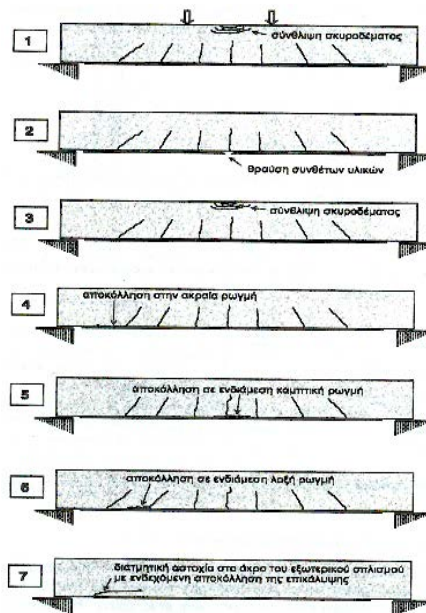


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ  
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ  
ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ



ΕΙΣΗΓΗΣΗ – ΕΠΙΒΛΕΨΗ : ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΒΑΡΕΛΙΔΗΣ

Δρ. ΑΡΧΙΤΕΚΤΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ-ΠΟΛΕΟΔΟΜΟΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2006

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

- 1.1 Εισαγωγή: Εφαρμογές και γενικά χαρακτηριστικά
- 1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών
- 1.3 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή
  - 1.3.1 Υλικά ινών
  - 1.3.2 Μήτρες σύνθετων υλικών
  - 1.3.3 Ιδιότητες σύνθετου υλικού
- 1.4 Μικρομηχανική των σύνθετων υλικών
- 1.5 Συμπεριφορά σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών
  - 1.5.1 Ιστορική αναδρομή
  - 1.5.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες
  - 1.5.3 Επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος
  - 1.5.4 Συμπεριφορά στο νερό
  - 1.5.5 Υπεριώδης ακτινοβολία
  - 1.5.6 Γαλβανική διάβρωση
  - 1.5.7 Ερπυσμός
  - 1.5.8 Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης
  - 1.5.9 Κόπωση
  - 1.5.10 Κρούση
- 1.6 Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών
  - 1.6.1 Σύμπτυξη και επαφή διεπιφανειών
  - 1.6.2 Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος
  - 1.6.3 Στάδια εφαρμογής σύνθετων υλικών
- 1.7 Αρχές σχεδιασμού συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης με σύνθετα υλικά
  - 1.7.1 Επιβολή εξωτερικής πεπίσφιγξης με μανδύα σύνθετων υλικών
  - 1.7.2 Αύξηση πλαστιμότητας
  - 1.7.3 Αύξηση αντοχής σε τέννωση
- 1.8 Μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή
  - 1.8.1 Διαστασιολόγηση
  - 1.8.2 Ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή
  - 1.8.3 Κατασκευαστικές διατάξεις-συστάσεις
  - 1.8.4 Ενίσχυση με μανδύες Ο.Σ.
- 1.9 Οπλισμένο ή ινοπλισμένο επίχρισμα
- 1.10 Παράδειγμα ενίσχυσης δοκού με ελάσματα σύνθετων υλικών

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ**

- 2.1 Σύνθεση ινοπλισμένων σκυροδεμάτων
  - 2.1.1 Σκυροδέματα χαλύβδινων ινών
  - 2.1.2 Σκυροδέματα με ίνες προπυλενίου

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

- 3.1 Συστήματα ενίσχυσης
  - 3.1.1 Συστήματα υγρής εφαρμογής
  - 3.1.2 Προκατασκευασμένα υλικά
- 3.2 Τεχνικές
  - 3.2.1 Βασική τεχνική
  - 3.2.2 Ειδικές τεχνικές

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

- 4.1 Γενικά
- 4.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών
  - 4.2.1 Οριακή κατάσταση αντοχής-πλήρης συνεργασία υλικών
  - 4.2.2 Οριακή κατάσταση αντοχής-αποκόλληση
  - 4.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- 4.3 Συνάφεια σύνθετων υλικών-σκυροδέματος
  - 4.3.1 Συμπεριφορά
  - 4.3.2 Αναλυτικό προσομοίωμα  
Παράδειγμα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ**

- 5.1 Γενικά
- 5.2 Αρχική κατάσταση
- 5.3 Οριακή κατάσταση αντοχής-μηχανισμοί αστοχίας
- 5.4 Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση αντοχής
  - 5.4.1 Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας
  - 5.4.2 Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας
- 5.5 Απαιτήσεις πλαστιμότητας
- 5.6 Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμών-οριακή κατάσταση αντοχής
- 5.7 Παράδειγμα
- 5.8 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- 5.9 Υποστυλώματα
- 5.10 Κόμβοι

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ**

- 6.1 Γενικά
- 6.2 Συμπεριφορά
  - 6.2.1 Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού  
Παράδειγμα
- 6.3 Πλαστιμότητα  
Παράδειγμα
- 6.4 Ματίσεις  
Παράδειγμα
- 6.5 Λυγισμός ράβδων  
Παράδειγμα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ**

- 7.1 Γενικά
- 7.2 Εκτίμηση επιβαλλόμενης σεισμικής μετακίνησης και διαθέσιμης ικανότητας για οροζόντια μετάθεση  
Παράδειγμα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ**



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

## **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το πεδίο των επισκευών και ενισχύσεων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έχει αρχίσει να απασχολεί σε σημαντικό βαθμό τον τεχνικό κόσμο της χώρας, για λόγους που σχετίζονται αφενός με τη μείωση της σεισμικής τρωτότητας και αφετέρου με την αναβάθμιση κατασκευών λόγω παλαιότητας, φθοράς, αλλαγής χρήσης κλπ. Τα τελευταία 15 χρόνια (περίπου 10 στη χώρα μας) έχει αναπτυχθεί μία νέα τεχνική ενίσχυσης, η οποία βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών που αποτελούνται από το συνδυασμό ινών (π.χ. άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά, γνωστά ως **ινοπλισμένα πολυμερή** (Fibre Reinforced Polymers-FRP) ή απλά **σύνθετα υλικά**, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες, που κάνουν την εφαρμογή τους στα τεχνικά έργα, και ιδιαίτερα στο πεδίο των ενισχύσεων/επισκευών ιδιαίτερα ελκυστική. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος συνίσταται στην μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλληση τους σε εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων, με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις.

Τα σύνθετα υλικά έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής κατά τις τελευταίες δεκαετίες στην παραγωγή τεράστιας ποικιλίας προϊόντων, που σχετίζονταν σε μεγάλο ποσοστό με την αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυσιπλοΐα, την αεροναυπηγική, τα είδη σπορ, μέρη ηλεκτρονικών συσκευών κλπ. Γι' αυτό και, παραδοσιακά, η μελέτη των συνθέτων υλικών αποτελούσε ένα από τα γνωστικά πεδία μηχανολόγων μηχανικών, αεροναυπηγών, χημικών μηχανικών, ηλεκτρολόγων κλπ. Η εικόνα αυτή έχει αλλάξει δραματικά τα τελευταία λίγα χρόνια, κατά τα οποία ένα μεγάλο τμήμα της παγκόσμιας παραγωγής συνθέτων υλικών (το 25% περίπου το έτος 2002) απορροφάται στο πεδίο των τεχνικών έργων. Οι εκτιμήσεις για την παγκόσμια χρήση των συνθέτων υλικών στο πεδίο των τεχνικών έργων προβλέπουν ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 3%, με την ετήσια κατανάλωση στο έτος 2007 να ξεπερνά τους 300.000 τόννους (Business Communications Co.,Inc.2002). Μάλιστα, ορισμένα από τα πιο αισιόδοξα σενάρια προβλέπουν ότι η χρησιμοποιούμενες ποσότητες συνθέτων υλικών στα τεχνικά έργα θα είναι στο μακρινό μέλλον συγκρίσιμες με αυτές άλλων υλικών, όπως είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα.

Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί από 20ετίας περίπου για την παραγωγή ράβδων οπλισμού ή τενόντων προέντασης σκυροδέματος, αγκυριών εδάφους, για την κατασκευή κτιρίων ειδικής χρήσης, ελαφρών γεφυρών, δεξαμενών, σιλό, και γενικά σε εφαρμογές όπου βασικό κριτήριο επιλογής υλικών είναι η ανθεκτικότητα σε διάρκεια, το χαμηλό βάρος και η υψηλή αντοχή (ή συνδυασμός αυτών). Το πεδίο όμως στο οποίο

τα σύνθετα υλικά έχουν τύχει εξαιρετικά ευρείας χρήσης σε όλο τον κόσμο σήμερα είναι αυτό τον ενισχύσεων (οι εφαρμογές ανά τον κόσμο αριθμούν ήδη μερικές δεκάδες χιλιάδες). Στο πεδίο αυτό, βασικά πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών είναι: η ανθεκτικότητα σε διάβρωση, το χαμηλό βάρος (περίπου  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{5}$  του χάλυβα), η εξαιρετικά υψηλή (εφελκυστική) αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα), η διαθεσιμότητα των υλικών σε πολύ μεγάλα μήκη και η μεγάλη «ευκαμψία» τους, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, ακόμα και σε δύσκολα προσβάσιμα τμήματα κατασκευών. Μειονεκτήματα τους είναι η πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, το σχετικά υψηλό κόστος (το οποίο μειώνεται όμως δραματικά χρόνο με το χρόνο) και η έλλειψη πλαστιμότητας (όχι όμως και παραμορφωσιμότητας, αποτέλεσμα της οποίας είναι η σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας στοιχείων σκυροδέματος σε πολλές περιπτώσεις).

Βασικό μειονέκτημα επίσης σχετικά με την εφαρμογή των συνθέτων υλικών στο πεδίο των ενισχύσεων είναι η σημαντική (αλλά δικαιολογημένη) έλλειψη «παιδείας» που διακρίνει τον τεχνικό κόσμο της χώρας, λόγω της σχετικά πρόσφατης (και ραγδαίας) ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνικής. Είναι γεγονός ότι η τεχνική της ενίσχυσης κατασκευών μέσω συνθέτων υλικών έτυχε εξαιρετικά ευρείας εφαρμογής στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια, κυρίως μετά το σεισμό των Αθηνών το 1999. Άποψη μάλιστα του συγγραφέα είναι ότι οι εφαρμογές της τεχνικής ήταν πολύ περισσότερες από αυτές που δικαιολογούσε η διαθέσιμη γνώση και εμπειρία, και σε κάποιες περιπτώσεις εσφαλμένες. Κλασσικά σφάλματα εφαρμογής ήταν η χρήση μανδύα (όχι συνεχούς μέσω των κόμβων !) σε υποστυλώματα με στόχο την αύξηση της καμπτικής αντοχής, η καθολική εφαρμογή «υφασμάτων» με τις ίνες σε μη ευθύγραμμη διάταξη σε φέρουσες τοιχοποιίες κ.ά. Έτσι λοιπόν, το βιβλίο αυτό γράφτηκε με την ελπίδα να καλύψει σε σημαντικό βαθμό το κενό που υπάρχει σήμερα στο πεδίο της εφαρμογής των συνθέτων υλικών, παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές διαστασιολόγησης ενισχύσεων σε συνδυασμό με απλά παραδείγματα. Παράλληλα, με την ευκαιρία αυτή ο συγγραφέας κρίνει σκόπιμο να τονίσει ότι η τεχνική των συνθέτων υλικών δεν αποτελεί πανάκεια: σίγουρα δίνει ενδιαφέρουσες λύσεις σε πληθώρα περιπτώσεων, σε κάποιες άλλες όμως δεν 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.

Η ραγδαία πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών τα τελευταία χρόνια, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πληθώρας νέων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές της επιστήμης του

Πολιτικού Μηχανικού, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών αποτυγχάνει να παρέχει μία ικανοποιητική λύση. Μεταξύ των προϊόντων αυτών σημαντική θέση κατέχουν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (fiber reinforced polymer composites), τα οποία αποτελούνται από 'υφάσματα' από ινώδη οπλισμένα πολυμερή εμποτισμένα με ειδικές εποξικές ρητίνες. Τα 'υφάσματα' αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων, αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυση τους. Λόγω κυρίως της ανθεκτικότητας τους σε ηλεκτροχημική διάβρωση και του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, αποτελούν μία πολύ καλή εναλλακτική επιλογή για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαπενταετίας, στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων και δραστηριοτήτων, ερευνητές από διάφορα μέρη του κόσμου έχουν αναπτύξει πολλές εφαρμογές σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή για την όπλιση και προένταση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, τη σεισμική ενίσχυση κατασκευών τόσο από οπλισμένο σκυρόδεμα όσο και από άοπλη τοιχοποιία, την ενίσχυση γεφυρών και κτιριακών κατασκευών, κτλ. Οι προσπάθειες των ερευνητών αυτών είχαν ως αποτέλεσμα μία πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά, με τις πρώτες ευρείας κλίμακας εφαρμογές να αναφέρονται στις αρχές της περασμένης δεκαετίας.

Η πρώτη ευρείας κλίμακας εφαρμογή σύνθετων υλικών αφορά στην ενίσχυση δύο χιλιάδων βάρων γεφυρών στην περιοχή Yolo δυτικά του Sacramento, πρωτεύουσας της Καλιφόρνια, στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας. Γρήγορα η χρήση τους επεκτάθηκε στην ενίσχυση πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε πολλά άλλα κράτη της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ασίας. Αποτελεί χαρακτηριστικό γεγονός ότι στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή αυξήθηκε την περίοδο 1992-1995 και κυρίως μετά το σεισμό του Hyogo-ken-Nanpu το 1995 κατά 500%. Στην Ελλάδα εφαρμογές πολιτικού μηχανικού αναφέρονται από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Χαλκίδα). Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό μανδύων από σύνθετα υλικά είναι αντίστοιχες με τις αρχές σχεδιασμού των μεταλλικών μανδύων. Σε σύγκριση με τη χρήση μεταλλικών ελασμάτων για την ενίσχυση δομικών στοιχείων, η εναλλακτική εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι εξαιρετικές ιδιότητες βάρους προς αντοχή, η διαθεσιμότητα του υλικού σε σχετικά απεριόριστο μήκος, η συγκριτικά ευκολότερη εγκατάσταση και η ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τα σύνθετα υλικά μία πολύ ελκυστική εναλλακτική πρόταση. Γενικά, η εφαρμογή των υλικών αυτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή ορθότερα την τροποποίηση της καμπτικής,

διατμητικής και αξονικής αντοχής στο οποίο εφαρμόζεται. στο οποίο εφαρμόζεται. Η εξωτερική ενίσχυση με μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή είναι κατάλληλη για πληθώρα εφαρμογών. Αντιπροσωπευτικές χρήσεις είναι οι ακόλουθες:

- Ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Ως παράδειγμα αναφέρεται μεταξύ άλλων η ενίσχυση κτιρίων στάθμευσης αυτοκινήτων στο Μόναχο της Γερμανίας και στο Δουβλίνο της Ιρλανδίας, καθώς και βιομηχανικών κτιρίων στην πόλη Zug της Ελβετίας.
- Παθητική περίσφιγξη για βελτιστοποίηση της ικανότητας ανάληψης σεισμικών φορτίων. Χαρακτηριστικές εφαρμογές αποτελούν η ενίσχυση της γέφυρας Osaka στη Νότια Κορέα και η ενίσχυση της οδογέφυρας Belo Horizonte στο Σάο Πάολο της Βραζιλίας.
- Έλεγχος ρηγματώσεως και συρραφή ρωγμών. Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί και για την επισκευή και ενίσχυση διατηρητέων κτιρίων ,μνημείων και ιστορικών και αρχαιολογικών κτισμάτων που έχουν υποστεί ρηγματώσεις και άλλου είδους βλάβες .Ενδεικτικά αναφέρεται η ενίσχυση του τρούλου του ιστορικού καθεδρικού ναού στη British Columbia του Καναδά.

Παρ' όλες τις υψηλές προσδοκίες που έχουν καλλιεργηθεί, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή έχει μία σχετικά βραχύχρονη ιστορία. Κατά συνέπεια, η απόφαση για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών με ινοπλισμένα πολυμερή πρέπει να λαμβάνεται με ιδιαίτερη προσοχή και αφού συνεξεταστούν όλες οι υπόλοιπες εναλλακτικές επιλογές. Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει γενικά να αποφεύγεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Η κατάσταση της υπόστρωσης πάνω στην οποία θα εφαρμοστούν τα σύνθετα υλικά είναι άγνωστη ή έχει υποστεί σημαντική απομείωση της αντοχής της.
- Υπάρχει σε εξέλιξη σημαντική διάβρωση του σιδηροπλισμού.
- Δεν υπάρχει σιδηροπλισμός που να εξασφαλίζει την πλάστιμη συμπεριφορά του μέλους που πρόκειται να ενισχυθεί.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους επισκευής και ενίσχυσης με χρήση συμβατικών υλικών είναι τα εξής:

- Απαιτείται μικρή προετοιμασία στο εργοτάξιο . Η εκκένωση του χώρου δεν είναι αναγκαία και η όχληση στους χρήστες είναι ελάχιστη . Η προετοιμασία των προς ενίσχυση στοιχείων είναι μικρή και σύντομη.



- Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι απλή. Οι διαστάσεις του ενισχυόμενου δομικού στοιχείου παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες ,λόγω του μικρού πάχους του σύνθετου υλικού.
- Η τοποθέτηση των σύνθετων υλικών είναι δυνατή ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχει περιορισμός του χώρου εργασίας (π.χ. υποστυλώματα σε μεσοτοιχία).
- Το βάρος των σύνθετων υλικών είναι μικρό και για την τοποθέτηση τους δεν απαιτείται βαρύς ή ειδικός εξοπλισμός.
- Τα σύνθετα υλικά μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του έργου.
- Τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά των κατασκευών παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα.
- Το κόστος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι ανάλογο των παραδοσιακών μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης.

Ως επίλογος αξίζει να αναφερθεί ότι οι μηχανικοί που επιλέγουν τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών για την ενίσχυση μίας κατασκευής βρίσκονται αντιμέτωποι με μία μεγάλη πρόκληση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η τεχνολογία τους δεν είναι ευρέως γνωστή στον τεχνικό κόσμο σε σύγκριση με την αντίστοιχη τεχνολογία των συμβατικών υλικών επισκευής και ενίσχυσης, όπως είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό το παρόν κεφάλαιο είναι σχετικά εκτεταμένο, έτσι ώστε πολλές από τις έννοιες που σχετίζονται με τη χρήση σύνθετων υλικών να αποσαφηνιστούν όσο το δυνατόν πληρέστερα.

## **1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

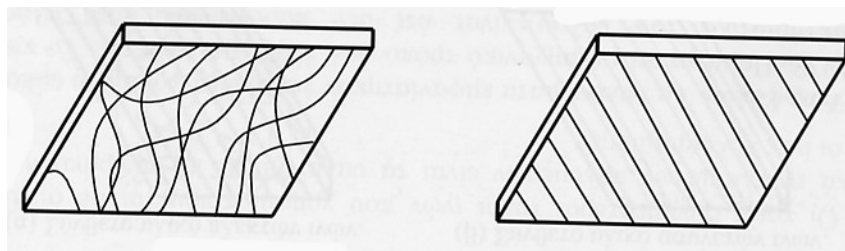
Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών συνιστά ένα δομικό στοιχείο από *σύνθετο υλικό*. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή στα οποία κυρίως εστιάζεται αυτό το κεφάλαιο, έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Η συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών πάνω στο μαλακότερο υλικό της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.

- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

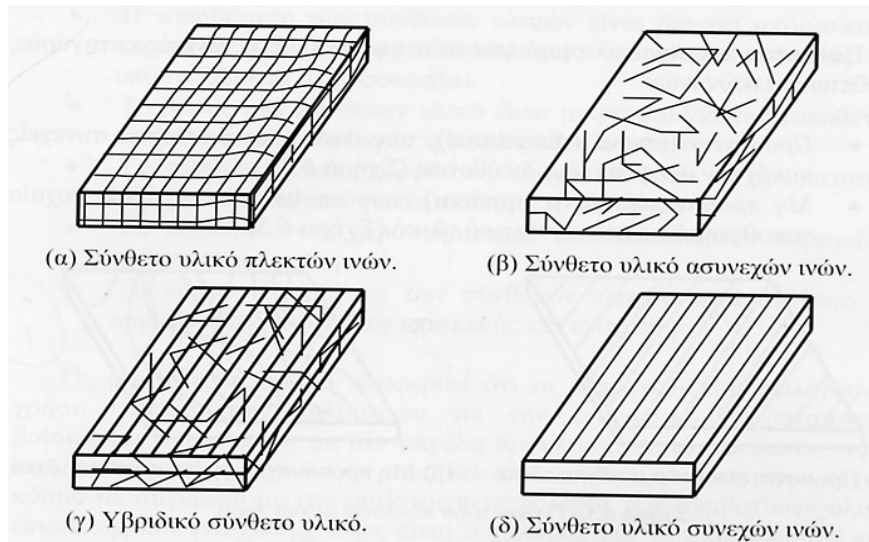
Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών

- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Μη προσανατολισμένα (RANDOM), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό .



Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- Πλεκτών ινών (woven fiber), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης. Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
- Ασυνεχών ινών (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των προσανατολισμένων σύνθετων υλικών συνεχών ινών (directional continuous fibrous composites). Λόγω του προσανατολισμού των ινών, το σύνθετο υλικό που προκύπτει συμπεριφέρεται ανισοτροπικά, σε αντιστοιχία με τη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά δίνει στο μελετητή τη δυνατότητα να διευθετήσει κατά τέτοιο τρόπο τις στρώσεις του σύνθετου υλικού έτσι ώστε να ενισχύσει το μέλος στη διεύθυνση που αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις.

### **1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης - παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας

ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

### **1.3.1 ΥΛΙΚΑ ΙΝΩΝ**

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες **πολυαραμιδης**.

**(α) Ίνες Ύαλου.** 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. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-8. Αν και, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, ο ύαλος-3 έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο.

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμιδης, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο ύαλος 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.

**(β) Ίνες Άνθρακα.** Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της

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

δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγιόν με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000°C). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα 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 εφελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στην

κρυσταλλική δομή.

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και 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.

**(γ) Ίνες Πολυαραμιίδης.** Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμιίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμιίδης 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 πολυαραμιίδης έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή 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. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

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

- Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως και οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση. Οι ίνες γραφίτη περιέχουν κατά τουλάχιστον 99% άνθρακα, ενώ το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.
- Ίνες βορίου: έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0.05-0,2mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.
- Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

### **1.3.2 ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και, ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεση τους.

Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στην 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. Παρόλ' 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 σχεδόν σαν ομογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την 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 την 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 στον παρακάτω πίνακα.

**(α) Εποξικές Ρητίνες.** 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 ξηράνσεως 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 δύο άλλες κατηγορίες ρητινών.

**β) Πολυεστερικές Ρητίνες.** Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των

| Είδος ρητίνης | Εφελκυστική αντοχή (MPa) | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | Επιμήκυνση θραύσης (%) | Πυκνότητα (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                     |

πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίδες. 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 το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλέγει 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 εποξικές 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.

**(γ) Βινυλεστερικές Ρητίνες.** Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες

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

Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξης του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

### **1.3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ**

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Στον Πίνακα παρουσιάζονται η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος μίας στρώσης των δύο συνηθέστερων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης. Στη διάθεση του μηχανικού βρίσκονται επίσης με τη μορφή ελασμάτων μικρού πλάτους (60 - 100 mm) και πάχους της τάξης του 1.5 mm προκατασκευασμένα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα τα οποία επικολλούνται στο σκυρόδεμα μέσω ρητίνης. Εφαρμόζονται κυρίως για την ενίσχυση πλακών και δοκών.

| Τύπος σύνθετου υλικού                           | Εφελκυστική αντοχή (MPa) | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | Πάχος στρώσης (mm) |
|---|--------------------------|---------------------------|--------------------|
| Υαλονήματα και εποξική ρητίνη                   | 1800 – 4300              | 65 – 80                   | 0.30 – 1.30        |
| Ανθρακονήματα υψηλής αντοχής και εποξική ρητίνη | 2200 – 4300              | 200 – 450                 | 0.12 – 0.60        |

### **1.4 ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

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:



$$V_f + V_m + V_u = 1$$

$$w_f + w_m = 1$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Όπου  $v_f, v_m$  και  $v_u$  είναι οι λόγοι όγκου των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα και ισούνται με  $v_i = V_i/V$  όπου  $V$  ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού και  $V_i$  με  $i = f, m, u$  ο όγκος των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα. Επίσης,  $w_f$  και  $w_m$  είναι οι λόγοι βάρους των ινών και της ρητίνης και ισούνται με  $w_i = W_i/W$  όπου  $W$  το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού και με  $i = f, m$  το βάρος του αντίστοιχου συστατικού στοιχείου. Τέλος  $\rho_f, \rho_m$  και  $\rho_c$  είναι οι πυκνότητες των ινών, της ρητίνης και η συνολική του σύνθετου υλικού, αντίστοιχα. Επίσης η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού  $E$  με το μέτρο ελαστικότητας των ινών  $E_f$  και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας  $E_m$  είναι η ακόλουθη:

$$E = E_f v_f + E_m v_m$$

Όσον αφορά στην εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών, δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του συνδετικού υλικού. Πρακτικά αστοχία της ίνας συνεπάγεται αστοχία του σύνθετου υλικού.

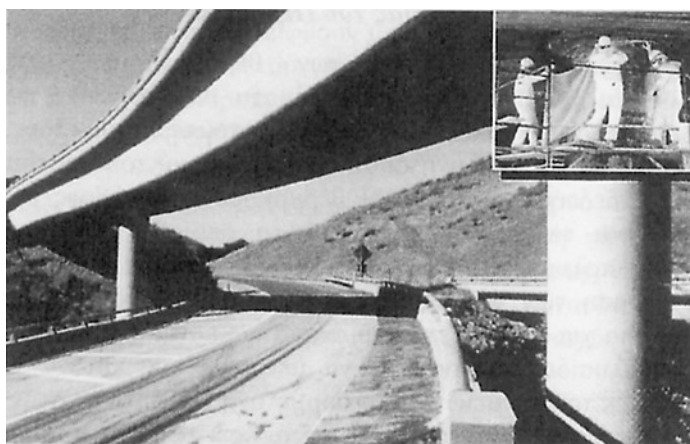
## **1.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**

### **1.5.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα και είχαν ως συστατικά στοιχεία φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική παραγωγή υαλονημάτων ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1930 και ουσιαστικά σηματοδοτεί τη γέννηση των σύνθετων υλικών προηγμένης τεχνολογίας. Τα σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών από υπόγειες δεξαμενές καυσίμων έως ύφαλα πλοίων και πολεμικά αεροσκάφη. Αρχικά, λόγω του υπερβολικού κόστους και των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών περιορίστηκαν στην αεροναυπηγική, τη χημική βιομηχανία και τη ναυπηγική. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυση τους πρωτοεφαρμόστηκε στην Ελβετία το 1984. Το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Καλιφόρνια (CALTRANS) πρωτοπόρησε με τη χρήση 'υφασμάτων' ινοπλισμένων πολυμερών για τη σεισμική ενίσχυση βάρων γεφυρών στην Καλιφόρνια πριν από περίπου μία δεκαετία. Η συμπεριφορά των συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης

κατασκευών με σύνθετα υλικά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών κατά την τελευταία εικοσαετία έχει δοκιμαστεί με εξαιρετική επιτυχία και ιδιαίτερα σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία, η Αυστραλία, κτλ.

Τα μόνα στοιχεία που διαθέτουμε για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν εγκατασταθεί σήμερα σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού προέρχονται από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και από την προβολή στο χρόνο συμπερασμάτων που αφορούν στην τρέχουσα κατάσταση των υλικών αυτών. Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία πρόοδος που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών, όσον αφορά τόσο στις ιδιότητες όσο και στη διαδικασία παραγωγής τους, έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής των ινοπλισμένων πολυμερών και δραματική αύξηση εφαρμογής τους σε τεχνικά έργα. Σήμερα το ¼ της παραγωγής σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Στη χώρα μας οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώθηκαν ιδιαίτερα μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999.



### **1.5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

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

- Θερμοκρασία: από -30°C έως 60°C για μακρά έκθεση και 650°C έως 1100°C για βραχεία έκθεση (μικρότερη από 2 ώρες) σε φωτιά.
- Υγρασία: πλήρης βύθιση σε γλυκό ή αλμυρό νερό για έκθεση μακράς διάρκειας από 0°C έως 40°C.
- pH: από 3.0 έως 10.0 για μακρά χρήση.

- Υπεριώδης ακτινοβολία: δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας ίσος με 10.0 για μακρά έκθεση.
- Υδρογονάνθρακες: απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας για μακρές χρονικές περιόδους.

Σε εφαρμογές σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον, π.χ. ενίσχυση πασσάλων στη θάλασσα, απαιτείται χρήση ειδικών ρητινών με ίνες άνθρακα ή υάλου. Αξίζει να τονιστεί ότι οι προδιαγραφές ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να περιέχουν στοιχεία για έκθεση του συστήματος σε κάθε μία από τις παραπάνω συνθήκες για περιόδους έως 10000 ώρες.

### **1.5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

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 ικανότητα 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 80X. 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 ψαθυρή μορφή αστοχίας, αλλά και μείωση της αντοχής σε κρούση. Πειράματα που έχουν γίνει σε μεμονωμένες στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς, δεν έχουν δείξει απομείωση της αντοχής των ινών λόγω επαναλαμβανόμενης εναλλαγής ψύξης-απόψυξης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο σε συνθήκες τριετούς

σταθερής έκθεσης όσο και επιταχυνόμενης έκθεσης για την προσομοίωση πεντηκονταετούς πραγματικής έκθεσης. Η μοναδική αλλοίωση της εποξικής ρητίνης που διαπιστώθηκε με τη μέθοδο της υπέρυθρης φασματοσκόπησης περιοριζόταν στην επιφανειακή της στρώση, χωρίς να επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς. Επίσης ανακυκλιζόμενες ψύξεις και αποψύξεις είχαν μικρή ή καθόλου επίδραση σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών όταν για την παρασκευή τους είχαν χρησιμοποιηθεί υλικά υψηλής ποιότητας και αντοχής σε υγρασία.

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, εκτός εάν επιχριστούν ή επαλειφθούν με ειδική ρητίνη. 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 υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης, η τοποθέτηση επιχρίσματος αποτελεί οικονομικότερη λύση και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα βαφής και διακοσμητικής επέμβασης στο δομικό στοιχείο που ενισχύεται.

#### **1.5.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΟ ΝΕΡΟ**

Το νερό αποτελεί εν γένει εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον για όλα τα δομικά υλικά. Ο χάλυβας οξειδώνεται, το σκυρόδεμα ενανθρακώνεται, το ξύλο σαπίζει, οι ρητίνες μπορούν να αποσχιστούν λόγω σκλήρυνσης της αλυσίδας του πολυμερούς και ο ύαλος μπορεί να χάσει την εφελκυστική του αντοχή. Κατά συνέπεια, η κύρια μέριμνα όσον αφορά στα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι η αντοχή της μήτρας από ρητίνη σε παρατεταμένη έκθεση σε νερό. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στη διάρκεια των εξήντα περίπου χρόνων που ινοπλισμένα πολυμερή υαλονημάτων χρησιμοποιούνται για την επένδυση υφάλων πλοίων, δεν έχει παρατηρηθεί απομείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων λόγω σήψης ή διάβρωσης, με αποτέλεσμα, όταν τα πλοία αυτά εγκαταλείπονται, να μην υπάρχει εύκολος τρόπος αποσύνθεσης τους. Το παραπάνω παράδειγμα δεν σημαίνει ότι η υγρασία δεν έχει επίδραση στη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών, αλλά ότι η επίδραση είναι μικρή 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 τα υαλονήματα και το σύνθετο υλικό γίνεται

εξαιρετικά εύθραυστο.

Η μήτρα από ρητίνη απορροφά νερό. Η ποσότητα του νερού που απορροφάται εξαρτάται από το είδος της ρητίνης και τη θερμοκρασία του νερού. Οι άμεσες συνέπειες της απορρόφησης νερού από τη μήτρα είναι συνήθως οι ακόλουθες δύο: πρώτον, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου ( $T_g$ ) μειώνεται και, δεύτερον, η ρητίνη χάνει τη δυσκαμψία της. Και τα δύο φαινόμενα είναι μερικώς ανατρέψιμα σε συστήματα με εποξικές ρητίνες. Αντίθετα, στις πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες, οι μεταβολές μπορεί να είναι είτε αναστρέψιμες είτε όχι, ανάλογα με το χρόνο και τη 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  $10^\circ\text{C}$ .

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

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

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

Πλήρης στεγάνωση στοιχείων σκυροδέματος με σύνθετα υλικά δημιουργεί στεγανές εξωτερικές επιφάνειες σε νερό με αποτέλεσμα την προστασία τους από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι σε στοιχεία τα οποία πρέπει να 'αναπνέουν', π.χ. πλάκες, συνιστάται να αποφεύγεται η τοποθέτηση καθολικού μανδύα σύνθετου υλικού.

Με την *επιλογή* της κατάλληλης ρητίνης, ινοπλισμένα πολυμερή ανθρακονημάτων μπορούν να εφαρμοστούν σε κατασκευές που είναι μέσα στο νερό. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί κανείς να αξιοποιήσει τη δυνατότητα που έχουν τα σύνθετα υλικά να αυξάνουν την πλαστικότητα, την αντοχή και τη δυσκαμψία των στοιχείων στα οποία

εφαρμόζονται, αλλά και να τα χρησιμοποιήσει ως στεγανωτική μόνωση. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η θεμελίωση κατασκευών στη θάλασσα, η ενίσχυση λιμενικών εγκαταστάσεων, η ενίσχυση και στεγάνωση σηράγγων και αγωγών μεγάλων διαστάσεων, κτλ.

#### **1.5.5 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ**

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) προκαλεί μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών. Ένδειξη αποτελεί σε εκτεθειμένες επιφάνειες η μικρό ρηγμάτωση και η χρωματικά αλλοίωση. Για την προστασία προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών βαφών.

#### **1.5.6 ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

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.

#### **1.5.7 ΕΡΠΥΣΜΟΣ**

Μεταξύ όλων των συστατικών στοιχείων ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες, μόνο τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα δεν υπόκεινται σε ερπυσμό. Τόσο οι ίνες πολυαραμιδής όσο και οι μήτρες των ρητινών, άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο, παρουσιάζουν ερπυσμό. Ο βαθμός του ερπυσμού είναι συνάρτηση του υλικού της ίνας και του προσανατολισμού των ινών σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση. Εάν πρόκειται για ίνες υάλου ή άνθρακα, οι οποίες δεν 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 μπορεί να ολισθαίνει στις θέσεις που αγκυρώνεται, ενώ υπάρχει επίσης η πιθανότητα επιπλέον έντασης των ινών λόγω χαλάρωσης της μήτρας του πολυμερούς, ακόμα και μετά την απομάκρυνση της εξωτερικής φόρτισης. Αν και τα παραπάνω φαινόμενα προκαλούν 'έκταση' του σύνθετου υλικού, δεν αποτελούν πραγματικό ερπυσμό και τα περισσότερα έχουν ασήμαντες επιδράσεις στις διαστάσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς. Στην περίπτωση όμως που ο άξονας των ινών βρίσκεται εκτός του επιπέδου της φόρτισης ή οι ίνες είναι από πολυαραμιδίδη, μπορεί να είναι σημαντική η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού του σύνθετου υλικού.



Σε εφαρμογές σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών σε σεισμό ο ερπυσμός σπάνια αποτελεί φαινόμενο προεξέτασης διότι τα σύνθετα υλικά θα αναπτύξουν τάσεις μόνο για τα πρόσθετα φορτία επιπλέον του ιδίου βάρους και επίσης το υφιστάμενο σκυρόδεμα έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των φαινομενικών παραμορφώσεων του.

#### **1.5.8 ΘΡΑΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΛΟΓΩ ΕΝΤΑΣΗΣ**

Στα περισσότερα ινοπλισμένα πολυμερή παρατηρείται το φαινόμενο της θραύσης λόγω έντασης υπό διατηρούμενη φόρτιση. Η διάβρωση λόγω έντασης συμβαίνει όταν η ατμόσφαιρα που περιβάλλει το σύνθετο υλικό περιέχει διαβρωτικά στοιχεία, αλλά όχι επαρκή ώστε να προκαλέσουν διάβρωση του υλικού χωρίς την ταυτόχρονη δράση διατηρούμενης φόρτισης. Και 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.

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 εποξικές 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. Όσον αφορά στις ίνες, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά όταν χρησιμοποιούνται για την ανάληψη μόνιμων φορτίων.

#### **1.5.9 ΚΟΠΩΣΗ**

Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή συμπεριφέρονται καλύτερα από το σκυρόδεμα ή το χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα ανθρακονήματα είναι καλύτερα από τις ίνες

πολυαραμιίδης, οι οποίες είναι με τη σειρά τους καλύτερες από τα υαλονήματα. Ειδικά για σύνθετα υλικά με ίνες από άνθρακα η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού. Η αντίστοιχη κατάταξη των ρητινών, όσον αφορά στην αντοχή τους σε κόπωση, είναι εποξικές, 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, λόγω 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 10 Hz, έτσι ώστε να προλαμβάνεται η έκλυση θερμότητας στο πολυμερές, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πρόωμη αστοχία της μήτρας και στη συνέχεια ολόκληρου του συστήματος του πολυμερούς.

#### **1.5.10 ΚΡΟΥΣΗ**

Όσον αφορά στην επίδραση της κρούσης την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν κατά σειρά τα σύνθετα υλικά με ίνες πολυαραμιίδης (είναι χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων), ακολουθούν αυτά με ίνες υάλου και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

### **1.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Η διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια, την *προετοιμασία* της επιφάνειας του δομικού στοιχείου στο οποίο γίνεται η επέμβαση και την *επικόλληση* των στρώσεων του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια αυτή. Πρέπει να τονιστεί ότι η προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου στην οποία θα επικολληθεί το σύνθετο υλικό αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη της επιδιωκόμενης συμπεριφοράς του ενισχυμένου στοιχείου, καθώς από αυτήν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συνεργασία παλαιού και νέου υλικού.

