-γ (τοπικο) Σκελη συνδετηρα=4 Vrd1=137 Vrd2=561					
.1AcFcd= -232 Nsd=-431 =>ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΟ ζ=1 As (δισδ)=0					
Χωρις Σεισμο	Με Σεισ.Ποδα	Με Σεισ.μεσο	Με Σεισ.κεφ.		
Vsd=7	Vsd=7	Vsd=7	Vsd=7		
Vcd 137	Vcd=124	Vcd=137	Vcd=124		
As/s=.021	=0,02100	=0,02100	=0,02100		

## Εντατικά Μεγέθοι Κτιρίου μετά την Προσθήκη και την Αλλαγή Χρήσης του με τη Βοήθεια του Strad 2009.

### Στάθμη 2

#### Στατική Επίλυση Πλακών

Αριθμός Πλακών + Πρόβολοι = 7

-----

#### Συμπαγείς Πλάκες και Πρόβολοι

Α/Α	d(cm)	ΠΕΡΙΒΑΛΟΥΣΕΣ ΔΟΚΟΙ	ΦΟΡΤΙΑ ( N/m <sup>2</sup> )			ΑΚΡΑΙΟ ( N/m)	ΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ
			ΙΔΙΟ	ΜΟΝΙΜΟ	ΚΙΝΗΤΟ		
Π1	20	Δ4-Δ5-Δ12-Δ20	4000	1500	20000		25500
Π2	20	Δ6-Δ7-Δ11-Δ20	4000	1500	20000		25500
Π3	20	Δ1-Δ8-Δ9-Δ10-Δ11-Δ13	5000	1500	20000		26500
Π4	20	Δ2-Δ3-Δ12-Δ13	4000	1500	20000		25500
Π5	20	Δ5-Δ6-Δ17-Δ18-Δ19	4000	1500	2000		7500
ΠΡ6	20	Δ1-Δ14-Δ15-Δ1002	5000	1500	5000	1000	11500
ΠΡ7	20	Δ2-Δ15-Δ16-Δ1001	5000	1500	5000	1000	11500

#### Στατική Επίλυση Πλακών

Αριθμός Πλακών + Πρόβολοι = 7

---

#### Φορτία Δοκών

Α/Α	b x d (cm)	ΠΛΑΚΕΣ		ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ( N/m)				ΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ
		Π1	Π2	ΙΔΙΟ	G(Π1-Π2)	Q(Π1-Π2)	ΤΟΙΧΟΠ.	
1	25x60	3	ΠΡ6	3750	31271	52701	20000	107722
2	25x60	4	ΠΡ7	3750	23056	30036	20000	76842
3	25x50	4		3125	5944	22133	9000	40202
4	25x50	1		3125	2918	10611	9000	25654
5	25x50	1	5	3125	3898	11419	9000	27442
6	25x50	2	5	3125	9042	15652	9000	36819
7	25x50	2		3125	1370	4981	9000	18476
8	25x50	3		3125	7286	21691	9000	41102
9	25x50	3		3125	6939	31674	9000	50738
10	25x50	3		3125	4019	11973	9000	28117
11	25x50	2	3	3125	25167	94774	20000	143065
12	25x50	1	4	3125	11695	56862	20000	91682
13	25x50	3	4	3125	21575	72308	20000	117009
14	25x50	ΠΡ6		3125	6500	5000	9000	23625
15	25x50	ΠΡ6	ΠΡ7	3125	13000	10000	20000	46125
16	25x50	ΠΡ7		3125	6500	5000	9000	23625

17	25x50	5		3125	5500	2000	9000	19625
18	25x50	5		3125	4348	415	9000	16889
19	25x50	5		3125	5500	2000	9000	19625
20	25x50	1	2	3125	7131	25930	20000	56186

### Στάθμη 3

#### Στατική Επίλυση Πλακών

Αριθμός Πλακών + Πρόβολοι = 2

Συμπαγείς Πλάκες και Πρόβολοι

	d(cm)	ΠΕΡΙΒΑΛΟΥΣΕΣ	ΦΟΡΤΙΑ ( N/m <sup>2</sup> )			ΑΚΡΑΙΟ	ΟΛΙΚΟ
A/A	d1	ΔΟΚΟΙ	ΙΔΙΟ ΜΟΝΙΜΟ ΚΙΝΗΤΟ			( N/m)	ΦΟΡΤΙΟ
Π1	16	Δ3-Δ4-Δ5-Δ7	4000	1500	2000		7500
Π2	16	Δ1-Δ2-Δ6-Δ7	4000	1500	2000		7500

#### Εντατικά Μεγέθη Δοκών Στάθμης 2

A/A	Π. Φ.	Mmax	ΜΥ(αρχη)	ΜΖ(αρχη)	QZ(αρχη)	QY(αρχη)	ΜΧ(αρχη)	N(τελ.)
			ΜΥ(τελ.)	ΜΖ(τελ.)	QZ(τελ.)	QY(τελ.)	ΜΧ(τελ.)	N(τελ.)
Δ 1	1	152,5	-110,03	4,11	170,09	-6,28	1,23	-66,02
			-152,88	44,48	-183,42	-6,28	1,23	-66,02
Δ 2	1	40,8	-73,46	12,58	103,72	-2,84	-0,81	-21,58
			-30,94	23,88	-82,33	-2,84	-0,81	-21,58
Δ 3	1	43,9	-80,55	26,30	74,23	11,28	-0,25	-32,50
			-11,91	-36,88	-49,71	11,28	-0,25	-32,50
Δ 4	1	8,4	-20,57	-0,11	29,56	1,87	-0,21	-0,93
			-5,97	-6,39	-20,84	1,87	-0,21	-0,93
Δ 5	1	10,8	-35,17	-6,08	38,40	-1,75	-0,16	4,94
			-9,12	0,89	-25,29	-1,75	-0,16	4,94
Δ 6	1	27,3	-16,78	-0,13	43,25	1,77	0,05	4,32
			-25,31	-7,68	-47,24	1,77	0,05	4,32
Δ 7	1	19,1	-12,34	-6,71	18,21	-2,44	0,63	-23,68
			20,17	0,84	2,76	-2,44	0,63	-23,68
Δ 8	1	48,9	-29,87	-2,63	59,68	-20,76	-1,32	-28,56
			48,93	43,03	11,95	-20,76	-1,32	-28,56
Δ 9	1	11,7	-4,71	-26,08	25,06	-23,39	1,20	-0,15
			7,29	20,70	-13,07	-23,39	1,20	-0,15
Δ 10	1	-0,8	-25,34	-4,45	28,24	7,02	1,50	8,31
			-18,83	-27,27	-24,23	7,02	1,50	8,31
Δ 11	1	95,0	-53,57	14,80	168,59	14,26	-2,09	-15,32
			-142,70	-42,59	-212,88	14,26	-2,09	-15,32
Δ 12	1	40,6	-97,58	-32,11	125,76	-16,25	1,57	-1,60
			-46,89	32,50	-100,26	-16,25	1,57	-1,60

Δ 13	1	171,3	-121,93	43,67	206,06	11,51	-0,46	-54,03
			-165,81	-24,28	-220,92	11,51	-0,46	-54,03
Δ 14	1	-1,1	-44,28	0,00	40,76	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	3,51	0,00	0,00	0,00
Δ 15	1	-1,9	-83,75	0,00	78,00	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	5,75	0,00	0,00	0,00
Δ 16	1	-0,4	-37,25	0,00	37,25	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δ 17	1	0,0	-26,99	0,00	30,84	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δ 18	1	34,8	-7,83	0,11	37,46	0,05	-0,32	-9,18
			-7,47	-0,11	-37,31	0,05	-0,32	-9,18
Δ 19	1	0,0	-26,99	0,00	30,84	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δ 20	1	-27,3	-42,05	7,22	27,69	0,00	-0,34	-27,76
			-68,45	7,21	-46,21	0,00	-0,34	-27,76