#### **1.6.1 ΣΥΜΦΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**

Τα σύνθετα υλικά επικολλούνται στα δομικά στοιχεία με χρήση διαφόρων συγκολλητικών ουσιών, όπως είναι οι εποξικές κόλλες, οι πολυεστερικές κόλλες, κτλ.. Οι ουσίες αυτές εξασφαλίζουν τη διαρκή σύνδεση και από κοινού λειτουργία του ινοπλισμένου πολυμερούς με το σκυρόδεμα του στοιχείου μέσω της διατμητικής τάσης που *μεταφέρεται* στη διεπιφάνεια επαφής τους. Οι κυριότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί η συγκολλητική ουσία είναι οι ακόλουθες:

- Επαρκής αντοχή σε υγρασία και ερπυσμό.
- Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου ( $T_g$ ) τουλάχιστον ίση με 45°C.



- Ελάχιστη διατμητική αντοχή στους 20°C ίση με 18 MPa.
- Ικανότητα πλήρωσης κενών και εφαρμογής σε κατακόρυφες και ανεστραμμένες επιφάνειες.
- Ανθεκτικότητα στην αλκαλική φύση του σκυροδέματος.

Οι συγκολλητικές ουσίες συνδέουν δύο υλικά επικολλώντας στις επιφάνειες τους μία στρώση απειροελάχιστων διαστάσεων, της τάξης των 0.1-0.5 mm. Ο όρος *σύμφυση* αναφέρεται στις εφελκυστικές μοριακές δυνάμεις που δρουν κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών. Λόγω της υγρής τους φύσης, οι συγκολλητικές ουσίες ρέουν πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες της στερεάς επιφάνειας και, καθώς έρχονται σε επαφή με αυτή, αλληλεπιδρούν μέσω των μοριακών τους δυνάμεων. Στη συνέχεια, η ουσία στερεοποιείται και έτσι επιτυγχάνεται η σύνδεση των δύο υλικών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη ικανοποιητικής σύμφυσης, είναι η άμεση επαφή μεταξύ της συγκολλητικής ουσίας και των δύο υποστρωμάτων, καθώς και η απουσία αδύναμων και ενανθρακωμένων στρώσεων ή σκόνης από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στο, η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από την ομοιόμορφη διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας, η οποία πρέπει να σχηματίζει μία πολύ λεπτή στρώση χωρίς να διαιρείται σε επιμέρους σταγονίδια.

### **1.6.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Λόγω της σύνθετης σύστασης του σκυροδέματος, η επιφάνεια του μπορεί να περιέχει εκτεθειμένα αδρανή, άμμο, άνυδρα σωματίδια τσιμέντου και τσιμεντοκονίας, καθώς επίσης ρωγμές και κενά. Σκοπός της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι η απομάκρυνση-τυχόν αδύναμων ή ενανθρακωμένων στρώσεων, καθώς και η εξομάλυνση της, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συγκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού σε αυτή.

Η προετοιμασία της επιφάνειας έχει γενικά πολύ μεγαλύτερη επίδραση στη μακρόχρονη παρά στη βραχύχρονη αντοχή της σύνδεσης. Για το λόγο αυτό, η προσεκτική προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνδέεται άμεσα με τη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου με την πάροδο του χρόνου.

Σε πολλές εφαρμογές επισκευής και ενίσχυσης, οι εργασίες στην επιφάνεια του σκυροδέματος εκτελούνται επιτόπου υπό αντίξοες συνθήκες. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προετοιμασίας είναι άμεση συνάρτηση του προσανατολισμού της επιφάνειας του σκυροδέματος (οριζόντια, κατακόρυφη, ανεστραμμένη, κτλ.), αλλά και διαφόρων άλλων παραμέτρων, όπως είναι το κόστος, η κλίμακα και η τοποθεσία του έργου, η εύκολη πρόσβαση στα υλικά και τον εξοπλισμό, καθώς και απαιτήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια και την υγιεινή του προσωπικού.

Ουσιαστικά, ο αντικειμενικός σκοπός της προεργασίας που γίνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, είναι η απομάκρυνση της εξωτερικής, μειωμένης αντοχής και ενδεχομένως ενανθρακωμένης, επιφανειακής στρώσης, με ταυτόχρονη έκθεση αδρανών μικρού έως μεσαίου μεγέθους . Ο σκοπός αυτός πρέπει να επιτευχθεί χωρίς να προκληθούν μικρορωγμές ή άλλες βλάβες στην υποκείμενη στρώση που θα μειώσουν την αντοχή της. Τυχόν μεγάλα κενά, οπές και ρωγμές μεγάλου εύρους πρέπει να πληρωθούν με κατάλληλα κονιάματα ή ρητινενέσεις πριν την εφαρμογή της συγκολλητικής ουσίας. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η δημιουργία μίας στρώσης σχετικά ομοιόμορφου πάχους και μεγιστοποιείται η ικανότητα μεταφοράς διατμητικής τάσης. Η διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνιστάται να περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Απομάκρυνση βλαμμένου σκυροδέματος ή σκυροδέματος που δεν πληροί τις προδιαγραφές και αντικατάσταση με υλικό καλής ποιότητας.
- Απομάκρυνση σκυροδέματος υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο κατά προτίμηση με αμμοβολή.
- Απομάκρυνση σκόνης και θραυσμάτων με χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Μετά την προεργασία, συνιστάται η καταλληλότητα της επιφάνειας να ελεγχθεί με τη μέθοδο του εξολκέα, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο των μεθόδων διάγνωσης βλαβών. Το χρονικό κενό μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των στρώσεων του σύνθετου υλικού καλό είναι να διατηρείται όσον το δυνατόν μικρότερο, ώστε να προλαμβάνεται περαιτέρω ενανθράκωση του σκυροδέματος.

### **1.6.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Συνοπτικά, η διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Καθαίρεση του επιχρίσματος.
- Αποκατάσταση των ενδεχόμενων βλαβών με χρήση κατάλληλης μεθόδου.
- Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση της επιφάνειας ,λάξευση γωνιών κτλ.).
- Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική ρητίνη ή άλλη κατάλληλη συγκολλητική ουσία.
- Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Συνιστάται η πλήρης επαφή του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση χρήσης υλικών τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται μόνο μία στρώση.
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυριών όπου απαιτείται (τοιχεία, άνω παρειές δοκών ,κτλ.).

- Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου, υλικού σύμφωνα με τη μελέτη επισκευής /ενίσχυσης .
- Μετά τη σκλήρυνση του συστήματος (περίπου μετά από 24ώρες), εφαρμογή επιχρίσματος και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με βάση αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις.

## **1.7 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό της ενίσχυσης τόσο γραμμικών στοιχείων - υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων και δοκών - όσο και επιφανειακών στοιχείων - πλακών - από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με την εφαρμογή των σύνθετων υλικών μπορεί να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της καμπτικής και διατμητικής *αντοχής* των ενισχυόμενων στοιχείων με πρακτικά μηδενική επιβάρυνση του βάρους τους. Ειδικά για την περίπτωση γραμμικών στοιχείων, τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται επιπλέον για την επιβολή *εξωτερικής περίσφιγξης* στο στοιχείο μέσω της οποίας επιτυγχάνεται αύξηση τόσο της *θλιπτικής αντοχής* του σκυροδέματος όσο και της *πλαστιμότητας* του στοιχείου.

Η διαστασιολόγηση βασίζεται στην ικανοποίηση της συνθήκης συμβιβαστού των παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος, υπάρχοντος σιδηροπλισμού και σύνθετου υλικού. Πρέπει να τονιστεί ότι απαραίτητη προϋπόθεση του σχεδιασμού ενίσχυσης με χρήση σύνθετων υλικών είναι ο αποκλεισμός της αποκόλλησης του ινοπλισμένου πολυμερούς από την επιφάνεια του στοιχείου που ενισχύεται κατά την επιβολή των φορτίων.

### **1.7.1 ΕΠΙΒΟΛΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Η τεχνική της επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης με τοποθέτηση μανδύων από σύνθετα υλικά εφαρμόζεται κυρίως σε υποστυλώματα κτιρίων και βάθρα γεφυρών. Η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή είναι αποδοτικότερη για στοιχεία κυκλικής και τετραγωνικής διατομής. Για υποστυλώματα με ορθογωνική διατομή, η απόδοση της εφαρμογής περιορίζεται όσο αυξάνεται ο λόγος των πλευρών της διατομής του υποστυλώματος. Προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης περίσφιγξη ορθογωνικής διατομής, απαιτείται η τροποποίηση του σχήματος της διατομής, είτε με λάξευση των γωνιών της είτε με τοποθέτηση πρόσθετου σκυροδέματος, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία συνεχής καμπύλη επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί ο μανδύας. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της περίσφιγξης μπορεί να έχουν μία από τις ακόλουθες μορφές:

- Ολόσωμοι μανδύες που αποτελούνται από στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών, οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά σε όλο το ύψος του προς ενίσχυση στοιχείου.

- Μανδύες περιορισμένου ύψους ('κολάρα') που αποτελούνται από μεμονωμένες λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών.
- Προεντεταμένοι μανδύες περιορισμένου ύψους από ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή ταινιών 'πακεταρίσματος'.
- Ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή σπειροειδούς οπλισμού, ο οποίος περιελίσσεται στην εξωτερική επιφάνεια του προς ενίσχυση στοιχείου κατ' αντιστοιχία με το συνήθη σπειροειδή σιδηροπλισμό που χρησιμοποιείται για την όπλιση του στοιχείου.

Μέσω της εξωτερικής περίσφιγξης που επιβάλλει ο μανδύας σύνθετων υλικών, εισάγεται τριαξονική θλίψη στο σκυρόδεμα και έτσι επιτυγχάνεται αύξηση τόσο της θλιπτικής του αντοχής του όσο και της πλαστιμότητας του στοιχείου έναντι του πρόσθετου φορτίου που καλείται να αναλάβει μετά την επέμβαση. Επιπλέον με το μανδύα σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να αποτραπεί ο λυγισμός των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ των υπάρχοντων συνδετήρων στις περιοχές σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων. Τέλος, όταν το διατιθέμενο μήκος υπερκάλυψης των διαμηκών οπλισμών στις περιοχές των ενώσεων δεν είναι επαρκές, είναι δυνατό μέσω της εξωτερικά επιβαλλόμενης περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετων υλικών να επιτευχθεί βελτίωση των συνθηκών αγκύρωσης και κατά συνέπεια να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας των ματιζομένων ράβδων οπλισμού του στοιχείου.

#### ΑΥΞΗΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε, οι μανδύες σύνθετων υλικών τοποθετούνται στις εξωτερικές επιφάνειες υποστρωμάτων για να αυξήσουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής επιτυγχάνεται με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, των οποίων οι ίνες είναι προσανατολισμένες κάθετα στον άξονα του στοιχείου.

**(α) Κυκλική Διατομή.** Η αυξημένη λόγω εξωτερικής περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετου υλικού θλιπτική αντοχή  $f_{cc}$  του σκυροδέματος κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:\*

$$f_{cc} = f_{co} [2,25(1 + 7,94f_i/f_{co})^{1/2} - 2f_i/f_{co} - 1,25]$$

με  $f_i = 0.26\rho_{sj}f_{uj}$

όπου  $f_{co}$  είναι η θλιπτική αντοχή του υπάρχοντος σκυροδέματος,  $f_i$  η τάση περίσφιγξης,  $f_{uj}$  η μέγιστη εφελκυστική τάση του μανδύα σύνθετου υλικού και  $\rho_{sj}$  το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης σκυροδέματος από το μανδύα σύνθετου υλικού. Το  $\rho_{sj}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{sj} = 4nt_j/D$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού και  $t_j$  το πάχος

μίας στρώσης.

**(β) Ορθογωνική Διατομή.** Η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή  $f_{cc}$  του σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής διαστάσεων  $bxd$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_{cc} = f_{co}(1 + 1,5\rho_{sj})$$

όπου  $f_{co}$  είναι η θλιπτική αντοχή του υπάρχοντος σκυροδέματος και  $\rho_{sj}$  το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης σκυροδέματος από το μανδύα σύνθετου υλικού, το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_{sj} = 2n t_j(b+d)/(bd)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού και  $t_j$  το πάχος μίας στρώσης.

### **1.7.2 ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ**

Για την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων κυκλικής και ορθογωνικής διατομής χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά με προσανατολισμό των κυρίων ινών τους κάθετα στον άξονα του στοιχείου. Όπως προαναφέρθηκε, η αύξηση της πλαστιμότητας επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη τριαξονικής θλίψης που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα της διατομής με περίσφιγξη. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αύξηση της πλαστιμότητας, ενδείκνυται να λαξεύονται οι γωνίες των ορθογωνικών διατομών με ακτίνα όχι μικρότερη από 2 cm, πριν την τοποθέτηση του μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς.

Όταν η τιμή της ανηγμένης αξονικής που ασκείται στο στοιχείο είναι μεγαλύτερη του 0.30, τότε το μήκος περίσφιγξης πρέπει να αυξάνεται κατά 50%. Επίσης, το απαιτούμενο πάχος του μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς συνιστάται να αυξάνεται κατά 33% για πρόσθετη προστασία των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό. Με τη χρήση μανδύα σύνθετων υλικών αυξάνεται στην απαιτούμενη τιμή της τόσο η γενική πλαστιμότητα μετακίνησης του φορέα  $\mu_d$  όσο και η τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας  $\mu_c$  στις θέσεις πλαστικών αρθρώσεων των επιμέρους στοιχείων που ενισχύονται. Η ύπαρξη επαρκούς πλαστιμότητας καμπυλότητας στις θέσεις που αναμένεται ο σχηματισμός των πλαστικών αρθρώσεων είναι αναγκαία, έτσι ώστε να επιτρέψει τη μετακίνηση του φορέα που αντιστοιχεί στη γενική πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος.

Η τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας  $\mu_c$  της διατομής της πλαστικής άρθρωσης συνδέεται με την πλαστιμότητα μετακίνησης του στοιχείου  $\mu_{cd}$  μέσω της σχέσης:

$$\mu_c = 1 + \frac{\mu_{cd} - 1}{3(I_p/I)[1 - 0,5(I_p/I)]}$$

όπου  $I_p$  είναι το θεωρητικό μήκος της πλαστικής άρθρωσης και  $I$  το μήκος στοιχείου μορφής προβόλου πλήρως πακτωμένου στο έδαφος, στην παραμόρφωση του οποίου οφείλεται η μετακίνηση του φορέα. Το μήκος της πλαστικής άρθρωσης σε διατομές οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί από την προσεγγιστική σχέση:

$$I_p = 0,08I + 0,022d_s f_y$$

όπου  $d_s$  και  $f_y$  είναι η διάμετρος και το όριο διαρροής του διαμήκους οπλισμού σε m και MPa, αντίστοιχα.

Από ανάλυση ροπών-καμπυλοτήτων προκύπτει η καμπυλότητα διαρροής της διατομής της πλαστικής άρθρωσης  $\phi_y$ . Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής  $\phi_u$  δίνεται από τη σχέση:

$$\phi_u = \mu_c \phi_c$$

Η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος  $\epsilon_{cu}$  συνδέεται με την καμπυλότητα  $\phi_u$  και το μήκος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής κατά την αστοχία  $c_u$  μέσω της σχέσης:

$$\epsilon_{cu} = \phi_u c_u$$

**(α) Κυκλική Διατομή.** Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης  $\rho_{sj}$  από το μανδύα σύνθετων υλικών που προστίθεται για την ενίσχυση υποστυλώματος κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D$  είναι

$$\rho_{sj} = 0,4 (\epsilon_{cu} - \epsilon_{co}) f_{cc} / (f_{uj} \epsilon_{uj})$$

όπου  $\epsilon_{co}$  είναι η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος,  $f_{cc}$  η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $f_{uj}$  η μέγιστη εφελκυστική τάση του μανδύα σύνθετων υλικών και  $\epsilon_{uj}$  η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του μανδύα σύνθετων υλικών. Αν αγνοηθεί η περίσφιγξη λόγω συνδετήρων, η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λαμβάνεται  $\epsilon_{co} = 0.0035$ . Με θεώρηση περισφιγμένου σκυροδέματος η θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας αυξάνεται σε

$$\epsilon_{co} = 0.0035 + 0.10 \alpha \omega_{wd}$$

όπου  $\alpha \omega_{wd}$  είναι το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των υφιστάμενων συνδετήρων. Το απαιτούμενο πάχος  $t_f$  του μανδύα σύνθετων υλικών, το αυξημένο πάχος  $t_f$  λόγω πρόσθετης προστασίας των ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό και ο τελικός αριθμός των στρώσεων  $n$  του σύνθετου υλικού δίνονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$t_f = \rho_{sj} D / 4$$

$$t_f' = 1,33 t_f$$

$$n = t_f' / t_j$$

όπου  $t_j$  είναι το πάχος μίας στρώσης σύνθετου υλικού.

**(β) Ορθογωνική Διατομή.** Κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση της κυκλικής διατομής, το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης  $\rho_{sj}$  από το μανδύα σύνθετων υλικών που προστίθεται για την ενίσχυση υποστυλώματος ορθογωνικής διατομής διαστάσεων  $b \times d$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$\rho_{sj} = 0,8(\epsilon_{cu} - \epsilon_{co}) f_{cc} / (f_{uj} \epsilon_{uj})$$

όπου  $\epsilon_{co}$  είναι η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος,  $f_{cc}$  η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $f_{uj}$  η μέγιστη εφελκυστική τάση του μανδύα σύνθετων υλικών και  $\epsilon_{uj}$  η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του μανδύα σύνθετων υλικών. Επίσης, το απαιτούμενο πάχος  $t_f$  του μανδύα σύνθετων υλικών, το αυξημένο πάχος  $t_f'$  λόγω πρόσθετης προστασίας των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό και ο τελικός αριθμός των στρώσεων  $n$  του σύνθετου υλικού υπολογίζονται ως εξής

$$t_f = 0,5 \rho_{sj}(bd)/(b+d)$$

$$t_f' = 1,33 t_f$$

$$n = t_f' / t_j$$

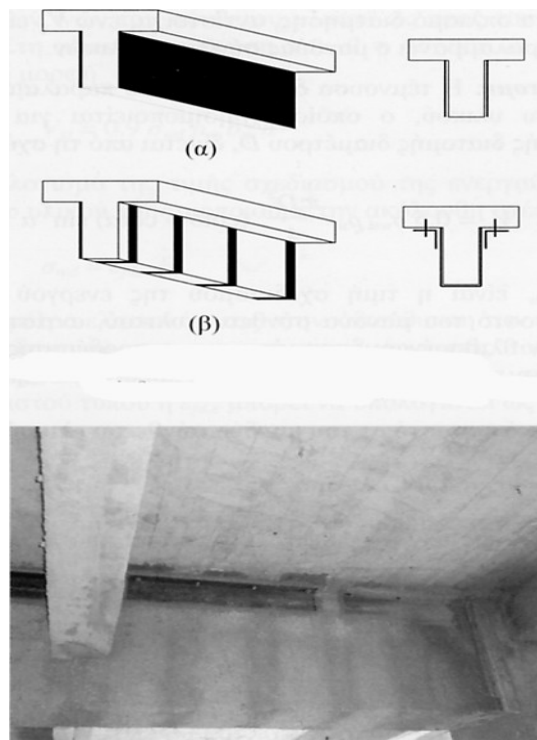
όπου  $t_j$  είναι το πάχος μίας στρώσης σύνθετου υλικού.

### **1.7.3 ΑΥΞΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ**

Η διατμητική αντοχή δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορεί να αυξηθεί με μανδύες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή, οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά στα στοιχεία και παραλαμβάνουν τέμνουσα δύναμη κατ' αντιστοιχία με το συμβατικό οπλισμό διάτμησης. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση σε διάτμηση μπορεί να έχουν, είτε τη μορφή ολόσωμων μανδύων που αποτελούνται από επικολλητές στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών είτε τη μορφή μανδύων περιορισμένου ύψους ('κολάρα') που αποτελούνται από λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών. Στο Σχήμα φαίνεται η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων ενίσχυσης στην περίπτωση δοκών. Για την περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων σε διάτμηση, η τοποθέτηση των ινοπλισμένων πολυμερών εφαρμόζεται όπως για την περίπτωση της επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης. Οι ίνες του πολυμερούς είναι κατά κανόνα κάθετες στον άξονα του στοιχείου.

Πρέπει να τονιστεί ότι, στην περίπτωση που ο μανδύας από σύνθετο υλικό δεν είναι δυνατό να περιβάλλει πλήρως τη διατομή του στοιχείου (π.χ. περίπτωση ενίσχυσης πλακοδοκού), ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην όσο το δυνατόν καλύτερη αγκύρωση των στρώσεων του σύνθετου υλικού στο υπάρχον στοιχείο. Στην περίπτωση ορθογωνικών διατομών, συνιστάται επίσης η λάξευση των γωνιών τους πριν την τοποθέτηση των στρώσεων του μανδύα, όπως καθορίζουν οι κατασκευαστικές

διατάξεις.



Όσον αφορά στο σχεδιασμό του μανδύα σύνθετων υλικών, θεωρούμε ότι αυτός συμπεριφέρεται σαν πρόσθετος οπλισμός διάτμησης, ενώ δεν συνεισφέρει στην αντοχή της διατομής λόγω λοξής θλίψης κορμού. Για το λόγο αυτό, η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω λοξής θλίψης κορμού  $V_{Rd2}$  λαμβάνεται ίση με αυτήν του στοιχείου πριν την επέμβαση. Η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης  $V_{Rd3}$  υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd,un} + V_{sj}$$

Όπου  $V_{cd}$  και  $V_{wd,un}$  είναι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα και τον υπάρχοντα οπλισμό διάτμησης, αντίστοιχα, ενώ  $V_{sj}$  είναι η πρόσθετη τέμνουσα που παραλαμβάνει ο μανδύας σύνθετων υλικών.

**(α) Κυκλική Διατομή.** Η τέμνουσα δύναμη  $V_{sj}$  που παραλαμβάνεται από το μανδύα σύνθετου υλικού, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενίσχυση στοιχείου κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D$ , δίνεται από τη σχέση:

$$V_{sj} = 0,5\sigma_{wd}\rho_w n D^2 / 4(\cot\theta + \cot\alpha)\sin^2\alpha$$

όπου  $\sigma_{wd}$  και  $\rho_w$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης και το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετου υλικού, αντίστοιχα,  $\theta$  είναι η γωνία κλίσης των θλιβομένων διαγωνίων του σκυροδέματος και  $\alpha$  η γωνία κλίσης των κυρίων ινών του



πολυμερούς ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου. Το ογκομετρικό ποσοστό  $\rho_w$  του μανδύα σύνθετου υλικού είναι ίσο με :

$$\rho_w = 4nt_j / D \sin \alpha$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα από πολυμερές και  $t_j$  το πάχος μίας στρώσης.

Θεωρώντας  $\theta = 45^\circ$  και  $\alpha = 90^\circ$  η σχέση απλοποιείται ως εξής :

$$V_{sj} = 0,5 \sigma_{wd} n t_j n D$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης  $\sigma_{wd}$  του μανδύα σύνθετου υλικού μπορεί να ληφθεί από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{wd} = \epsilon_{max} E_f / \gamma_{fi}$$

όπου  $\epsilon_{max} = 0.006$  είναι η μέγιστη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού,  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού στην κατεύθυνση των κυρίων ινών, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_{fi}$  λαμβάνεται ίσος με 1.25.

**(β) Ορθογωνική Διατομή.** Στην περίπτωση στοιχείου ορθογωνικής διατομής με πλάτος  $b_w$  και ύψος  $h$ , η τέμνουσα δύναμη  $V_{sj}$  που παραλαμβάνεται από το μανδύα σύνθετου υλικού υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_{sj} = \sigma_{wd} \rho_w b_w (0,9h) (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha$$

όπου  $\sigma_{wd}$  και  $\rho_w$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης και το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετου υλικού, αντίστοιχα,  $\theta$  είναι η γωνία κλίσης των θλιβομένων διαγωνίων του σκυροδέματος και  $\alpha$  η γωνία κλίσης των κυρίων ινών του σύνθετου υλικού ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου. Στη γενική περίπτωση που  $\theta = 45^\circ$  και  $\alpha = 90^\circ$ , η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$V_{sj} = 0,9 \sigma_{wd} \rho_w b_w h$$

Για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού της ενεργού τάσης  $\sigma_{wd}$  του μανδύα σύνθετου υλικού χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_{wd} = \epsilon_{fd,e} E_f$$

όπου  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών και  $\epsilon_{fd,e}$  η τιμή σχεδιασμού της ενεργού παραμόρφωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς. Η  $\epsilon_{fd,e}$  εξαρτάται από τον τύπο του μανδύα σύνθετου υλικού. Για μανδύες κλειστού τύπου η  $\epsilon_{fd,e}$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

$$\epsilon_{fd,e} = \min[0,17 \epsilon_{fud} (f_{cm}^{2/3} / E_f \rho_w)^{0,30}, 0,006 / \gamma_{fi}]$$

όπου  $f_{cm} = f_{ck} + 8$  η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αντίστοιχα, για ανοικτούς μανδύες

$$\epsilon_{fd,e} = \min[0,17 \epsilon_{fud} (f_{cm}^{2/3} / E_f \rho_w)^{0,30},$$

$$0,65 \times 10^{-3} / \gamma_{fb}, (f_{cm}^{2/3} / E_f \rho_w)^{0,56}, 0,006 / \gamma_{fi}]$$

Στις παραπάνω σχέσεις με  $f_{cm}$  συμβολίζουμε τη μέση θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa, το  $E_f$  λαμβάνεται σε GPa, ενώ οι συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_{fi}$  και  $\gamma_{fb}$  παίρνουν τις τιμές 1.25 και 1.30, αντίστοιχα. Επίσης,  $\epsilon_{fud}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της παραμόρφωσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\epsilon_{fud} = \epsilon_{fuk} / \gamma_f$$

όπου  $\epsilon_{fuk}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης θραύσης του σύνθετου υλικού, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_f$  λαμβάνει την τιμή 1.20, 1.25 και 1.30 για ίνες υάλου, πολυαραμιδής και άνθρακα, αντίστοιχα.

Το γεωμετρικό ποσοστό  $\rho_w$  του μανδύα σύνθετου υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_w = 2nt_j / b_w s \sin \alpha$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα και  $t_j$  το πάχος μίας στρώσης.

Εάν οι ίνες του πολυμερούς είναι κάθετες στον άξονα του στοιχείου, τότε  $\alpha = 90^\circ$  οπότε η σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$V_{sj} = 1,8n t_j h \epsilon_{fd,e} E_f$$

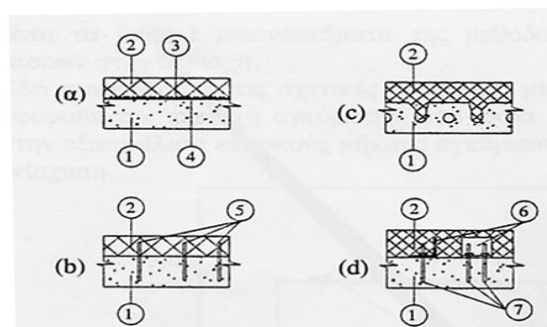
## **1.8 ΜΑΝΔΥΕΣ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

### **1.8.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ**

Η δοκός διαστασιολογείται ως εάν ήταν μονολιθική λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω μειωτικούς συντελεστές προσομοιώματος που προτείνονται στον [24]:

$$K_r = 0,9 \quad , \quad k_k = 0,85$$

Για πλάκες λαμβάνεται  $K_r = k_k = 1,0$  Για τον έλεγχο της σύνδεσης στην διεπιφάνεια παλαιού νέου σκυροδέματος αγνοείται η ολίσθηση και εξασφαλίζεται ότι η διατμητική



αντοχή είναι μεγαλύτερη από την διατμητική ένταση.

### **ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ**

Ισχύουν εν γένει οι κατασκευαστικές διατάξεις, όπως αναφέρονται στον Κανονισμό

Σκυροδέματος .

Τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης των νέων υλικών δεν πρέπει να υπολείπονται των χαρακτηριστικών του αρχικού στοιχείου.

Ως ελάχιστοι διατμητικοί σύνδεσμοι στην διεπιφάνεια τοποθετούνται χαλύβδινα βλήτρα σύμφωνα με ότι αναφέρθηκε στην περίπτωση των υποστυλωμάτων ή γίνονται ηλεκτροσυγκολλήσεις ράβδων με ίση αντίσταση.

### **1.8.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

Η διαδικασία ανάλυσης και διαστασιολόγησης δομικών στοιχείων ενισχυμένων με επικολλητά φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή βασίζεται στις αρχές για τη μελέτη στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω δύο βασικά σημεία:

- Στην κατάσταση οριακής φέρουσας ικανότητας ο οπλισμός ενίσχυσης (σύνθετων υλικών) δεν «διαρρέει» όπως ο χάλυβας, αλλά παραμορφώνεται ελαστικά, φθάνοντας σε μεγάλη παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή εξαρτάται βασικά από την ικανότητα του σκυροδέματος (δηλαδή υποστρώματος) να μεταφέρει μέσω διάτμησης τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα σύνθετα υλικά, και είναι, κατά κανόνα, μικρότερη από τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση (θραύσης) των σύνθετων υλικών.
- Ο «δεσμός» σύνθετων υλικών-σκυροδέματος μπορεί να αστοχήσει πρόωρα, δηλαδή πριν εξαντληθεί η καμπτική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου. Η διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο κάμψης, στοιχείων (δοκών ή πλακών) που έχουν ενισχυθεί με σύνθετα υλικά (FRP) στο εφελκυσμένο πέλμα, είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό (συμβατικών) διατομών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Όμως τώρα, επιπλέον θα πρέπει να θεωρηθεί ότι τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να ξεπεράσουν μία οριακή παραμόρφωση  $\epsilon_{f,lim}$  τάξεως του 50% της παραμόρφωσης θραύσης τους. Συχνά λαμβάνεται  $\epsilon_{f,lim} = 6\text{‰}$ . Πάντως η τιμή αυτή δεν θα πρέπει να θεωρηθεί οριστική επειδή το θέμα είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Επομένως, οι δύο οριακές καταστάσεις αστοχίας για διατομές σκυροδέματος  $\epsilon_{c2} = 3,5\text{‰}$  και  $\epsilon_{s1} = 20\text{‰}$  που προβλέπονται στον Κανονισμό Σκυροδέματος αντικαθίστανται από τις  $\epsilon_{c2} = 3,5\text{‰}$  και  $\epsilon_f = 6\text{‰}$ . Η παραπάνω διαδικασία προϋποθέτει ότι τα άκρα των εξωτερικών οπλισμών εξασφαλίζονται έναντι πρόωρης αποκόλλησης. Προς τον σκοπό αυτό απαιτείται επαρκές μήκος αγκύρωσης ( $l_b$ ) των εξωτερικών οπλισμών. Η διαδικασία προσδιορισμού του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης και ο έλεγχος των διατμητικών τάσεων απόσχισης, στα άκρα μπορεί να αναζητηθεί αλλού .

### **1.8.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ-ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ**

Ειδικά μέτρα εξασφάλισης της αγκύρωσης, ανάλογα με αυτά που χρησιμοποιούνται για τα επικολλητά ελάσματα (Σχ.1.29) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση ανεπάρκειας του μήκους αγκύρωσης.

Η εφαρμογή της τεχνικής ενίσχυσης στοιχείων με επικολλητά φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή, προϋποθέτει ότι το στοιχείο χωρίς οπλισμό ενίσχυσης μπορεί να φέρει ασφαλώς τον συνδυασμό των οιονει-μονίμων φορτίων ( $G+\Psi_2Q$ ) για να μην αστοχήσει σε περίπτωση απρόβλεπτης έντονης δράσης (π.χ. πυρκαγιά).

### **1.8.4 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ Ο.Σ**

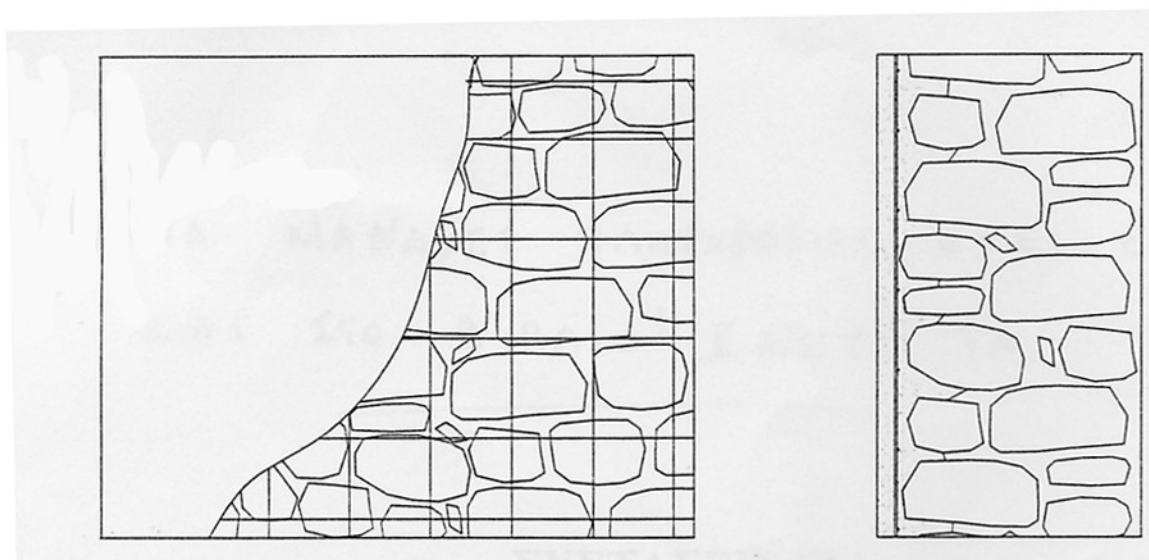
Η τεχνική κατασκευής μανδύων σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της διατμητικής και καμπτικής τους αντοχής.

Η τεχνική περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής της δοκού με νέο σκυρόδεμα, νέους διαμήκεις οπλισμούς και νέους συνδετήρες περιμετρικά του αρχικού στοιχείου. Για κατασκευαστική ευκολία συνήθως επιλέγεται η χρήση εκτοξευμένου σκυροδέματος.

Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως όταν υπάρχει ανάγκη διατμητικής ενίσχυσης της δοκού, επειδή όταν απαιτείται μόνο αύξηση της καμπτικής αντοχής της δοκού επιλέγεται η απλούστερη τεχνική της ενίσχυσης με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος. Βασικό κατασκευαστικό πρόβλημα της τεχνικής είναι η δημιουργία του κλειστού μανδύα στο πάνω μέρος της δοκού, λόγω της ύπαρξης των πλακών. Γι' αυτό πολλές φορές στην πράξη επιλέγεται η λιγότερο αποτελεσματική τεχνική της κατασκευής ανοικτού μανδύα. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για την εξασφάλιση της αγκύρωσης των συνδετήρων.

### **1.9 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ Ή ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑ**

ΠΟΤΕ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ: Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με την προηγούμενη κατά τις περιπτώσεις όπου δεν είναι απαιτητή η διατήρηση της όψης της λιθοδομής και με στόχο την αύξηση των αντοχών της τοιχοποιίας. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί είτε μονόπλευρα, μέσω κατάλληλων φωλιών στην τοιχοποιία για την



αποτελεσματική αγκύρωση του επιχρίσματος, είτε αμφίπλευρα, με κατάλληλες διαμπερείς συνδέσεις .

#### **ΣΤΑΔΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ:**

**Στάδιο 1:** Διαμόρφωση αγκυρώσεων σε ικανοποιητικό βάθος στην επιφάνεια του τοίχου και στο περιμετρικό σύστημα δαπέδου, οροφής και σημείων επαφής με εγκάρσιους τοίχους για την καλή στήριξη του επιχρίσματος.

**Στάδιο 2:** Δημιουργία εύπλαστου επιχρίσματος με τη χρήση ινών ή εναλλακτικά διάταξη ελαφρού δομικού πλέγματος ή κοτετσόσυρματος καλά τεντωμένου και αγκυρωμένου βαθιά στους αρμούς του τοίχου.

**Στάδιο 3:** Τοποθέτηση επιχρίσματος σε διαδοχικές φάσεις και διαμόρφωση της τελικής όψης, απαλλαγμένης από ίνες (σε περίπτωση χρήσης ινοπλισμένου επιχρίσματος). Σε κάθε περίπτωση επιβάλλεται συστηματική και προσεκτική συντήρηση με συχνά καταβρέγματα και για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

**Υλικά:** Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου απαιτούνται:

- Μεταλλικές αγκυρώσεις
- Ίνες ή μεταλλικό πλέγμα ή κοτετσόσυρμα
- Επιχρίσματα υψηλής αντοχής (πλούσια σε τσιμέντο, με μικρό λόγο νερού προς τσιμέντο και χρήση υπερρρευστοποιητή). Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30mm περίπου.

**Βαθμός αποτελεσματικότητας:** Αύξηση της διατμητικής και καμπτικής αντοχής της τοιχοποιίας. Ο βαθμός αποτελεσματικότητας αυτής της μεθόδου εξαρτάται από το πάχος του επιχρίσματος και την καλή αγκύρωσή του με την τοιχοποιία.

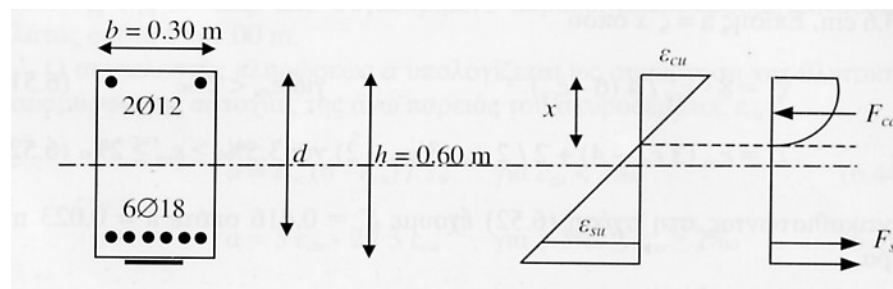
**Μειονεκτήματα:** Συγκέντρωση και εγκλωβισμός υγρασίας στη διεπιφάνεια μεταξύ τοιχοποιίας και επιχρίσματος με σταδιακή αποδιοργάνωση του υφιστάμενου κονιάματος της τοιχοποιίας και με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής της. Στην περίπτωση εφαρμογής αυτής της μεθόδου συνιστάται να λαμβάνεται ειδική πρόνοια για τον τρόπο απομάκρυνσης της υγρασίας.