## Εντατικά Μεγέθη Υποστυλωμάτων Στάθμης 2

<b>Κ 2 60x40</b>				
Σταθμη 2 14Φ22 (Σ.Φ.=Κεφ+1+8)(ρ=22.1/1000)				
fck=20 ΚΑΜΨΗ fyk=500		ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΣ	ΛΥΓΙΣΜΟΣ	
Nsd= 972	σc=11.86	Μεπ-γ=548	vd= .2	ey=0
Msdγ=251	x 1 as=3.26		Sy= .66	
Msdx=149	σs=277.77	Μεπ-χ=458	Sx= .69	ex=0
ο:Φ22				
Ειδη Συνδετηρων: Περιμετρικος +Ενδιαμεσος +Σιγμα				
Συνδετ./Περιοχη: (60cm) Φ8/10 (79cm) Φ8/17 (60cm) Φ8/10				
Ικανοτικοι συντελεστες Τοιχειου: acdγ=0 acdx=0				
>> >> Υποστυλωματος: κεφαλη acdx=3.5 acdγ=3.5 ποδας:acdx=0 acdγ=0				
παραμορφωσεις x 1000-Σ.Φ. (.199 -1 ) (.351 -1 ) (3.305-43 ) (.764 -43 )				
ΔΙΑΤΜΗΣΗ (Κ2.1 ) Περισφιξη: Wαπαιτ.=.208 Wτιθ.=.266 a=.4				fyk=500
z-z (τοπικο) Σκελη συνδετηρα=3 Vrd1=179 Vrd2=820				
.1AcFcd= -320 Nsd=-649 =>ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΟ ζ=.25 As (δισδ)=0				Msd=.1883
Χωρις Σεισμο	Με Σεισ.Ποδα	Με Σεισ.μεσο	Με Σεισ.κεφ.	Trd1=90.31
Vsd=156	Vsd=136	Vsd=136	Vsd=136	As =0
Vcd=179	Vcd=161	Vcd=179	Vcd=161	
As/s=.014	=0,01400	=0,01400	=0,01400	=0,0003
γ-γ (τοπικο) Σκελη συνδετηρα=4 Vrd1=192 Vrd2=799				
.1AcFcd= -320 Nsd=-649 =>ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΟ ζ=.21 As (δισδ)=0				
Χωρις Σεισμο	Με Σεισ.Ποδα	Με Σεισ.μεσο	Με Σεισ.κεφ.	
Vsd=98	Vsd=136	Vsd=136	Vsd=136	
Vcd 192	Vcd=173	Vcd=192	Vcd=173	
As/s=.021	=0,02100	=0,02100	=0,02100	

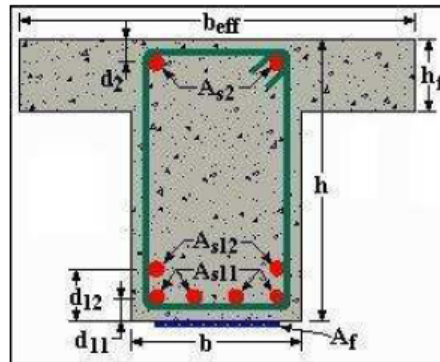
## 14. Παράρτημα Β



Αποτελέσματα του Προγράμματος Ενίσχυσης FRP - ANALYSIS

Ενίσχυση Δοκού - Δ1

### FLEXURAL STRENGTHENING



Type of Cross Section  
T - beam

Cross Section Geometry

Width  $b = 0,25$  m  
Effective width  $b_{eff} = 1,85$  m  
Height  $h = 0,5$  m  
Slab thickness  $h_f = 0,2$  m

Concrete

Strength class C 20/25  
Characteristic strength  $f_{ck} = 20$  N/mm<sup>2</sup>  
Mean strength  $f_{cm} = 28,2$  N/mm<sup>2</sup>  
Creep coefficient  $\varphi = 2,5$

Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 165$  kN/mm<sup>2</sup>  
Limiting strain  $\varepsilon_{f,lim} = 0,008$

Steel Reinforcement

Elastic modulus  $E_s = 200$  kN/mm<sup>2</sup>  
Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
Top  $A_{s2} = 452,16$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_2 = 0,04$  m  
Bottom  $A_{s12} = 615,44$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{12} = 0,08$  m  
Bottom  $A_{s11} = 769,3$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{11} = 0,04$  m

Bending Moments

Bending moment during strengthening  $M_o = 137,42$  kNm  
Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 260$  kNm  
Acting moment under rare load combination  $M_{ser,r} = 0$  kNm  
Acting moment under quasi-permanent load combination  $M_{ser,q-p} = 0$  kNm

Results

Ultimate Limit State



Resisting design moment before strengthening  $M_{rd,o} = 257,69 \text{ kNm}$   
 Required FRP cross section  $A_f = 10,69 \text{ mm}^2$   
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
 Resisting design moment after strengthening  $M_{rd} = 290,46 \text{ kNm}$   
 Degree of strengthening  $M_{rd} / M_{rd,o} = 1,127$

#### Serviceability Limit State - Rare Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,o} = 220,44 \text{ kNm}$   
 Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
 Moment capacity  $M_{ser,r} = 224,09 \text{ kNm}$   
 Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
 Concrete stress  $\sigma_c = 7,13 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00 \text{ N/mm}^2$

#### Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o} = 210,58 \text{ kNm}$   
 Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
 Moment capacity  $M_{ser,q-p} = 214,33 \text{ kNm}$   
 Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
 Concrete stress  $\sigma_c = 4,09 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00 \text{ N/mm}^2$

#### Final

Design is controlled by Ultimate Limit State  
 Final required FRP cross section  $A_f = 10,69 \text{ mm}^2$

#### Applied FRP

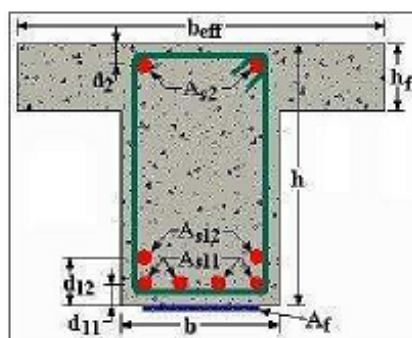
Width 50 mm  
 Thickness 1,2 mm  
 Number of strips 1  
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$



### Αποτελέσματα του Προγράμματος Ενίσχυσης FRP - ANALYSIS

#### Ενίσχυση Δοκού - Δ2

## FLEXURAL STRENGTHENING



#### Type of Cross Section

T - beam

#### Cross Section Geometry

Width  $b = 0,25 \text{ m}$   
 Effective width  $b_{eff} = 0,83 \text{ m}$   
 Height  $h = 0,5 \text{ m}$   
 Slab thickness  $h_f = 0,2 \text{ m}$

### Concrete

Strength class C 20/25  
Characteristic strength  $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$   
Mean strength  $f_{cm} = 28,2 \text{ N/mm}^2$   
Creep coefficient  $\varphi = 2,5$

### Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 165 \text{ kN/mm}^2$   
Limiting strain  $\varepsilon_{f,lim} = 0,008$

### Steel Reinforcement

Elastic modulus  $E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$   
Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$   
Top  $A_{s2} = 452,16 \text{ mm}^2$  at distance  $d_2 = 0,04 \text{ m}$   
Bottom  $A_{s12} = 0 \text{ mm}^2$  at distance  $d_{12} = 0 \text{ m}$   
Bottom  $A_{s11} = 615,44 \text{ mm}^2$  at distance  $d_{11} = 0,04 \text{ m}$

### Bending Moments

Bending moment during strengthening  $M_o = 64,96 \text{ kNm}$   
Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 120 \text{ kNm}$   
Acting moment under rare load combination  $M_{ser,r} = 0 \text{ kNm}$   
Acting moment under quasi-permanent load combination  $M_{ser,q-p} = 0 \text{ kNm}$

## Results

### Ultimate Limit State

Resisting design moment before strengthening  $M_{rd,o} = 119,40 \text{ kNm}$   
Required FRP cross section  $A_f = 4,41 \text{ mm}^2$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
Resisting design moment after strengthening  $M_{rd} = 154,23 \text{ kNm}$   
Degree of strengthening  $M_{rd} / M_{rd,o} = 1,292$

### Serviceability Limit State - Rare Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,o} = 106,70 \text{ kNm}$   
Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
Moment capacity  $M_{ser,r} = 110,50 \text{ kNm}$   
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
Concrete stress  $\sigma_c = 7,19 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00 \text{ N/mm}^2$

### Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o} = 103,17 \text{ kNm}$   
Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
Moment capacity  $M_{ser,q-p} = 107,07 \text{ kNm}$   
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
Concrete stress  $\sigma_c = 4,00 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00 \text{ N/mm}^2$

### Final

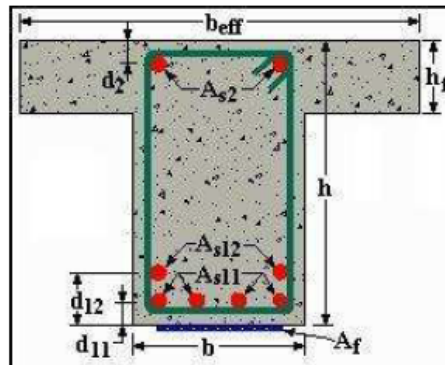
Design is controlled by Ultimate Limit State  
Final required FRP cross section  $A_f = 4,41 \text{ mm}^2$

### Applied FRP

Width 50 mm  
Thickness 1,2 mm  
Number of strips 1  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$



## FLEXURAL STRENGTHENING



### Type of Cross Section

T - beam

### Cross Section Geometry

Width  $b = 0,25$  m  
Effective width  $b_{eff} = 1,05$  m  
Height  $h = 0,5$  m  
Slab thickness  $h_f = 0,2$  m

### Concrete

Strength class C 20/25  
Characteristic strength  $f_{ck} = 20$  N/mm<sup>2</sup>  
Mean strength  $f_{cm} = 28,2$  N/mm<sup>2</sup>  
Creep coefficient  $\varphi = 2,5$

### Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 165$  kN/mm<sup>2</sup>  
Limiting strain  $\varepsilon_{f,lim} = 0,008$

### Steel Reinforcement

Elastic modulus  $E_s = 200$  kN/mm<sup>2</sup>  
Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
Top  $A_{s2} = 452,16$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_2 = 0,04$  m  
Bottom  $A_{s12} = 0$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{12} = 0$  m  
Bottom  $A_{s11} = 615,44$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{11} = 0,04$  m

### Bending Moments

Bending moment during strengthening  $M_0 = 59,16$  kNm  
Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 125$  kNm  
Acting moment under rare load combination  $M_{ser,r} = 0$  kNm  
Acting moment under quasi-permanent load combination  $M_{ser,q-p} = 0$  kNm

### Results

#### Ultimate Limit State

Resisting design moment before strengthening  $M_{rd,o} = 120,88 \text{ kNm}$   
 Required FRP cross section  $A_f = 11,43 \text{ mm}^2$   
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
 Resisting design moment after strengthening  $M_{rd} = 155,28 \text{ kNm}$   
 Degree of strengthening  $M_{rd} / M_{rd,o} = 1,285$

Serviceability Limit State - Rare Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,o} = 107,36 \text{ kNm}$   
 Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
 Moment capacity  $M_{ser,r} = 111,73 \text{ kNm}$   
 Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
 Concrete stress  $\sigma_c = 6,45 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00 \text{ N/mm}^2$

Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o} = 103,90 \text{ kNm}$   
 Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
 Moment capacity  $M_{ser,q-p} = 108,36 \text{ kNm}$   
 Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
 Concrete stress  $\sigma_c = 3,58 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00 \text{ N/mm}^2$

Final

Design is controlled by Ultimate Limit State  
 Final required FRP cross section  $A_f = 11,43 \text{ mm}^2$

Applied FRP

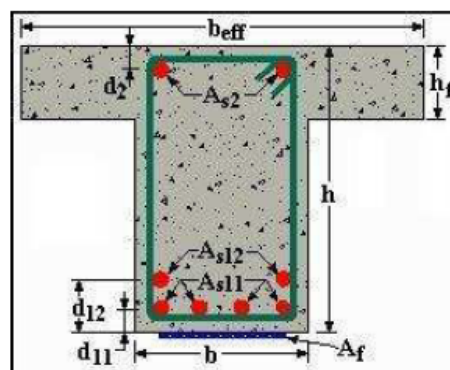
Width 50 mm  
 Thickness 1,2 mm  
 Number of strips 1  
 Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$



**Αποτελέσματα του Προγράμματος Ενίσχυσης FRP - ANALYSIS**

**Ενίσχυση του Δοκού - Δ11**

**FLEXURAL STRENGTHENING**



Type of Cross Section  
 T - beam

### Cross Section Geometry

Width  $b = 0,25$  m  
Effective width  $b_{eff} = 0,84$  m  
Height  $h = 0,5$  m  
Slab thickness  $h_f = 0,2$  m

### Concrete

Strength class C 20/25  
Characteristic strength  $f_{ck} = 20$  N/mm<sup>2</sup>  
Mean strength  $f_{cm} = 28,2$  N/mm<sup>2</sup>  
Creep coefficient  $\varphi = 2,5$

### Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 165$  kN/mm<sup>2</sup>  
Limiting strain  $\varepsilon_{f,lim} = 0,008$

### Steel Reinforcement

Elastic modulus  $E_s = 200$  kN/mm<sup>2</sup>  
Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
Top  $A_{s2} = 452,16$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_2 = 0,04$  m  
Bottom  $A_{s12} = 0$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{12} = 0$  m  
Bottom  $A_{s11} = 769,3$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{11} = 0,04$  m

### Bending Moments

Bending moment during strengthening  $M_o = 46,79$  kNm  
Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 150$  kNm  
Acting moment under rare load combination  $M_{ser,r} = 0$  kNm  
Acting moment under quasi-permanent load combination  $M_{ser,q-p} = 0$  kNm

## Results

### Ultimate Limit State

Resisting design moment before strengthening  $M_{rd,o} = 147,80$  kNm  
Required FRP cross section  $A_f = 7,09$  mm<sup>2</sup>  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>  
Resisting design moment after strengthening  $M_{rd} = 182,40$  kNm  
Degree of strengthening  $M_{rd} / M_{rd,o} = 1,234$

### Serviceability Limit State - Rare Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,o} = 132,59$  kNm  
Required FRP cross section  $A_f = 0,00$  mm<sup>2</sup>  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>  
Moment capacity  $M_{ser,r} = 139,06$  kNm  
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00$  N/mm<sup>2</sup>  
Concrete stress  $\sigma_c = 8,05 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00$  N/mm<sup>2</sup>

### Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o} = 127,90$  kNm  
Required FRP cross section  $A_f = 0,00$  mm<sup>2</sup>  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>  
Moment capacity  $M_{ser,q-p} = 134,25$  kNm  
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00$  N/mm<sup>2</sup>  
Concrete stress  $\sigma_c = 4,56 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00$  N/mm<sup>2</sup>