**Αναδιαστασιολόγηση:** Η εκτίμηση της αντοχής βασίζεται σε λύση οριακού φορτίου. Η φέρουσα ικανότητα του συνόλου προκύπτει ως άθροισμα της φέρουσας ικανότητας των επιχρισμάτων και της ρηγματωμένης τοιχοποιίας, καταλλήλως διορθωμένων, ώστε να ληφθεί υπ' όψη η μη ταυτόχρονη αστοχία των επιμέρους στοιχείων, καθώς και οι μεγάλες αβεβαιότητες του προσομοιώματος. Προτείνεται η παρακάτω σχέση, η οποία μπορεί να ισχύει και για την περίπτωση των μανδύων:

$$F_{w,overall} = 1/\gamma_{Rd}(k f_c + f_{w,f}) \quad \text{Όπου } 1/\gamma_{Rd} = 0,80 \text{ περίπου}$$

## 1.10 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Θεωρούμε αμφιέριστη δοκό μήκους  $l = 7\text{ m}$  και διαστάσεων  $30\text{ cm} \times 60\text{ cm}$  η οποία διαθέτει στο άνοιγμα εφελκόμενο οπλισμό  $6\Phi 18$  ( $A_s = 15.26\text{ cm}^2$ ), θλιβόμενο οπλισμό  $2\Phi 12$  ( $A_s = 2.26\text{ cm}^2$ ) και συνδετήρες  $\Phi 8/20$ . Η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 2.5\text{ cm}$ , η ποιότητα του σκυροδέματος C20/25 και του χάλυβα S500. Τα φορτία σχεδιασμού της δοκού είναι  $g_{sd} = 17\text{ kN/m}$  (συμπεριλαμβανομένου του ίδιου βάρους) και  $q_{sd} = 25\text{ kN/m}$ . Η δοκός πρόκειται να ενισχυθεί με ελάσματα σύνθετου υλικού πλάτους  $w_j = 7.5\text{ cm}$ , πάχους  $t_j = 1.2\text{ mm}$ , μέτρου ελαστικότητας  $E_f = 235\text{ GPa}$  και μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης  $\epsilon_{e,lim} = 5\text{‰}$ . Ζητείται να υπολογιστεί ο αριθμός των ελασμάτων σύνθετου υλικού ώστε το κινητό φορτίο σχεδιασμού της δοκού να αυξηθεί σε  $35\text{ kN/m}$ . Για τους υπολογισμούς να θεωρηθεί ότι η καμπτική ροπή κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης της δοκού.



Επειδή η ροπή κάμψης κατά τη διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης της δοκού, πρέπει να υπολογιστεί η αρχική παραμόρφωση λόγω μονίμων φορτίων. Η ροπή κάμψης στο μέσον του ανοίγματος είναι  $M_0 = g_{sd} l^2/8 = 17 \times 7^2 = 104.13\text{ kNm}$ . Λόγω ισορροπίας η ροπή αυτή πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ως προς το κέντρο βάρους του εφελκόμενου χάλυβα:

$$M_0 = F_{cd}(d-a) + F_{s2}(d-d_2)$$

όπου  $d = 60 - 2.5 - 0.8 - 1.8/2 = 55.8\text{ cm}$  και  $d_2 = 2.5 + 0.8 + 1.8/2 = 4.2\text{ cm}$ .

Επίσης πρέπει να ισχύει η εξίσωση ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων:

$$F_{cd} + F_{s2} = F_{s1}$$

Αντίστοιχα, το βάθος της θλιβόμενης ζώνης είναι:

$$x_o = \frac{\epsilon_{oc}}{\epsilon_{co} + \epsilon_{so} d}$$

όπου  $\epsilon_{co}$  και  $\epsilon_{so}$  είναι η αρχική παραμόρφωση της άνω παρειάς του σκυροδέματος και του εφελκόμενου χάλυβα, αντίστοιχα. Επιλύοντας τις εξισώσεις και κάνοντας διαδοχικές δοκιμές βρίσκουμε:  $\epsilon_{co} = 0.60\%$ ,  $\epsilon_{so} = 0.80\%$ ,  $x_o = 0.24m$ ,  $F_{cd} = 220.3$  kN,  $F_{s1} = 242.7$  kN και  $F_{s2} = 22.4$  kN. Επίσης η παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα της διατομής λόγω συμβιβαστού των παραμορφώσεων είναι:

$$\epsilon_o = \frac{h - x_o}{x_o} \epsilon_{co} = \frac{0,60 - 0,24}{0,169} \times 0,00060 = 0,0009$$

Η απαιτούμενη ροπή αντοχής της διατομής μετά την ενίσχυση είναι  $M_{Rd} = (g_{sd} + q_{sd}) l^2 / 8 = 52 \times 7^2 / 8 = 318.50$  kNm. Υπολογίζουμε με δοκιμές ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας  $\epsilon_{cu} = 3.5\%$ ,  $\epsilon_{uj} = \epsilon_{cu} - (h-x) = 3.6\% < \epsilon_{e,lim} = 5\%$  και  $\epsilon_{su} = 3.9\% > \epsilon_{syd} = 2.17\%$ . Επίσης  $x = 0.263$  m,  $F_{cd} = 724.6$  kN,  $F_{s1} = 663.5$  kN,  $F_{s2} = 98.3$  kN,  $n = 2$  και  $F_{sj} = 159.4$  kN. Ακόμα βρίσκουμε ότι η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής είναι  $M_{Rd} = 382.37$  kNm  $> 318.50$  kNm. Επομένως, για την καμπτική ενίσχυση της δοκού απαιτούνται 2 ελάσματα σύνθετου υλικού. Η θέση πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης  $l_b$  του σύνθετου υλικού βρίσκεται εκεί όπου η τιμή της συνολικής εφελκυστικής δύναμης που καταπονεί τη διατομή είναι ίση με τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει ο χάλυβας μόνος του  $A_s f_{yd}$ . Η συνολική εφελκυστική δύναμη ισούται με το άθροισμα  $F_s + F_{sj}$  οπότε:

$$A_s f_{yd} = A_s E_s \epsilon_s + n t_j w_j E_f \epsilon_j = F_{sj} (1 + A_s E_s \epsilon_s / n t_j w_j E_f \epsilon_j)$$

Θεωρώντας ότι  $\epsilon_s = \epsilon_j$  έχουμε ότι:

$$A_s f_{yd} = F_{sj} (1 + A_s E_s / n t_j w_j E_f)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση,  $A_s = 15.26$  cm<sup>2</sup>,  $f_{yd} = 43.48$  kN/cm<sup>2</sup>,  $E_s = 200$  GPa,  $n = 2$ ,  $t_j = 0.12$  cm,  $w_j = 7.5$  cm και  $E_f = 235$  GPa έχουμε  $F_{sj} = 84.53$  kN. Η δύναμη αγκύρωσης του σύνθετου υλικού  $F_{sj}$ , υπέρβαση της οποίας συνεπάγεται αποκόλληση των ελασμάτων, αυξάνεται με το μήκος αγκύρωσης  $l_b$ . Πειραματικά έχει βρεθεί ότι πέρα από μία οριακή τιμή του μήκους αγκύρωσης  $l_{b,max}$  η δύναμη αγκύρωσης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη και ίση με  $F_{s,jmax}$ . Είναι:

$$F_{s,jmax} = l_{b,max} c_1 k_c k_b w_j / \gamma_b (f_{ctm} E_f t_j)^{1/2}$$

Είναι  $c_1 = 0.64$ ,  $k_c$  ο συντελεστής συμπύκνωσης του σκυροδέματος που μπορεί να

λαμβάνεται ίσος με 1.0 για κανονική συμπύκνωση,  $k_b = 1.2$ ,  $f_{ctm} = 2.2$  MPa και  $\gamma_b = 1.5$ . Επομένως  $F_{s,jmax} = 30.25$  kN. Επίσης η οριακή τιμή του μήκους αγκύρωσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$l_{b,max} = (E_f t_j / c_2 f_{ctm})^{1/2}$$

Είναι  $c_2 = 2.0$  οπότε αντικαθιστώντας στην εξίσωση έχουμε  $l_{b,max} = 253$  mm = 25cm. Επομένως το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης των ελασμάτων σύνθετου υλικού ώστε να αποτραπεί η αποκόλληση τους είναι 25cm.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ**

### **2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ**

Τα ποσοστά αναλογίας βάρους κάθε συστατικού για την παρασκευή 1m<sup>3</sup> ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι τα ίδια όπως για την παρασκευή 1m<sup>3</sup> άοπλου σκυροδέματος. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα παρακάτω μέρη βάρους ανά m<sup>3</sup> ινοπλισμένου σκυροδέματος:

911Kg άμμος

533Kg άδρανη (12 mm)

235Kg τσιμέντο

178Kg νερό

και 30Kg χαλύβδινες ίνες ή

900gr συνθετικές ίνες πολυποσπυλενίου

#### **ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΙΝΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΒΑΡΕΛΑΣ**

Για την παρασκευή στο σιλό 1m<sup>3</sup> ινοπλισμένου σκυροδέματος, αδειάζουμε σάκους με χαλύβδινες ή συνθετικές ίνες,κατά την ανάμειξη του σκυροδέματος,ενώ τούτο μπορεί να συμβεί και επιτόπου του έργου,όπου η ανάμειξη των ινών γίνεται εντός της βαρέλας,όπου βρίσκεται το προς διάστρωση σκυρόδεμα. Ο χρόνος αναμείξεως του σκυροδέματος είναι περίπου 5min. Ακολουθως η διαδικασία διαστρώσεως και συμπυκνώσεως του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η ίδια με αυτήν που ακολουθείται για το σύννηθες σκυρόδεμα.

#### **2.1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΙΝΩΝ**

##### **ΣΥΝΘΕΣΗ**

Τα χαλυβδινοδέματα περιέχουν συγκολλημένες ίνες με ή χωρίς αγκύρια σε δέσμες επικαλυμένες με υδροδιαλυτή κόλλα. Με την ανάμειξη του σκυροδέματος επιτυγχάνεται στατιστικά ομοιόμορφη διασπορά των ινών εντός του σκυροδέματος. Τα γεωμετρικά στοιχεία των ινών είναι:

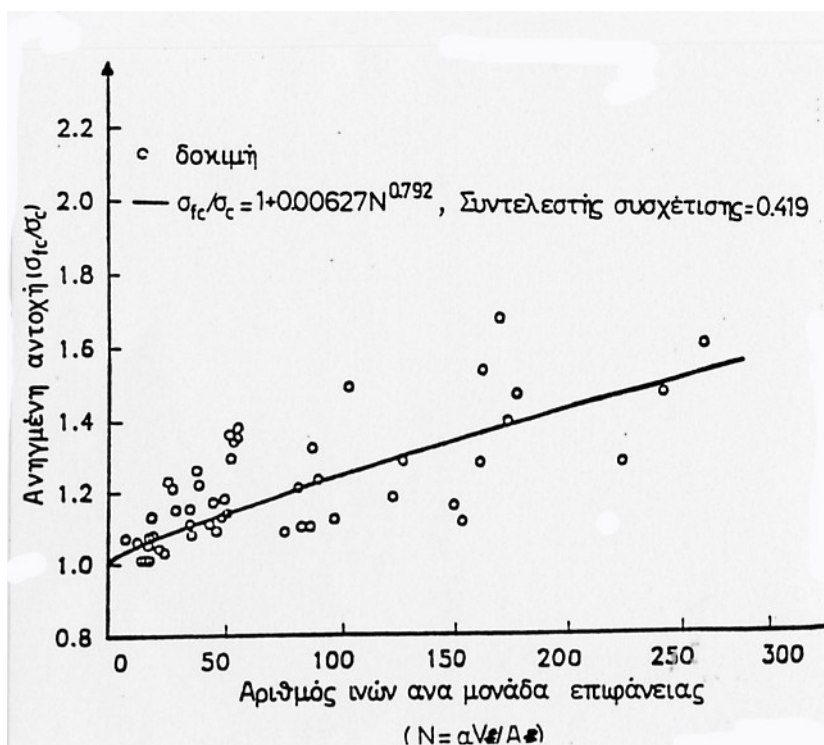


Μήκος : 3-6cm  
 Διατομή : κυκλική με διάμετρο 0,15-1mm  
 Αναλογία βάρους : 30Kg/m<sup>3</sup> σκυροδέματος

ΔΕΣΜΕΣ ΣΥΓΚΟΛΗΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΙΝΩΝ ΜΕ ΑΓΚΥΡΙΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό δοκιμίων από χαλυβδινοπλισμένο σκυρόδεμα αυξάνεται συναρτήση του αριθμού ινών ανά μονάδα επιφάνειας του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στο σχήμα αυτό ο αριθμός των ινών N εξαρτάται ανάλογα από τον ποσοστιαίο όγκο V<sub>f</sub> των ινών, αντιστρόφως ανάλογα από τη διατομή



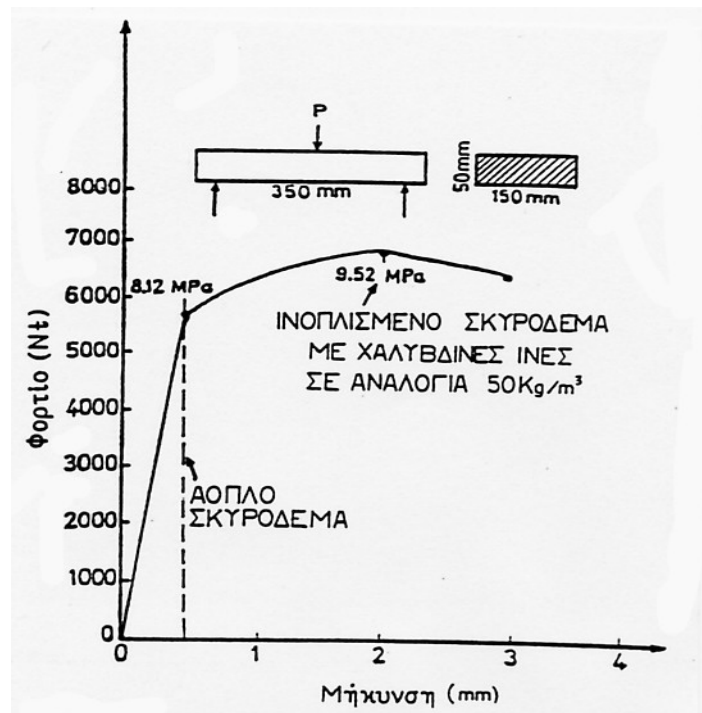
Αφ της χαλύβδινης ίνας και ανάλογα από τον συντελεστή προσανατολισμού α των ινών, ο οποίος είναι συναρτήση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών και των διαστάσεων του δοκιμίου.

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα, που η εφελκυστική αντοχή τους ξεπερνά το 1GPa, έχει ως αποτέλεσμα:

- την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό από κάμψη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή του φορτίου κάμψης P που εφαρμόζεται στο μέσον μιας αμφιέριστης δοκού μήκους 350mm με ορθογωνική διατομή 50X150mm<sup>2</sup> συναρτήση του μετρούμενου βέλους κάμψης στο μέσο της δοκού. Η διαφορά της τάσεως αστοχίας εκφρασμένης σε Mpa, ανάμεσα σε όμοια δοκίμια από άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, με χαλύβδινες ίνες σε αναλογία

50Kg/m<sup>3</sup>, δείχνει τον ενεργητικό ρόλο των ινών στην αύξηση της εφελκυστικής αντοχής της κάμψης.

- την αύξηση της ενέργειας πλαστιμότητας του σκυροδέματος, όταν αυτό περιέχει ίνες με αγκύρια, σε αντίθεση με τα χαλιβδινόσκυροδέματα που περιέχουν ευθύγραμμες ίνες.
- την αποφυγή ρηγματώσεων κατά την πήξη, ξήρανση ή καθίζηση του



σκυροδέματος.

| ΥΛΙΚΟ   | ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΑΠΟ ΚΑΜΨΗ (MPa) | ΑΥΞΗΣΗ (%) |
|---|-------------------------------------|------------|
| ΑΟΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25   | 3.7                                 | -          |
| ΧΑΛΥΒΔΟΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 60/0.8 ΒΑΡΟΥΣ 30 Kg/m <sup>3</sup> | 4.4                                 | 18.9       |
| ΧΑΛΥΒΔΟΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 60/0.8 ΒΑΡΟΥΣ 50 Kg/m <sup>3</sup> | 9.52                                | 157.3      |

- τη μείωση της επικάλυψης του σκυροδέματος.
- την κατάργηση του πλέγματος.
- την αύξηση φορτίων μέχρι το στάδιο της ρηγματώσης που μπορούν να παραληφθούν από διάφορα δάπεδα.

| ΥΛΙΚΟ  | ΦΟΡΤΙΟ (KN) |
|--|-------------|
| Άοπλο σκυρόδεμα  | 180         |
| Σκυρόδεμα με πλέγμα Φ6 200/200 (άνω)                     | 200         |
| Σκυρόδεμα με 30 kg/m <sup>3</sup> χαλύβδινες ίνες 60/1.0 | 240         |
| Σκυροδεμα με 2 πλέγματα Φ7, 200/200 (άνω και κάτω)       | 280         |

### **2.1.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ**

#### **ΣΥΝΘΕΣΗ**

Τα πολυπροπυλενιοδέματα περιέχουν ίνες διασπαρμένες εντός της μάζας τους. Η προσθήκη των ινών γίνεται αμέσως μετά την παρασκευή του σκυροδέματος και η ανάμειξη τους συντελείται επί 5λεπτο. Τα γεωμετρικά στοιχεία των ινών είναι:

Μήκος : 0,6cm

Διατομή : ορθογωνική  $b \times h = (100-200\text{m}) \times (20/30\text{m})$

Αναλογία βάρους : 900gr/m<sup>3</sup> σκυροδέματος (για συνήθεις κατασκευές) ή

1200gr/m<sup>3</sup> σκυροδέματος (για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)

Συσκευασία : σε σάκους των 900gr.

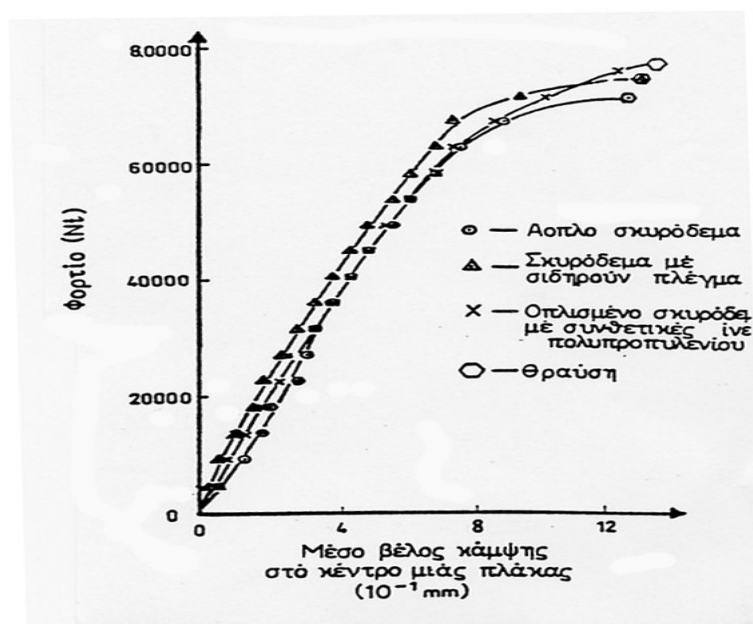
#### **ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

Η εφελκυστική αντοχή των ινών πολυπροπυλενίου κυμαίνεται μεταξύ 0,56 έως 0,77GPa, το δε μέτρο ελαστικότητάς τους είναι 3,5GPa. Η επιρροή των ινών πολυπροπυλενίου είναι σημαντική στην εφελκυστική αντοχή μιας καμπτόμενης δοκού. Επομένως για καμπτόμενη δοκό, από σκυρόδεμα C17 μήκους 45cm και διατομής 15X15cm<sup>2</sup>, η οποία δέχεται ένα φορτίο  $P=12\text{KN}$  στο μέσον της, παρατηρείται αύξηση κατά 9,2% της εφελκυστικής αντοχής εκ κάμψεως. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από σειρά δοκιμών που έγιναν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τ.Ε.Ι Πειραιώς. Παρόμοια αύξηση του φορτίου

| ΥΛΙΚΟ   | ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ<br>ΑΠΟ ΚΑΜΨΗ (MPa) | ΑΥΞΗΣΗ (%) |
|---|--|------------|
| Σκυρόδεμα άοπλο C17   | 2.5                                    | -          |
| Ινοπλισμένο σκυρόδεμα<br>με ίνες πολυπροπυλενίου<br>σε αναλογία βάρους<br>900 gr/m <sup>3</sup> | 2.73                                   | 9.2        |

αστοχίας,όπως επίσης και των αντοχών σε εφελκυσμό ή θλίψη από κάμψη,έχει παρατηρηθεί για τετραέριστες πλάκες από σκυρόδεμα C50 διαστάσεων 3Χ3Χ0,15m3,που φορτίζονται στο κέντρο τους προοδευτικά έως το φορτίο αστοχίας.εδώ η αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη ανάμεσα στο άοπλο και το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι της τάξεως του 5% διότι έχουμε υψηλή κατηγορία σκυροδέματος.

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη μεταβολή του φορτίου συναρτήση του μετρούμενου βέλους κάμψης στο κέντρο μιας τετραέριστης πλάκας,η οποία συνιστάται



από άοπλο,οπλισμένο με σιδηρούν πλέγμα στην άνω παρειά και τέλος οπλισμένο με ίνες πολυπροπυλενίου σκυρόδεμα C50.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

### **3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων: (α) «υγρής εφαρμογής» (ή «επί τόπου σκλήρυνσης» της μήτρας) και (β) «προκατασκευασμένα» (η σκλήρυνση της μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής). Η παρουσίαση αυτών γίνεται συνοπτικά παρακάτω (π.χ. ACI1996).

#### **3.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

*Φύλλα* (sheets) ή *υφάσματα* (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης (Σχ. 2.4), χωρίς μήτρα («ξηρή» κατάσταση). Για την εφαρμογή τους απαιτείται συνήθως η εφαρμογή «ασταρώματος» στο σκυρόδεμα και ακολούθως ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη, βάσει μίας εκ των εξής μεθόδων:

- εφαρμογή της ρητίνης στο σκυρόδεμα, τοποθέτηση των ινών απευθείας στη ρητίνη
- προεμποτισμός των ινών (επί τόπου στο έργο αλλά όχι επάνω στο υπό ενίσχυση στοιχείο) με ρητίνη και ακολούθως επικόλληση

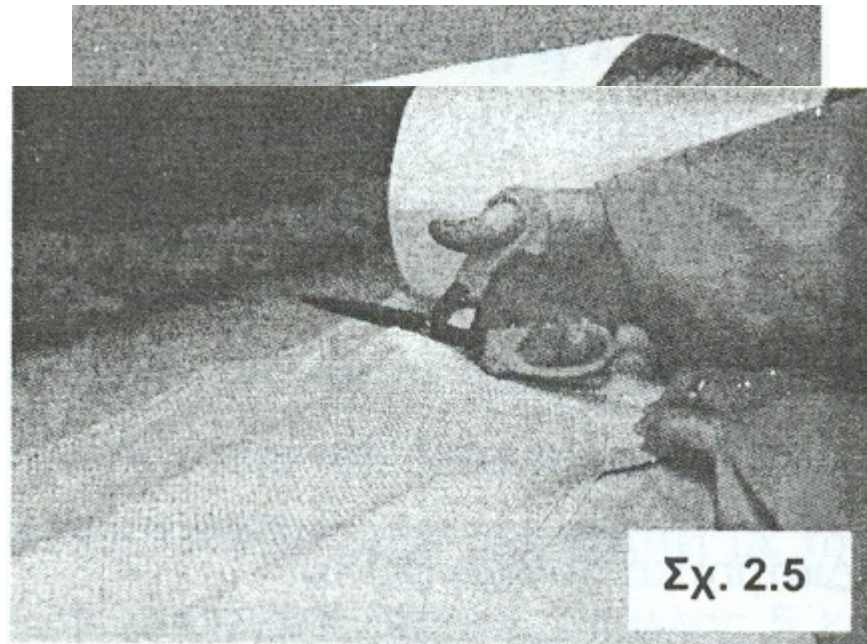
*Υφάσματα* (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις (π.χ. 0 και 90 ή +- 45 σε σχέση με τον άξονα του υπό ενίσχυση μέλους, Σχ. 2.5), χωρίς μήτρα («ξηρή» κατάσταση). Η εφαρμογή τους γίνεται όπως περιγράφεται στις παραπάνω δύο περιπτώσεις.

*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 επιπλέον 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), το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο στοιχείο σκυροδέματος.

Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή *νήματος* (tOW), το οποίο ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο στοιχείο σκυροδέματος, ενδεχομένως να υφίσταται και πρόσθετο εμποτισμό.



### **3.1.2 ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ**

Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα (και σχετικά δύσκαμτα) *ελάσματα* (strips), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρόλλων («κουλούρες»), και παράγονται με τη μέθοδο της εξέλασης (pultrusion), ή, σπανιότερα, της στρωμάτωσης (Iamination). Στη μέθοδο της εξέλασης οι ίνες είναι κατά κανόνα συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ενώ η στρωμάτωση επιτρέπει τη χρήση ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (π.χ. παράλληλες και κάθετες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ή και υπό γωνίες :t 450).

Προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνιές (angles), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης.

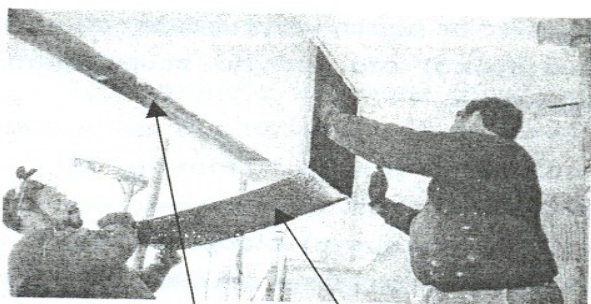
Γενικά μπορεί να διατυπωθεί το συμπέρασμα ότι τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμούνται έναντι των υφασμάτων (ή φύλλων) όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (π.χ. καμμική ενίσχυση δοκών ή πλακών), ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. μανδύες υποστυλωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμητέα.

### **3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ**



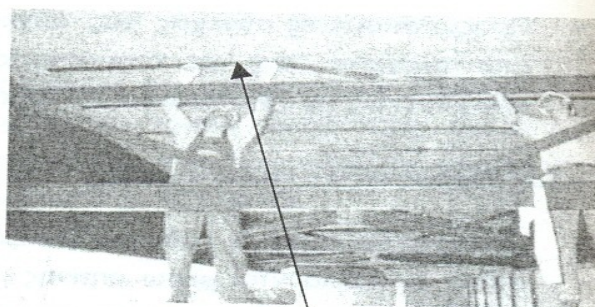
### 3.2.1 ΒΑΣΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

Η βασική τεχνική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη (και εφαρμόζεται κατ' αποκλειστικότητα στη χώρα μας), περιλαμβάνει την δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη προεμποτισμένων), είτε προκατασκευασμένων στοιχείων (π.χ. ελάσματα) σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, μέσω εποξειδικών ρητινών. Παραδείγματα εφαρμογής δίνονται στα παρακάτω σχήματα:

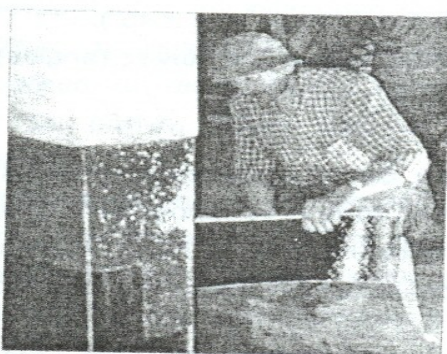


Ελάσμα για αύξηση καμπτικής αντοχής δοκού

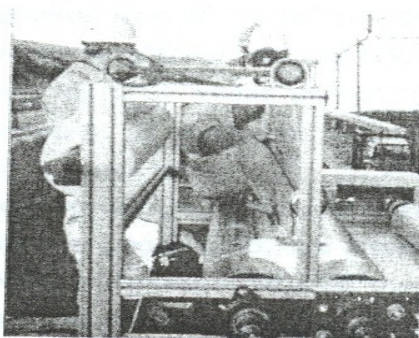
Υφασμα για αύξηση διατμητικής αντοχής δοκού



Επικόλληση ελασμάτων για την ενίσχυση καταστρώματος γέφυρας



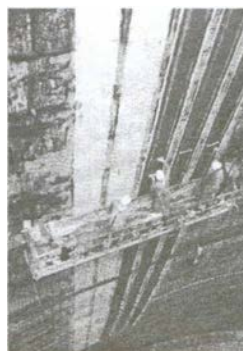
Περιτύλιξη υποστυλώματος με ύφασμα



Εμποτισμός υφάσματος σε ειδική "μπανιέρα" ρητίνης



Εφαρμογή προ-εμποτισμένου υφάσματος σε υποστύλωμα



### **3.2.2 ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ**

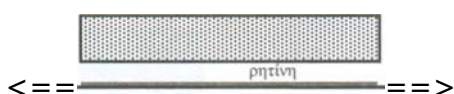
Οι περισσότερες από τις παρακάτω τεχνικές δεν έχουν τύχει ακόμα ευρείας εφαρμογής στη χώρα μας, αλλά αναφέρονται παρακάτω κυρίως για λόγους πληρότητας.

#### **ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΕΡΙΤΥΛΙΞΗ**

Η τεχνική της αυτοματοποιημένης περιτύλιξης «νημάτων» αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του '90 και λίγο αργότερα στις ΗΠΑ. Περιλαμβάνει την χωρίς διακοπή περιτύλιξη προεμποτισμένων με ρητίνη νημάτων υπό μικρή γωνία γύρω από υποστυλώματα γεφυρών ή άλλα στοιχεία (π.χ. καπνοδόχοι), μέσω ειδικής συσκευής - ρομπότ . Βασικό πλεονέκτημα της τεχνική, πλέον του καλού ποιοτικού ελέγχου, είναι η μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής.

#### **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ**

Η μέθοδος προέντασης, η οποία αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Triantafillou and Deskovic 1991, Deuring 1993), περιλαμβάνει την επικόλληση ελασμάτων ενώ αυτά βρίσκονται υπό τάνυση. Έτσι εκμεταλλευόμαστε τα βασικά πλεονεκτήματα της προέντασης (αύξηση δυσκαμψίας, καθυστέρηση ρηγματώσης, μείωση πλάτους ρωγμών, αύξηση καμτικής και διατμητικής αντοχής σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής χωρίς προ ένταση κλπ), με τίμημα την αύξηση του κόστους αλλά και του βαθμού πολυπλοκότητας της μεθόδου εφαρμογής, λόγω της ανάγκης για τη χρήση ειδικών αγκυρώσεων.

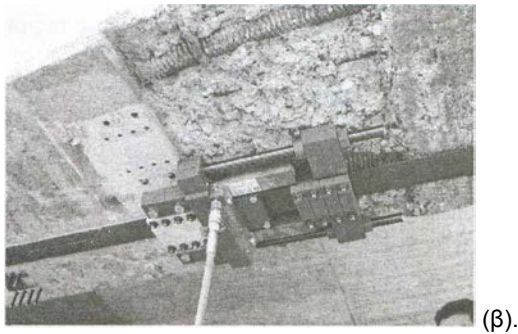
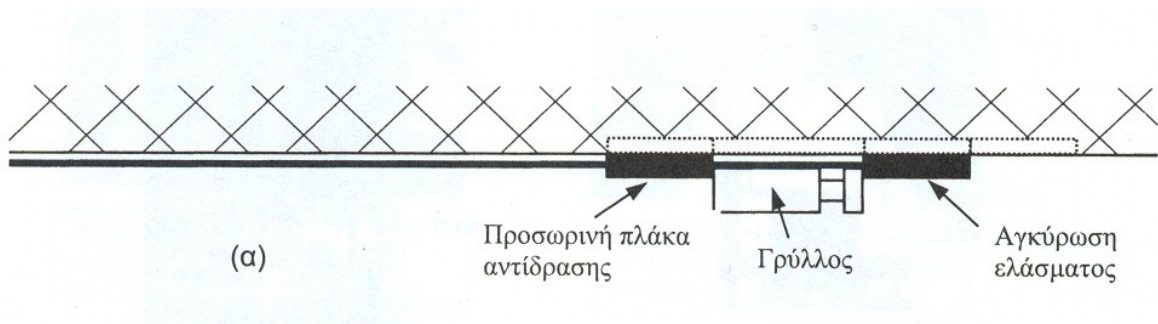


(a)





Σχηματική διάταξη προέντασης με ελάσματα συνθέτων υλικών. (α) Προένταση, (β) επικόλληση υπό τάνυση, (γ) αγκύρωση άκρων και αποφόρτιση (μετά τη σκλήρυνση της ρητίνης).



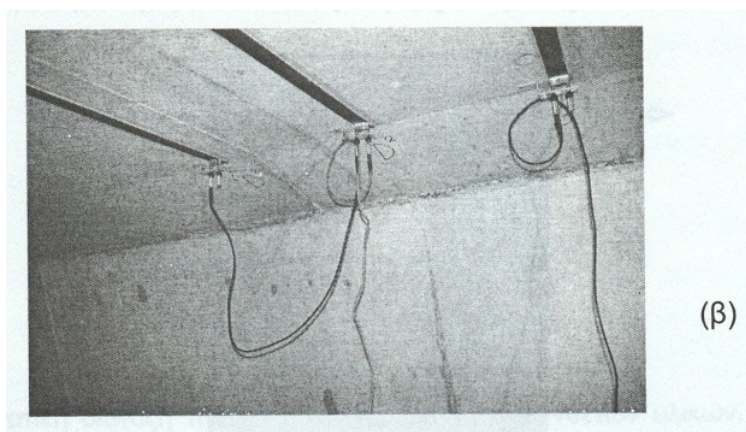
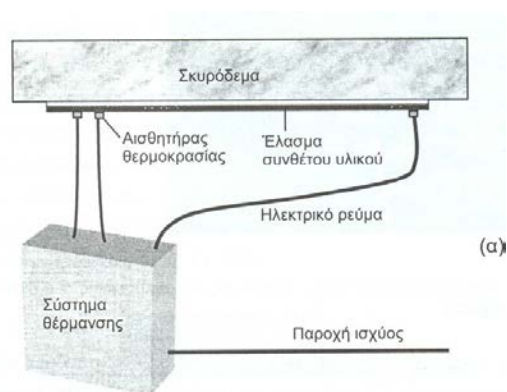
Η τεχνική της προέντασης μπορεί να εφαρμοστεί και σε μανδύες υποστυλωμάτων, Π.χ. είτε εφαρμόζοντας τα σύνθετα υλικά με τις ίνες υπό τάνυση, είτε εισάγοντας στο κενό μεταξύ του μανδύα και σκυροδέματος ρητίνη υπό πίεση ή διογκούμενο κονίαμα.



Κατασκευή ελλειπτικού μανδύα στην κρίσιμη περιοχή υποστυλώματος και προένταση με χρήση διογκούμενου κονιάματος στο κενό μεταξύ σκυροδέματος και μανδύα.

## ΕΠΙΤΑΧΥΜΕΝΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΑΝΣΗ

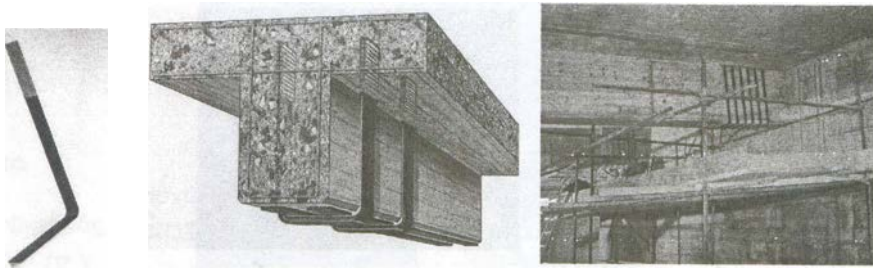
Η σκλήρυνση της εποξειδικής ρητίνης στη διεπιφάνεια ελασμάτων-σκυροδέματος μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά μέσω της χρήσης ειδικών συσκευών θέρμανσης (π.χ. θερμαντικά σώματα, συσκευές θέρμανσης με βάση υπέρυθρες ακτίνες, θερμαντικά καλύμματα), με παράλληλη εκμετάλλευση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ινών άνθρακα (Σχ. 2.11). Έτσι αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα εφαρμογής της ενίσχυσης (π.χ. τρεις ώρες θέρμανσης σε 70 °c αρκούν για πλήρη σκλήρυνση), ακόμα και σε περιπτώσεις που η τελευταία θα ήταν αδύνατη (π.χ. λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, οπότε δεν ευνοείται η σκλήρυνση της ρητίνης). Πρόσθετο πλεονέκτημα της επιταχυμένης σκλήρυνσης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης.



## ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σύνθετα υλικά είναι συνήθως μορφής: (α) Ελάσματος (πάχους της τάξης του 1 mm και πλάτους Π.χ. 50 mm, 100 mm). (β) Γωνιών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ενίσχυσης (π.χ. πλακοδοκών) έναντι τέμνουσας. (γ) Μανδύα-κελύφους, που τοποθετείται περιμετρικά υποστυλωμάτων με

στόχο την αύξηση της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής.



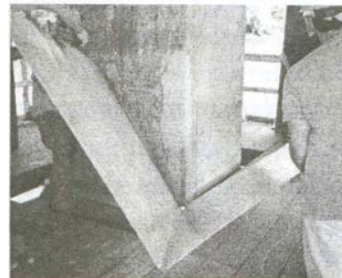
( α )

( β )

( γ )



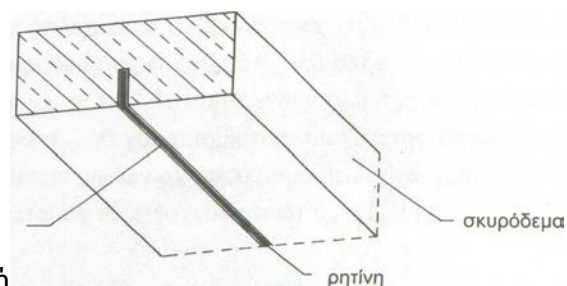
( δ )



( ε )

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΕΓΚΟΠΕΣ

Η τοποθέτηση και επικόλληση (μέσω εποξειδικής ρητίνης) ράβδων ή ελασμάτων σε εγκοπές αποσκοπεί συνήθως στην αύξηση της καμπτικής αντοχής υφισταμένων μελών σκυροδέματος.