### Final

Design is controlled by Ultimate Limit State  
Final required FRP cross section  $A_f = 7,09 \text{ mm}^2$

### Applied FRP

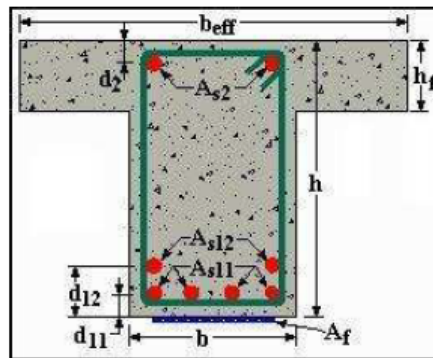
Width 50 mm  
Thickness 1,2 mm  
Number of strips 1  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$



## Αποτελέσματα του Προγράμματος Ενίσχυσης FRP - ANALYSIS

### Ενίσχυση Δοκού - Δ12

## FLEXURAL STRENGTHENING



### Type of Cross Section

T - beam

### Cross Section Geometry

Width  $b = 0,25 \text{ m}$   
Effective width  $b_{\text{eff}} = 0,83 \text{ m}$   
Height  $h = 0,5 \text{ m}$   
Slab thickness  $h_f = 0,2 \text{ m}$

### Concrete

Strength class C 20/25  
Characteristic strength  $f_{\text{ck}} = 20 \text{ N/mm}^2$   
Mean strength  $f_{\text{cm}} = 28,2 \text{ N/mm}^2$   
Creep coefficient  $\varphi = 2,5$

### Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 165 \text{ kN/mm}^2$   
Limiting strain  $\varepsilon_{f,\text{lim}} = 0,008$

### Steel Reinforcement

Elastic modulus  $E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$   
Characteristic yield stress  $f_{\text{yk}} = 500 \text{ N/mm}^2$   
Top  $A_{s2} = 452,16 \text{ mm}^2$  at distance  $d_2 = 0,04 \text{ m}$   
Bottom  $A_{s12} = 0 \text{ mm}^2$  at distance  $d_{12} = 0 \text{ m}$   
Bottom  $A_{s11} = 615,44 \text{ mm}^2$  at distance  $d_{11} = 0,04 \text{ m}$

### Bending Moments

Bending moment during strengthening  $M_o = 32,8 \text{ kNm}$   
Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 120 \text{ kNm}$   
Acting moment under rare load combination  $M_{ser,r} = 0 \text{ kNm}$   
Acting moment under quasi-permanent load combination  $M_{ser,q-p} = 0 \text{ kNm}$

### Results

#### Ultimate Limit State

Resisting design moment before strengthening  $M_{rd,o} = 119,40 \text{ kNm}$   
Required FRP cross section  $A_f = 4,67 \text{ mm}^2$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
Resisting design moment after strengthening  $M_{rd} = 154,11 \text{ kNm}$   
Degree of strengthening  $M_{rd} / M_{rd,o} = 1,291$

#### Serviceability Limit State - Rare Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,o} = 106,70 \text{ kNm}$   
Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
Moment capacity  $M_{ser,r} = 113,64 \text{ kNm}$   
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
Concrete stress  $\sigma_c = 7,29 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00 \text{ N/mm}^2$

#### Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o} = 103,17 \text{ kNm}$   
Required FRP cross section  $A_f = 0,00 \text{ mm}^2$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$   
Moment capacity  $M_{ser,q-p} = 109,95 \text{ kNm}$   
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00 \text{ N/mm}^2$   
Concrete stress  $\sigma_c = 4,06 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00 \text{ N/mm}^2$

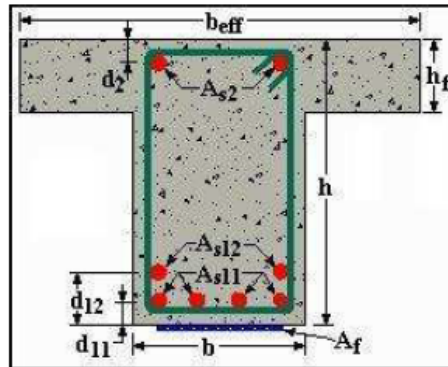
### Final

Design is controlled by Ultimate Limit State  
Final required FRP cross section  $A_f = 4,67 \text{ mm}^2$

### Applied FRP

Width  $50 \text{ mm}$   
Thickness  $1,2 \text{ mm}$   
Number of strips  $1$   
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00 \text{ mm}^2$

## FLEXURAL STRENGTHENING



### Type of Cross Section

T - beam

### Cross Section Geometry

Width  $b = 0,25$  m  
 Effective width  $b_{eff} = 1,09$  m  
 Height  $h = 0,5$  m  
 Slab thickness  $h_f = 0,2$  m

### Concrete

Strength class C 20/25  
 Characteristic strength  $f_{ck} = 20$  N/mm<sup>2</sup>  
 Mean strength  $f_{cm} = 28,2$  N/mm<sup>2</sup>  
 Creep coefficient  $\varphi = 2,5$

### Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 165$  kN/mm<sup>2</sup>  
 Limiting strain  $\varepsilon_{f,lim} = 0,008$

### Steel Reinforcement

Elastic modulus  $E_s = 200$  kN/mm<sup>2</sup>  
 Characteristic yield stress  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 Top  $A_{s2} = 452,16$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_2 = 0,04$  m  
 Bottom  $A_{s12} = 615,44$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{12} = 0,09$  m  
 Bottom  $A_{s11} = 769,3$  mm<sup>2</sup> at distance  $d_{11} = 0,04$  m

### Bending Moments

Bending moment during strengthening  $M_o = 83,23$  kNm  
 Required design moment after strengthening  $M_{sd} = 250$  kNm  
 Acting moment under rare load combination  $M_{ser,r} = 0$  kNm  
 Acting moment under quasi-permanent load combination  $M_{ser,q-p} = 0$  kNm

### Results

#### Ultimate Limit State



Resisting design moment before strengthening  $M_{rd,o} = 249,06$  kNm  
Required FRP cross section  $A_f = 6,22$  mm<sup>2</sup>  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>  
Resisting design moment after strengthening  $M_{rd} = 282,34$  kNm  
Degree of strengthening  $M_{rd} / M_{rd,o} = 1,134$

#### Serviceability Limit State - Rare Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,o} = 211,58$  kNm  
Required FRP cross section  $A_f = 0,00$  mm<sup>2</sup>  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>  
Moment capacity  $M_{ser,r} = 217,45$  kNm  
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00$  N/mm<sup>2</sup>  
Concrete stress  $\sigma_c = 9,17 \leq 0,6 \times f_{ck} = 12,00$  N/mm<sup>2</sup>

#### Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load

Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o} = 200,41$  kNm  
Required FRP cross section  $A_f = 0,00$  mm<sup>2</sup>  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>  
Moment capacity  $M_{ser,q-p} = 206,11$  kNm  
Steel stress  $f_{s11} = 400,00 \leq 0,8 \times f_{yk} = 400,00$  N/mm<sup>2</sup>  
Concrete stress  $\sigma_c = 5,34 \leq 0,45 \times f_{ck} = 9,00$  N/mm<sup>2</sup>

#### Final

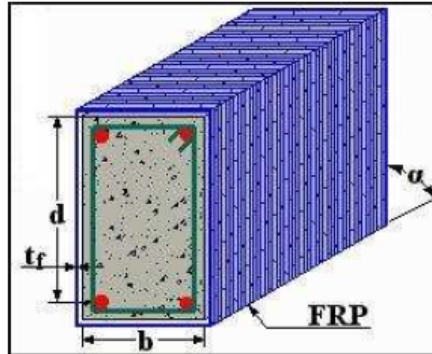
Design is controlled by Ultimate Limit State  
Final required FRP cross section  $A_f = 6,22$  mm<sup>2</sup>