Ελασμα σε εγκοπή

Τοποθέτηση ελασμάτων σε εγκοπές.



Τοποθέτηση ράβδων σε εγκοπές

Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής, σε σχέση με την επιφανειακή επικόλληση, είναι η εξαιρετικά βελτιωμένη συνάφεια των συνθέτων υλικών με το σκυρόδεμα και εν γένει η καλύτερη προστασία τους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Ο σχεδιασμός ενισχύσεων με σύνθετα υλικά ακολουθεί τη φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών (π.χ. ΕΚΩΣ 2000, ΕΑΚ 2000), και περιλαμβάνει όλους τους γνωστούς ελέγχους των οριακών καταστάσεων αντοχής και λειτουργικότητας, με τροποποιήσεις όπου χρειάζεται ώστε να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των συνθέτων υλικών. Ειδική μνεία χρειάζεται μόνον η ακραία περίπτωση πρόωρης αστοχίας των οπλισμών ενίσχυσης, Π.χ. λόγω πυρκαϊάς. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται εν γένει ως τυχηματική δράση (και κατά πάσα πιθανότητα δεν απαιτούνται ειδικά μέτρα πυροπροστασίας, όπως Π.χ. σε πολλές εφαρμογές αντισεισμικών ενισχύσεων), σε ειδικές όμως περιπτώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις πυροπροστασίας, η μελέτη ενίσχυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει τον σχεδιασμό αντιστοίχων συστημάτων (π.χ. ειδικά επιχρίσματα ή γυψοσανίδες).

### **4.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Ακολούθως περιγράφονται οι καταστατικοί νόμοι των υλικών σε μονοαξονική φόρτιση και δίνονται οι τιμές για τους μερικούς συντελεστές ασφάλειας.

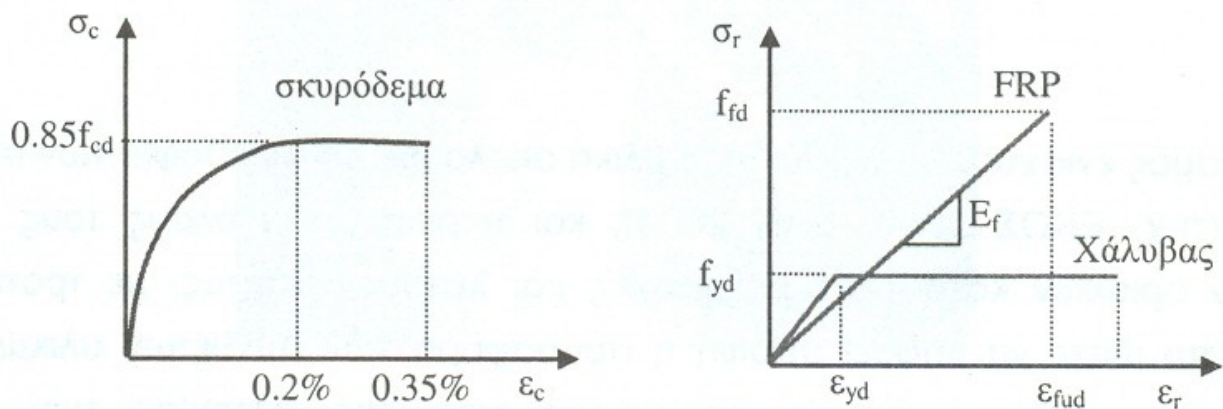
#### **4.2.1 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ-ΠΛΗΡΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΥΛΙΚΩΝ**

Για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα ισχύουν οι υποθέσεις που υιοθετούνται στο σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. ΕΚΩΣ 2000), Σχ. 3.1. Έτσι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι  $0.85 f_{cd} = 0.85 f_{ck} / \gamma_c$  όπου  $f_{ck}$  = χαρακτηριστική αντοχή (κυλίνδρου) και  $\gamma_c = 1.5$ . Η τιμή σχεδιασμού της τάσης

διαρροής του χάλυβα είναι  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s'$  όπου  $f_{yk}$  = χαρακτηριστική τιμή τάσης διαρροής και  $\gamma_s = 1.15$ . Η συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε εφελκυσμό θεωρείται γραμμικά ελαστική μέχρι την θραύση, η οποία επέρχεται σε τάση (σχεδιασμού)  $f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f$ :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fd}$$

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από το λόγο των χαρακτηριστικών τιμών εφελκυστικής αντοχής προς οριακή παραμόρφωση,  $E_f = f_{fk} / \varepsilon_{fuk}$



Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης υλικών για την οριακή κατάσταση αντοχής.

Σε μερικές περιπτώσεις, η επί τόπου εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ενδεχόμενη πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης (στα σύνθετα υλικά, στην ύπαρξη σημαντικού αριθμού στρώσεων κλπ. Μπορεί δε να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς θεωρώντας ότι η αστοχία επέρχεται όταν η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με μία «ενεργή» παραμόρφωση,  $E_{fue}$  που κατά κανόνα είναι μικρότερη από την μέση οριακή παραμόρφωση αστοχίας,  $E_{fum}$  (η τελευταία προσδιορίζεται μέσω δοκιμής εφελκυσμού). Βάσει των παραπάνω, η ενεργή αντοχή σχεδιασμού  $f_{fde}$  για τα σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό μπορεί να υπολογισθεί ως εξής

$$f_{fde} = \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \eta_e f_{fd}$$

Περισσότερα στοιχεία για την ενεργή παραμόρφωση  $\epsilon_{fue}$  θα δοθούν στην περιγραφή των ενοτήτων όπου ο ρόλος αυτής είναι σημαντικός (π.χ. ενίσχυση σε διάτμηση, περίσφιγξη).

Οι τιμές για τον συντελεστή ασφάλειας των συνθέτων υλικών δίνονται στον Πίνακα (*fib* 2001), με την επισήμανση ότι αποτελούν ακόμα αντικείμενο τρέχουσας έρευνας γι' αυτό και θα πρέπει να θεωρούνται ως ενδεικτικές.



| Τύπος ινών | Εφαρμογή τύπου Α <sup>(1)</sup> | Εφαρμογή τύπου Β <sup>(2)</sup> |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Άνθρακας   | 1.20                            | 1.35                            |
| Αραμίδιο   | 1.25                            | 1.45                            |
| Γυαλί      | 1.30                            | 1.50                            |

(1) Χρήση ελασμάτων (προκατασκευασμένων) σε συνήθεις συνθήκες. Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου.

(2) Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες συνηθισμένου βαθμού ποιοτικού ελέγχου. Χρήση οποιουδήποτε υλικού σε δύσκολες συνθήκες επιτόπου εφαρμογής.

#### **4.2.2 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ-ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ**

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός της εφελκυστικής αστοχίας των συνθέτων υλικών δεν ενεργοποιείται, αλλά αντ' αυτού παρατηρείται αποκόλλησή τους από την επιφάνεια του σκυροδέματος (το φαινόμενο περιγράφεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο). Η αποκόλληση αυτή οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος - συνθέτων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω του σκυροδέματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνήθεις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφάλειας υλικού αφορά στο σκυρόδεμα, και λαμβάνεται ίσος με  $\gamma_b = 1,5$ .

#### **4.2.3 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων υλικών μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίσο με αυτό που υπολογίζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας, και φυσικά όλοι οι συντελεστές ασφάλειας των υλικών είναι ίσοι με 1.0.

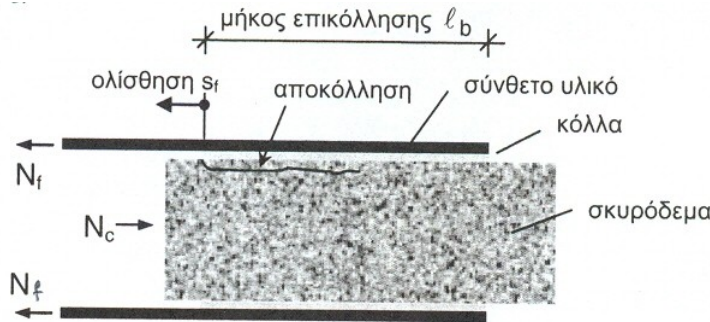
#### **4.3 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Η πλήρης συνεργασία των συνθέτων υλικών με το σκυρόδεμα προϋποθέτει την ύπαρξη ισχυρού δεσμού μεταξύ των δύο υλικών, ο οποίος εξασφαλίζεται μέσω των εποξειδικών ρητινών. Τυχόν αστοχία του δεσμού αυτού (απώλεια συνάφειας) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους ελέγχους των οριακών καταστάσεων.



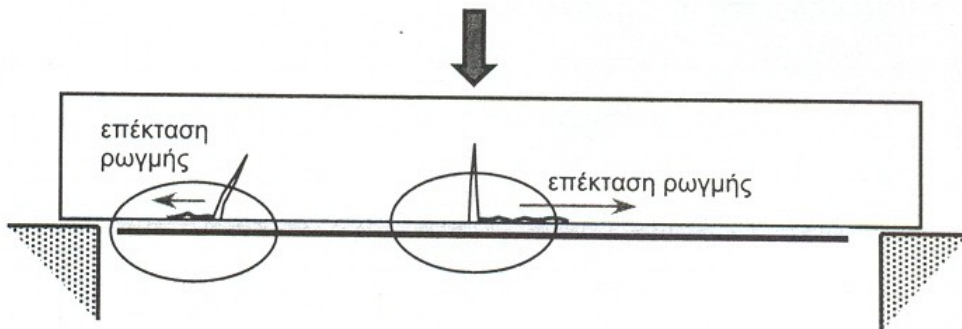
### 4.3.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η συμπεριφορά του δεσμού συνθέτων υλικών - σκυροδέματος μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή μέσω απλών δοκιμών συνάφειας, η οποία αντιπροσωπεύει (κατά προσέγγιση) την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε περιοχές ρωγμών, όπως δείχνεται για παράδειγμα στη δοκό του Σχ. 3.3 (Δοκιμή συνθέτων υλικών -



σκυροδέματος)

Ρηγμάτωση δοκού οπλισμένου σκυροδέματος και ενδεχόμενη αστοχία λόγω

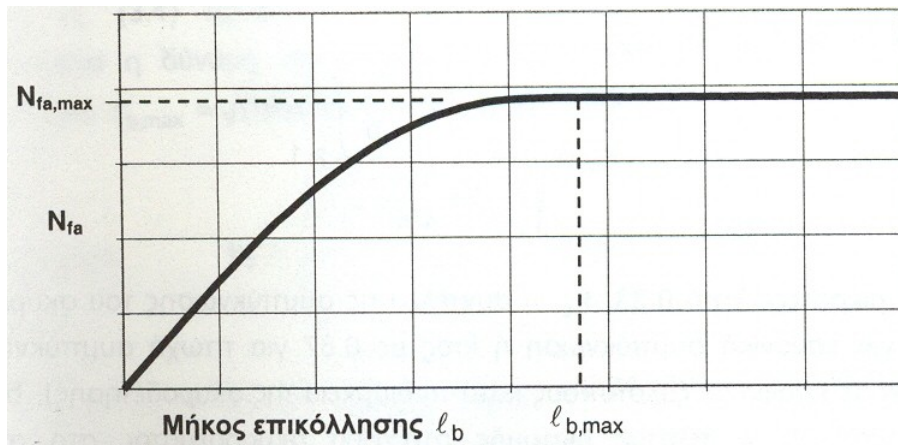


αποκόλλησης των συνθέτων υλικών (τα βέλη δείχνουν τη φορά επέκτασης της αποκόλλησης).

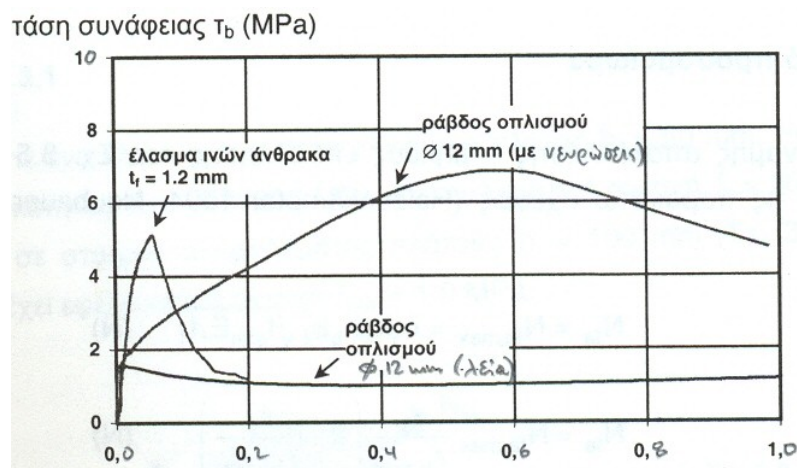
Στις περιοχές ανάπτυξης ρωγμών, όπως αυτές στο παράδειγμα του Σχ. 3.3, ο εξωτερικός οπλισμός παραλαμβάνει εφελκυστική δύναμη  $N_f$  (Σχ. 3.2), η οποία μεταφέρεται στο σκυροδέμα μέσω διάτμησης. Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της μέσης διατμητικής τάσης  $\tau_b$  στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών και σκυροδέματος (ίση με  $N_f / l_b b_f$  στο Σχ. 3.2, όπου  $b_f$  το πλάτος του ελάσματος) συναρτήσει της ολίσθησης

$s_f$ . Η σχέση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι η αντοχή του σκυροδέματος, η ποιότητα της κόλλας, τα χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών (π.χ. πάχος, μέτρο ελαστικότητας) και το μήκος επικόλλησης. Μπορεί δε να παρασταθεί γραφικά όπως δείχνει το σχήμα, στο οποίο δίνονται για λόγους σύγκρισης και ενδεικτικές σχέσεις τάσης συνάφειας - ολίσθησης για ράβδους οπλισμού με ή χωρίς νευρώσεις.

Σχέσεις τάσης συνάφειας - ολίσθησης .



Σχέση δύναμης αποκόλλησης συνθέτων υλικών συναρτήσει του μήκους επικόλλησης



Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του δεσμού συνθέτων υλικών σκυροδέματος είναι ότι η θραύση των συνθέτων 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 διαρροή τους - πριν την απώλεια συνάφειας. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση (η οποία, σημειωτέον, 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  $f_b$ , μέχρις ότου αυτό λάβει μία οριακή τιμή  $f_{b,max}$ , πέρα από την οποία η δύναμη αποκόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με  $N_{fa,max}$ .

### 4.3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Η σχέση δύναμης αποκόλλησης - μήκους επικόλλησης του Σχ. 3.5 περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις (Holzenkampfer 1994, Neubauer and Rostasy 1999):

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,\max} : \quad N_{fa} = N_{fa,\max} = c_1 k_c k_b b_f \sqrt{f_{ctm} E_f t_f} \quad (N)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max} : \quad N_{fa} = N_{fa,\max} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right) \quad (N)$$

$$\ell_{b,\max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{C_2 f_{ctm}}} \quad (\text{mm})$$

όπου

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 \left( 2 - \frac{b_f}{b} \right)}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

με  $b_f / b$  όχι μικρότερο από 0.33,  $k_c$  = συντελεστής συμπύκνωσης του σκυροδέματος, ίσος με 1,0 για κανονική συμπύκνωση ή ίσος με 0.87 για πτωχή συμπύκνωση (π.χ. επιφάνειες όχι σε επαφή με ξυλοτύπους κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης),  $b_f$  = πλάτος ελάσματος (mm),  $b$  = πλάτος διατομής στοιχείου σκυροδέματος στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα (mm),  $f_{ctm}$  = μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa),  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών (MPa) και  $t_f$  = πάχος ελάσματος συνθέτων υλικών (mm). Επίσης,  $C_1 = 0.64$  (ή 0.50, αν το ζητούμενο είναι η χαρακτηριστική τιμή της  $N_{fa,\max}$ ) και  $C_2 = 2.0$ .

Σε όρους τάσεων, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αποκόλληση των συνθέτων υλικών επέρχεται όταν η εφελκυστική τάση σχεδιασμού σε αυτά ( $\sigma_{fd} = N_{fad} / b_f t_f$ ) γίνει ίση με:

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max} : \quad \sigma_{fd} = \frac{0.5 k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm} E_f}{t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right) \quad (\text{MPa})$$

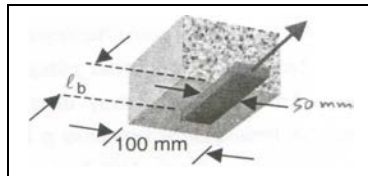


$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,\max} : \quad \sigma_{fd} = \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm} E_f}{t_f}}$$

### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Θεωρήστε ένα έλασμα συνθέτου υλικού με πλάτος  $b_f = 50 \text{ mm}$ , πάχος  $t_f = 1.2 \text{ mm}$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 180000 \text{ MPa}$

,0 και εφελκυστική αντοχή  $f_f = 3000 \text{ MPa}$ , το οποίο επικολλάται σε στοιχείο σκυροδέματος πλάτους  $b = 100 \text{ mm}$ . Έστω ότι το σκυροδέμα έχει εφελκυστική αντοχή  $f_{ctm} = 1.9 \text{ MPa}$ .



Από την εξίσωση προκύπτει ότι το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η δύναμη που μπορεί να παραλάβει το έλασμα πριν αποκολληθεί

$$(N_{fa,\max}) \text{ είναι } \ell_{b,\max} = \sqrt{(180000 \times 1.2) / (2 \times 1.9)} = 238 \text{ mm.}$$

επομένως

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 \left( 2 - \frac{50}{100} \right)}{1 + \frac{50}{400}}} = 1.22 > 1,$$

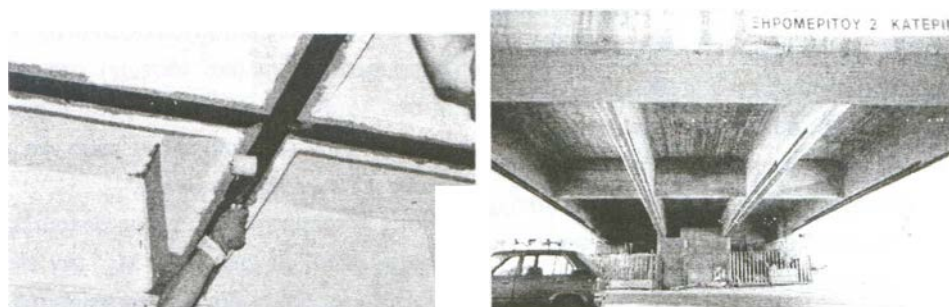
οπότε από την εξ. (3.3<sup>α</sup>) υπολογίζεται  $N_{fa,\max} = 0.64 \cdot 1.0 \cdot 1.22 \cdot 50 \cdot 1.9 \cdot 180000 \cdot 1.2 = 25010 \text{ N} = 25 \text{ kN}$  και η τάση στο έλασμα θα είναι  $25010 / (50 \cdot 1.2) = 417 \text{ MPa}$  [εδώ αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αν το έλασμα εξαντλούσε την αντοχή του θα μπορούσε να παραλάβει συνολική δύναμη  $N_f = 3000 \cdot (50 \cdot 1.2) / 1000 = 180 \text{ kN}$  δηλαδή περίπου 7-πλάσια της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση].