#### Applied FRP

Width 50 mm  
Thickness 1,2 mm  
Number of strips 1  
Applied FRP cross section  $A_f = 60,00$  mm<sup>2</sup>



## SHEAR STRENGTHENING



### Method of Anchorage

Closed jacket

### Cross Section Geometry

Width  $b = 0,3 \text{ m}$

Static depth  $d = 0,56 \text{ m}$

Angle between fibres direction and member axis  $\alpha = 90 \text{ degrees}$

### Concrete

Strength class C 20/25

Characteristic strength  $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$

Mean strength  $f_{cm} = 28,2 \text{ N/mm}^2$

### Composite Materials

Elastic modulus  $E_f = 231 \text{ kN/mm}^2$

Ultimate tensile strain  $\varepsilon_{fu} = 0,017$

Limiting strain  $\varepsilon_{f,lim} = 0,006$

Type of fibres Carbon (CFRP)

### Safety Factors

Constant  $k = 0,8$

Debonding safety factor  $\gamma_{f,b} = 1,3$

Limiting strain safety factor  $\gamma_{f,l} = 1,25$

Carbon FRP fracture safety factor  $\gamma_{f,f} = 1,2$

### Type of Application

Continuous jacket

### Increase of Shear Capacity

Additional shear  $V_{fd} = 192 \text{ kN}$

### Results

Required FRP thickness  $t_f = 0,17 \text{ mm}$

Applied FRP thickness  $t_f = 0,24 \text{ mm}$

Additional shear  $V_{fd} = 268,24 \text{ kN}$

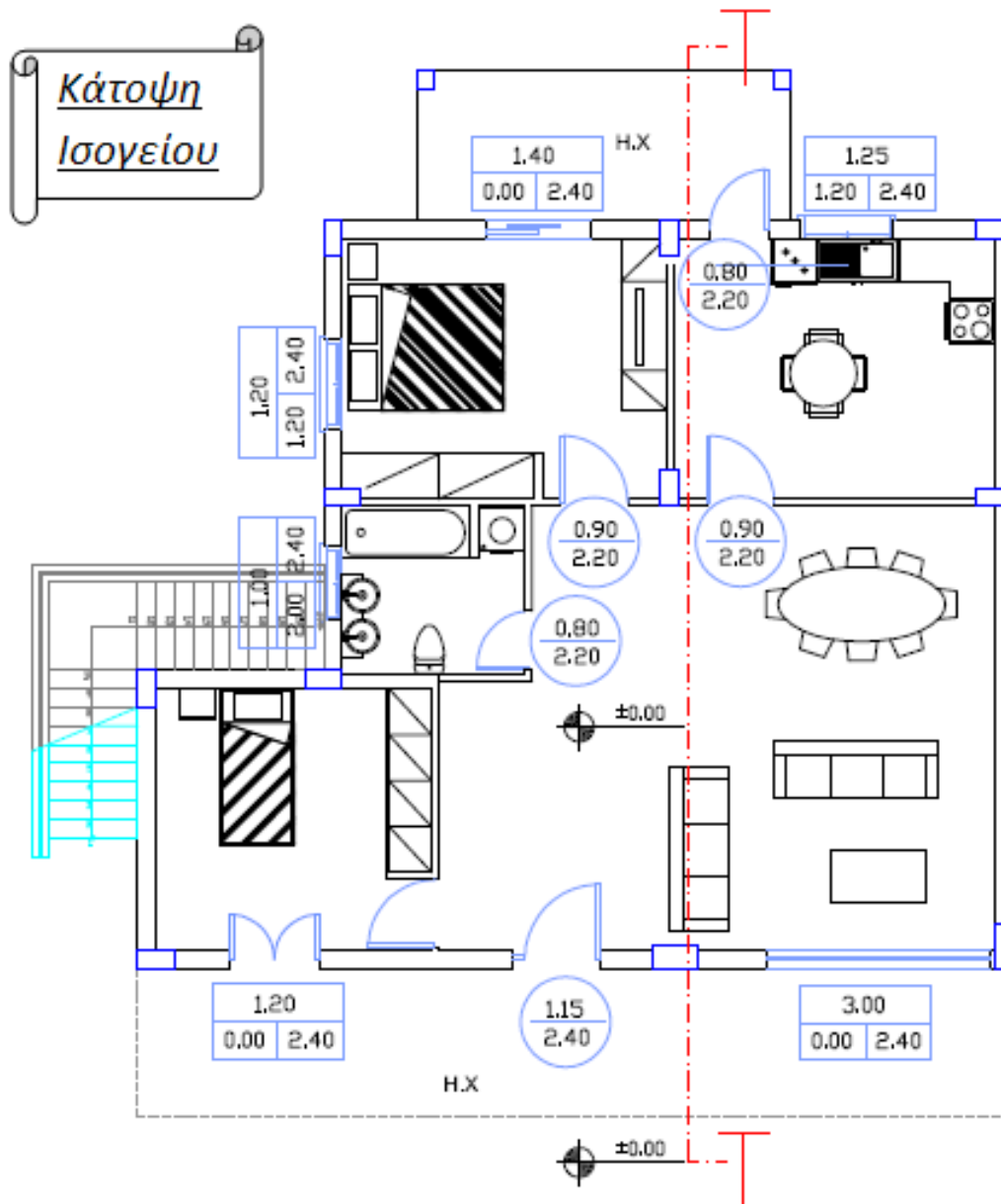
### Applied FRP

Thickness  $0,12 \text{ mm}$

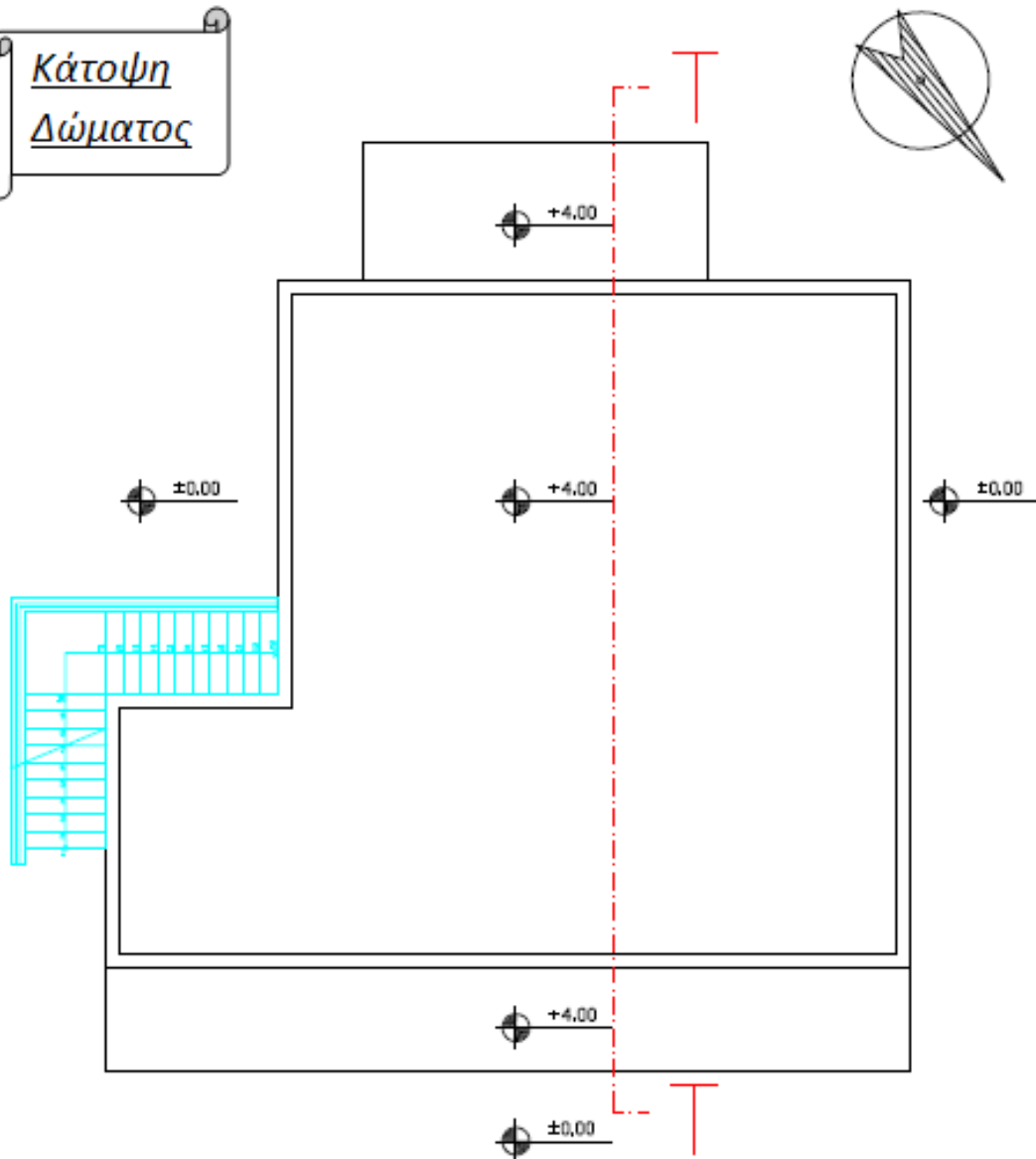
Number of layers required 2

## 15. Παράρτημα Γ

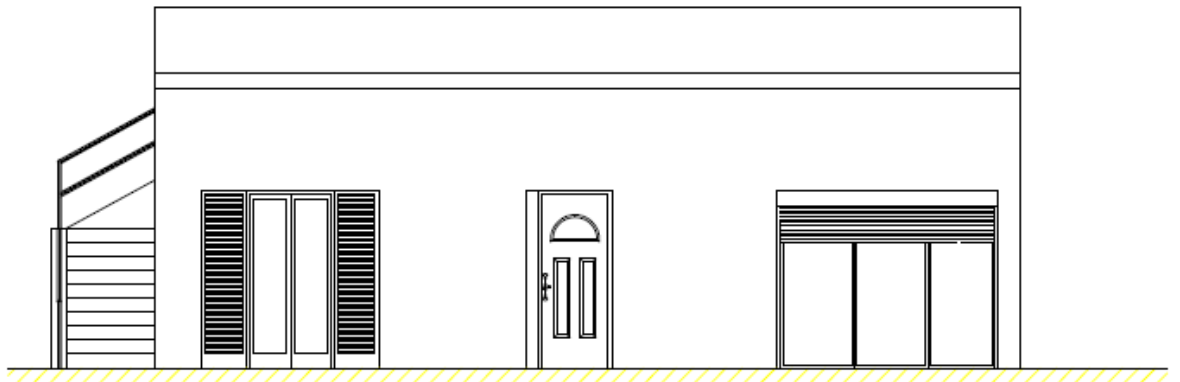
Τα αρχιτεκτονικά σχέδια του κτιρίου πρὶν την επιθυμητή προσθήκη στο δώμα



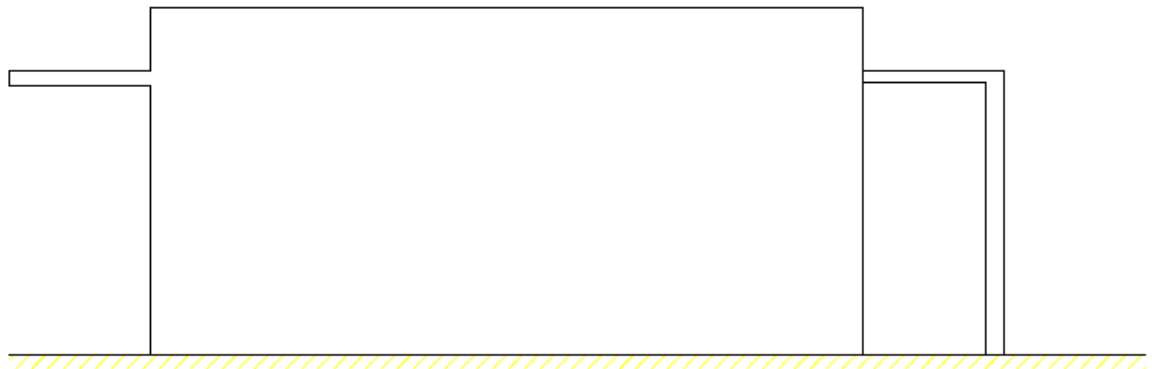
Κάτοψη  
Δώματος



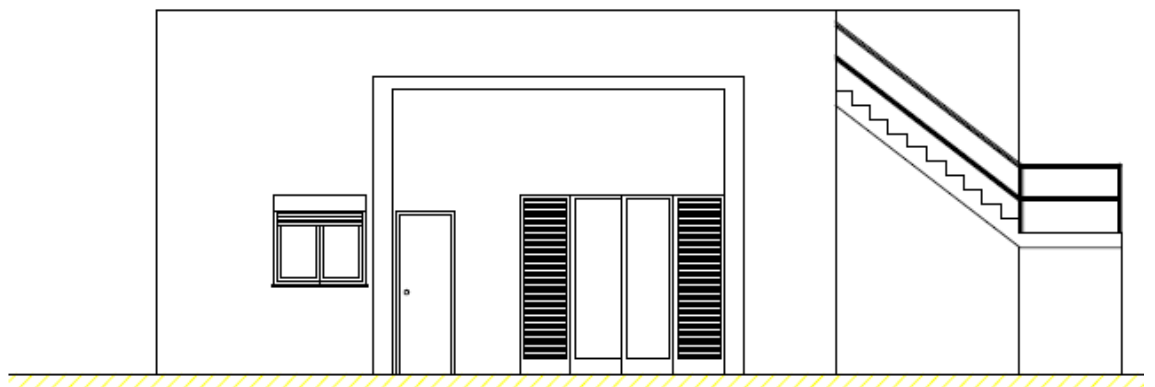
## Όψεις Κτιρίου



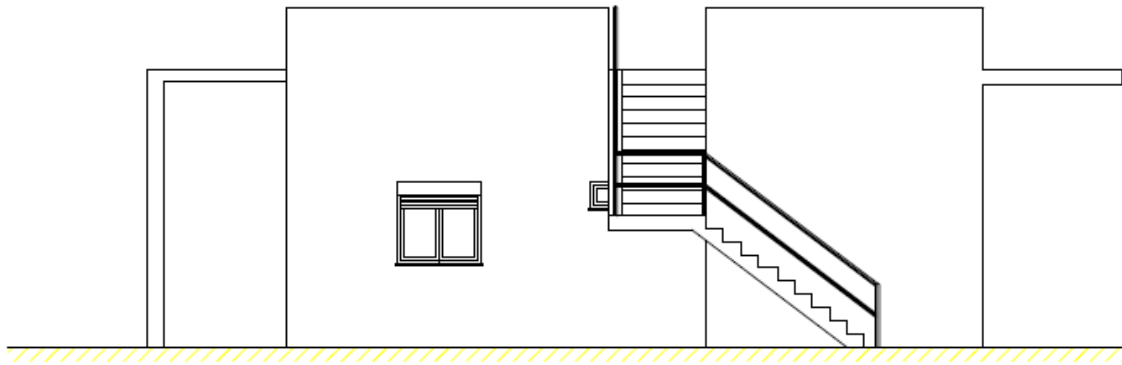
ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ



ΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ

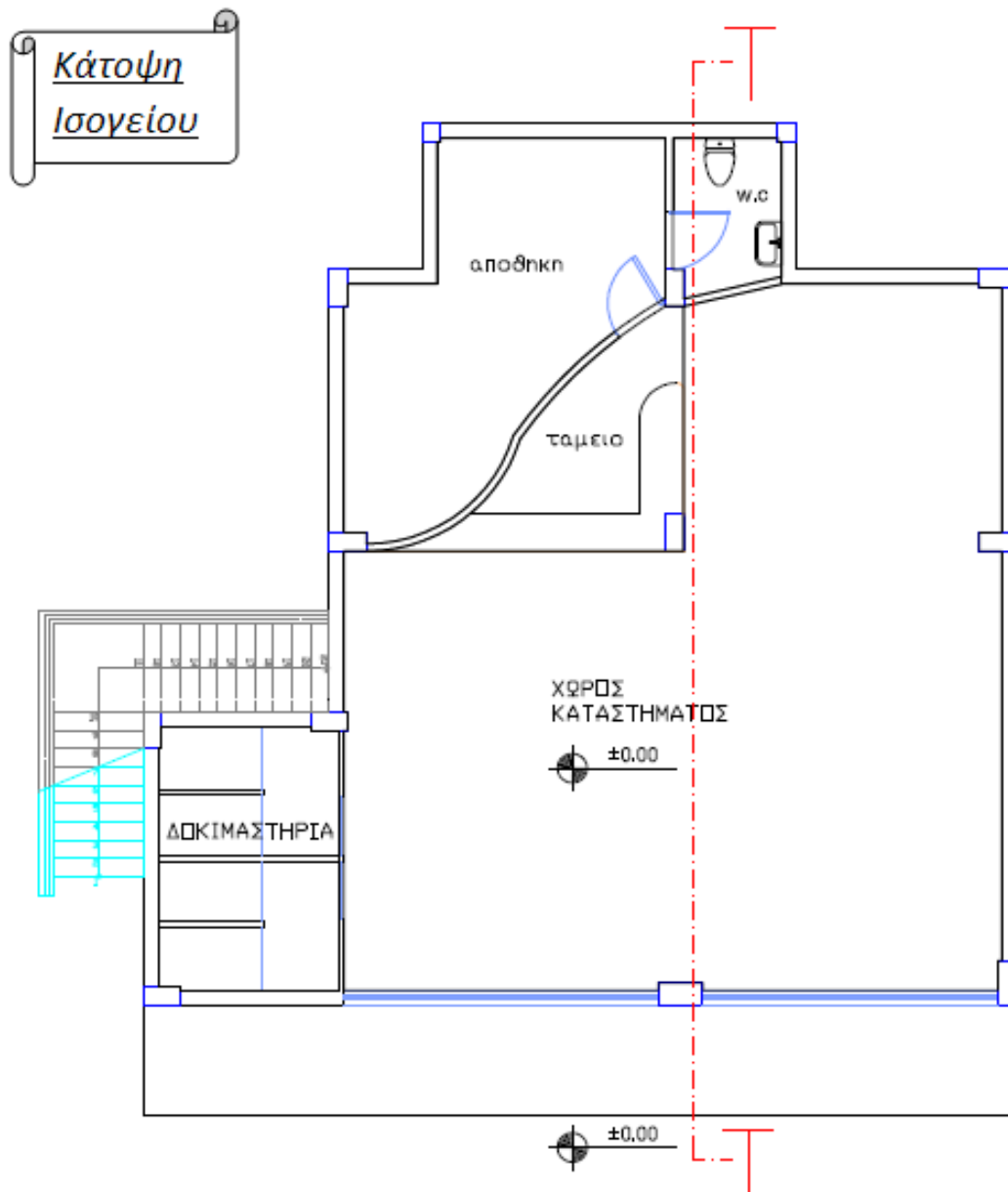


ΝΟΤΙΑ ΟΨΗ

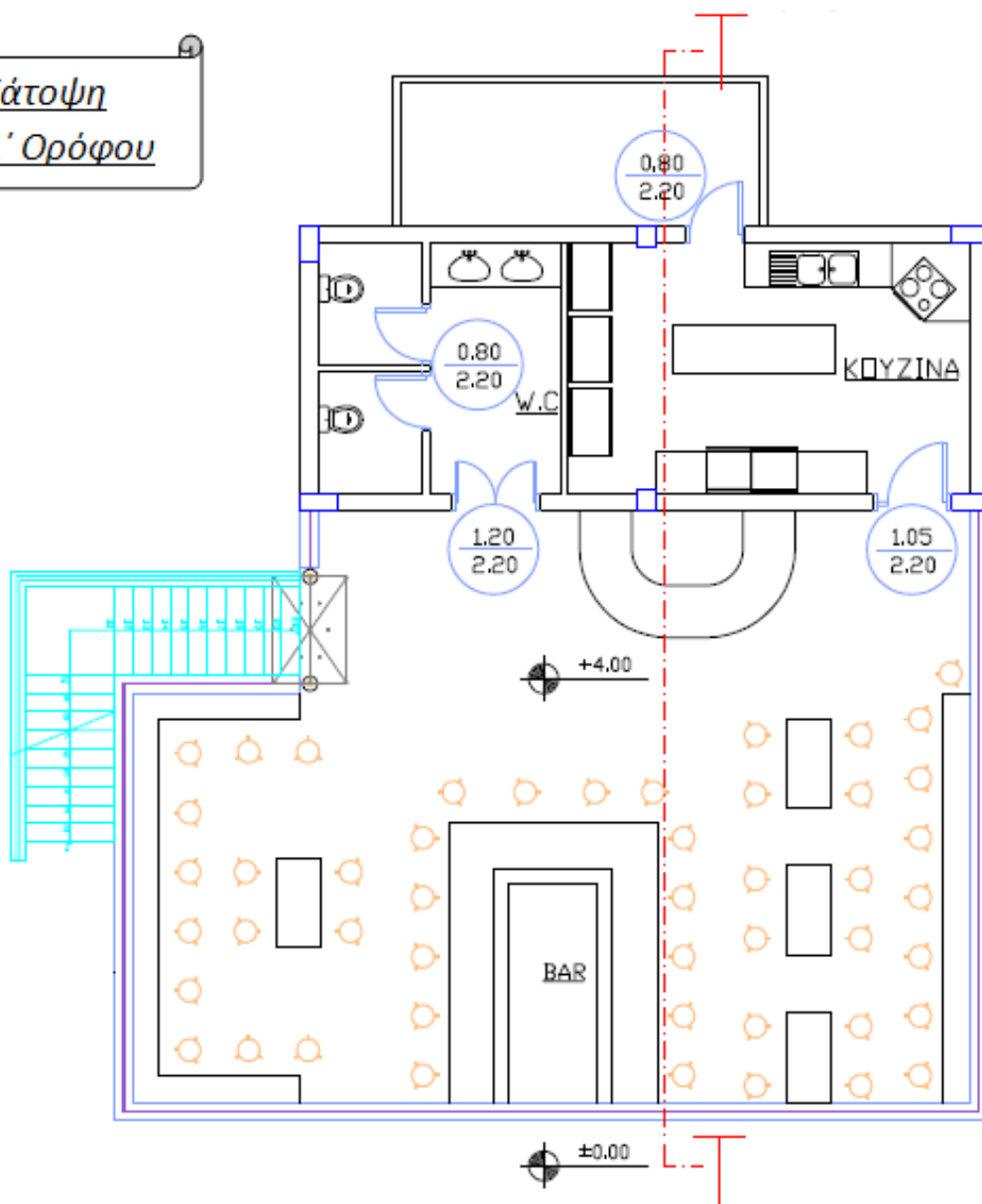


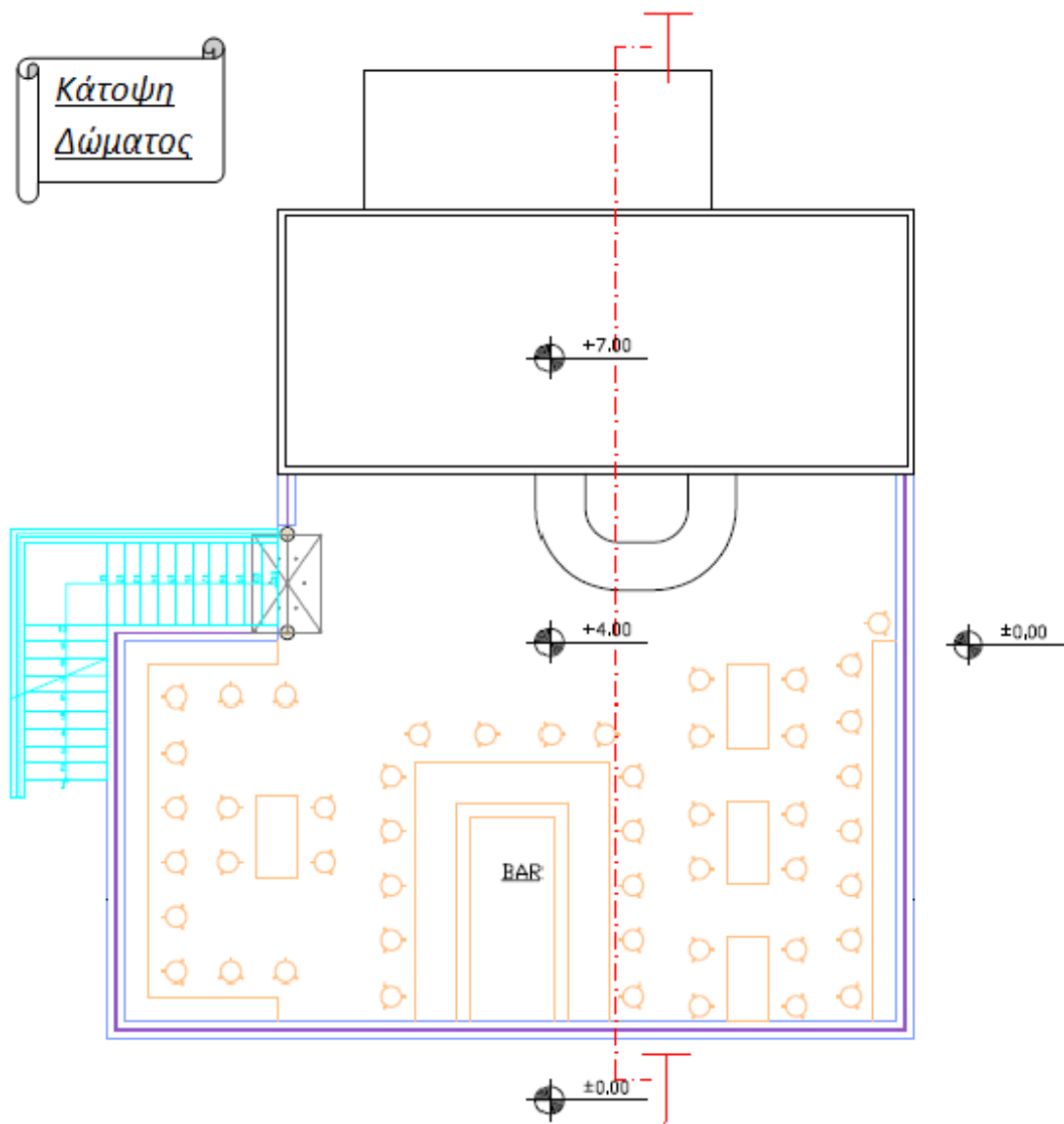
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΘΨΗ

**Τα αρχιτεκτονικά σχέδια του κτιρίου μετά την επιθυμητή διαρύθμιση του χώρου**



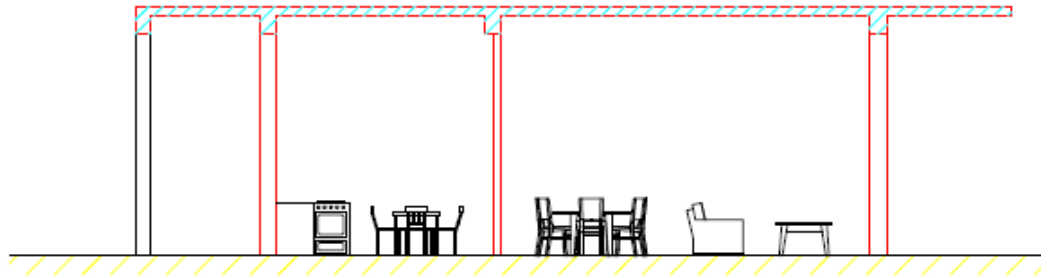
Κάτοψη  
Α' Ορόφου



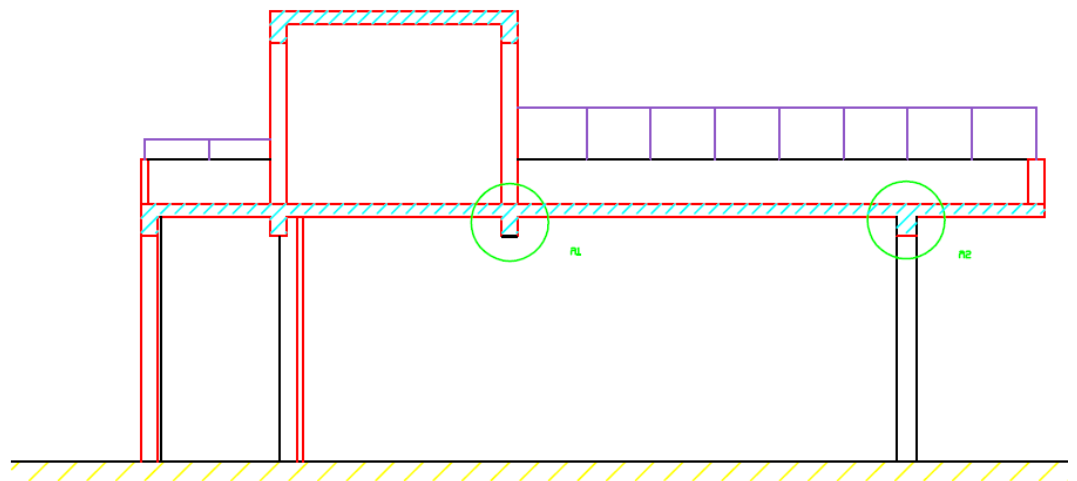




## Τομές Κτιρίου



τομή Τ-Τ  
κλίμακα 1:50  
(σχέδιο χωρίς τις  
δικές μας προσθήκες  
)



τομή Τ-Τ  
κλίμακα 1:50  
(σχέδιο έπειτα απο  
τις δικές μας  
προσθήκες)