Αν το ζητούμενο είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση **σχεδιασμού** (για μήκος επικόλλησης τουλάχιστον ίσο με 238 mm), --από την εξίσωση προκύπτει (με συντελεστή ασφάλειας  $\gamma_b = 1.5$ )  $\sigma_{fd} = 217 \text{ MPa}$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ**

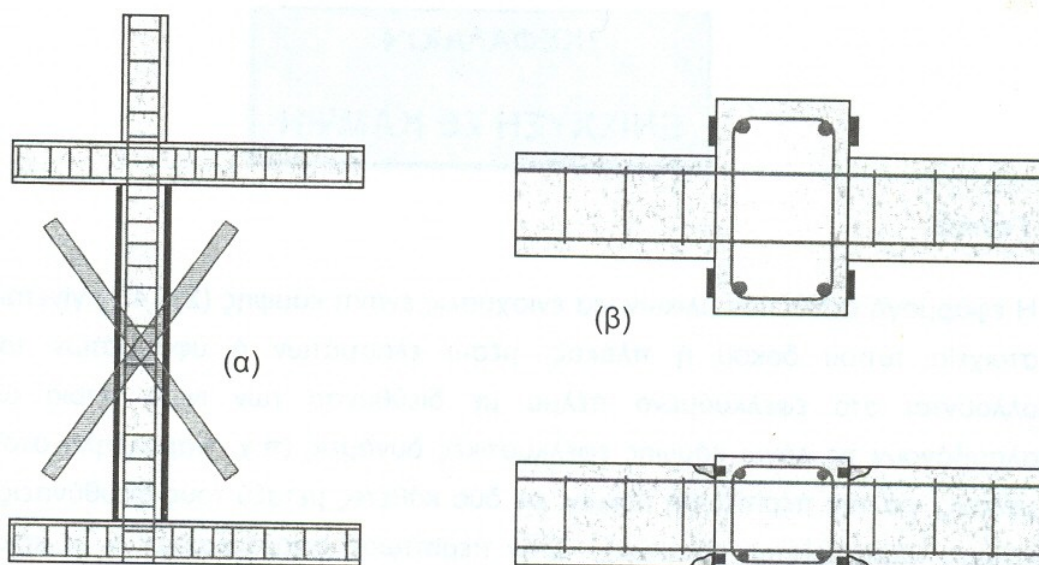
### **5.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η εφαρμογή συνθέτων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται κυρίως σε στοιχεία τύπου δοκού ή πλάκας, μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (π.χ. παράλληλα στον άξονα του μέλους, για την περίπτωση δοκών, σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις για την περίπτωση τετραερείστων πλακών). Στην περίπτωση υποστυλωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η εφαρμογή των συνθέτων υλικών σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η συνέχεια (αγκύρωση) των οπλισμών εντός των κόμβων. Τούτο γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστυλώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί συνθέτων υλικών μικρού πλάτους (π.χ. μορφής ράβδων), όπως δείχνει το Σχήμα.



Παραδείγματα εφαρμογής ελασμάτων για την καμπτική ενίσχυση δοκών.

Οι υπολογισμοί για τους ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας σε εφαρμογές καμπτικών ενισχύσεων γίνονται κατ' αναλογία με αυτούς για συμβατικά οπλισμένα (με





χαλύβδινες ράβδους) μέλη, λαμβάνοντας υπόψη όμως: (ο) τις ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς των συνθέτων υλικών (π.χ. γραμμική ελαστικότητα μέχρι τη θραύση) και (β) το ενδεχόμενο πρόωρης αποκόλλησης τους από το σκυρόδεμα.

Ενδεικτικές διατάξεις καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων για μέγιστη ροπή στα άκρα. (α) Εσφαλμένη εφαρμογή, (β) συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω του κόμβου, (γ) συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου.

## **5.2 ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Όπως θα φανεί παρακάτω, οι υπολογισμοί των απαιτούμενων ποσοτήτων συνθέτων υλικών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι έλεγχοι για τις οριακές καταστάσεις αντοχής και λειτουργικότητας προϋποθέτουν γνώση των παραμορφώσεων (και τάσεων) στα υπό ενίσχυση δομικά στοιχεία κατά τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα η ενίσχυση (αρχική κατάσταση). Σημειώνεται δε ότι τα δομικά στοιχεία δρουν ως ενισχυμένα μόνο για τα πρόσθετα φορτία, αυτά δηλαδή τα οποία ασκούνται μετά την ενίσχυση.

Ας υποθέσουμε ότι κατά τη φάση της ενίσχυσης η κρίσιμη διατομή μιας δοκού καταπονείται σε ροπή  $M_o$ , μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  (αν είναι μικρότερη, η επίδραση της  $M_o$  είναι αμελητέα). Από ισορροπία δυνάμεων στη διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $X_o$ :

$$\frac{1}{2}bx_o^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_o)$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{o2}}$$

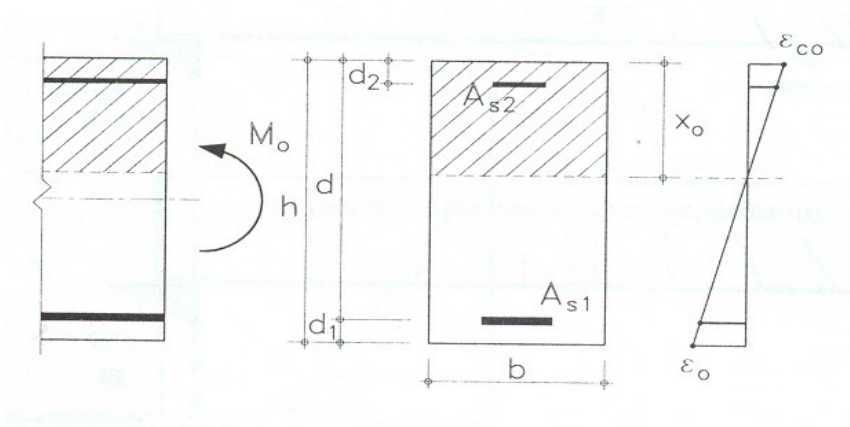
όπου  $AS_1$  = εμβαδόν εφελκόμενου χάλυβα,  $AS_2$  = εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα,  $d_1$  = απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκόμενη ίνα,  $d_2$  = απόσταση κέντρου βάρους διατομής θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα,  $d$  = στατικό ύψος,  $h$  = ύψος διατομής,  $b$  = πλάτος διατομής και  $\alpha_s = E_s / E_c$  = λόγος μέτρου ελαστικότητας χάλυβα προς μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος. Η παραμόρφωση  $\varepsilon_{co}$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος είναι όπου  $I_{o2}$  είναι η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής, ίση με

$$I_{o2} = \frac{bx_o^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_o)^2$$

Τέλος, η παραμόρφωση  $\varepsilon_o$  στην ακραία εφελκόμενη ίνα υπολογίζεται βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων ως εξής:

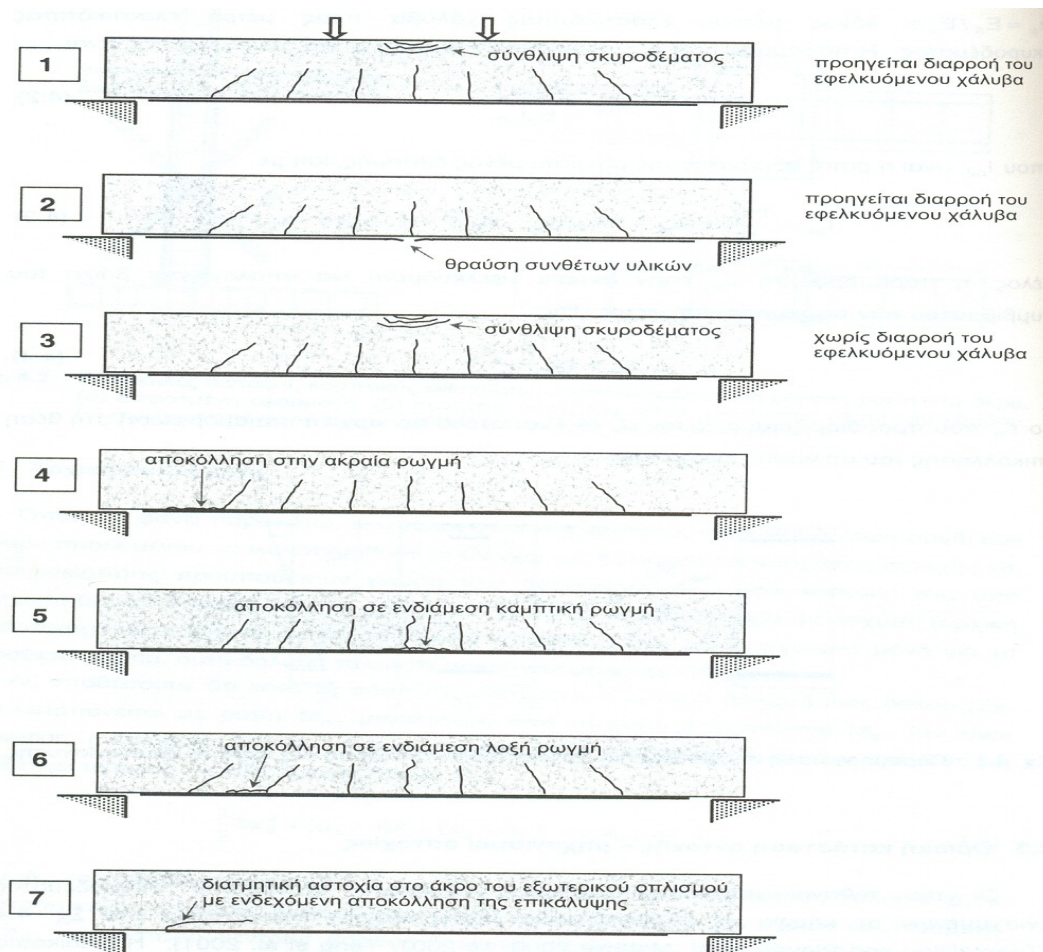
$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o}$$

Το  $\varepsilon_o$  που προσδιορίζεται από την εξίσωση αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης.



### 5.3 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ-ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Οι πιο πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά περιγράφονται παραστατικά στο Σχήμα (Triantafyllou and Plevris 1992, Matthys 2000, fib 2001, Teng et al. 2001).





## 5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ

Οι τρεις πρώτοι από τους παραπάνω μηχανισμούς δεν σχετίζονται με πρόωρες αστοχίες (π.χ. αποκολλήσεις των συνθέτων υλικών). Έτσι το ενισχυμένο στοιχείο μπορεί να μελετηθεί ως ένα σύμμικτο στοιχείο, στο οποίο υπάρχει *πλήρης συνεργασία* μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών οπλισμών. Όλοι οι υπόλοιποι μηχανισμοί αντιστοιχούν σε απώλεια της πλήρους συνεργασίας και αναλύονται ξεχωριστά.

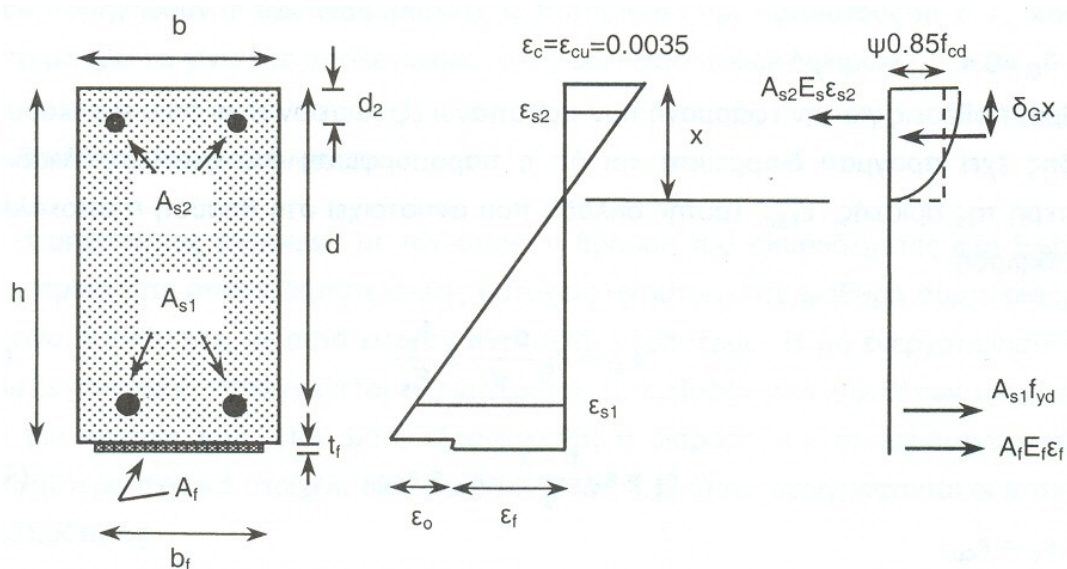
### 5.4.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΛΗΡΟΥΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

#### (1) Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, ο οποίος είναι και ο πλέον επιθυμητός, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως υφίσταται σύνθλιψη το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

(α)

(β) (γ)



Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (β) κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) κατανομή εσωτερικών δυνάμεων.

Υπολογισμός ύψους θλιβόμενης ζώνης,  $x$ , από ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων:

όπου  $\psi = 0.8$ ,  $f_{cd}$  = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (τιμή σχεδιασμού),  $x$  = ύψος

$$0.85\psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_f\varepsilon_f$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \frac{x - d_2}{x}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o$$

θλιβόμενης ζώνης,  $f_{yd}$  = τάση διαρροής χάλυβα (τιμή σχεδιασμού) και  $A_i$  = εμβαδόν διατομής συνθέτων υλικών.  $\epsilon_{s2}$  και  $\epsilon_i$  είναι οι παραμορφώσεις του θλιβόμενου χάλυβα και των συνθέτων υλικών, αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (συμβιβαστό παραμορφώσεων):

Στις παραπάνω σχέσεις  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  είναι η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος ( $=0.0035$ ) και  $\epsilon_o$  η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκούμενη ίνα. Επίσης, το γινόμενο  $E_s \epsilon_{s2}$  (τάση στον θλιβόμενο χάλυβα) στην εξίσωση δεν θα πρέπει να λαμβάνεται πάνω από  $f_{yd}$ .

Υπολογισμός ροπής αντοχής

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \epsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (\delta_G x - d_2)$$

όπου  $\delta_G = 0.4$ .

Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων είναι ότι ο εφελκούμενος χάλυβας έχει πράγματι διαρρεύσει και ότι η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι μικρότερη της οριακής,  $\epsilon_{f,lim}$  (αυτής δηλαδή που αντιστοιχεί στη θραύση ή αποκόλλησή τους), δηλαδή:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_c \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\epsilon_f = \epsilon_c \frac{h-x}{x} - \epsilon_o \leq \epsilon_{f,lim}$$

όπου  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ .

## (2) Διαρροή εφελκούμενου χάλυβα, θραύση συνθέτων υλικών

Ο μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο μετά τη διαρροή του εφελκούμενου χάλυβα

$$\psi = \begin{cases} 1000\epsilon_c \left( 0.5 - \frac{1000}{12}\epsilon_c \right) & \text{για } \epsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\epsilon_c} & \text{για } 0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035 \end{cases}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\epsilon_c}{4(6 - 1000\epsilon_c)} & \text{για } \epsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000\epsilon_c(3000\epsilon_c - 4) + 2}{2000\epsilon_c(3000\epsilon_c - 2)} & \text{για } 0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035 \end{cases}$$

ακολουθεί θραύση των συνθέτων υλικών είναι γενικά σπάνιος (ενδέχεται να εμφανιστεί αν το εμβαδόν διατομής των συνθέτων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό). Πάντως, για λόγους πληρότητας μπορούμε να αναφέρουμε ότι η ανάλυση της κρίσιμης διατομής στην περίπτωση αυτή γίνεται όπως παραπάνω, δηλαδή ισχύουν οι εξ. (4.5) - (4.10), με τις εξής τροποποιήσεις: (α) Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα δεν είναι κατ' ανάγκη ίση με την οριακή. (β) Η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με την οριακή, δηλ  $\epsilon_i = \epsilon_{iud}$ . γ) Οι συντελεστές  $\Psi$  και  $\delta G$  δίνονται από τις σχέσεις:

Έτσι, για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων (αφού προηγηθούν οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις) με αγνώστους τα  $X$ ,  $\epsilon_c$  και  $M_{Rd}$ . Τούτο μπορεί να γίνει είτε υπολογιστικά, είτε βάσει διαδοχικών δοκιμών.

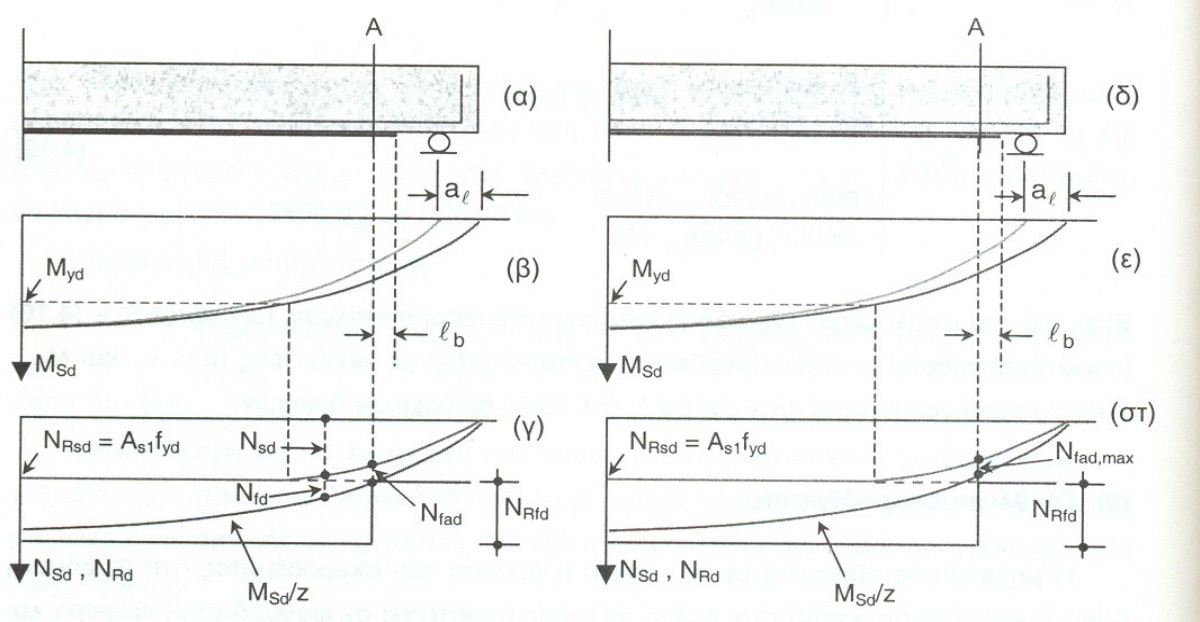
### (3) Σύνθλιψη σκυροδέματος

Η μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο η θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά και δεν είναι αποδεκτός, γι' αυτό και δεν αναλύεται περαιτέρω. Η μη ενεργοποίηση του εν λόγω μηχανισμού επιτυγχάνεται περιορίζοντας το εμβαδόν των συνθέτων υλικών κάτω από μία κρίσιμη τιμή, έτσι ώστε εξασφαλισθεί η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα.

## **5.4.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ**

### (4) Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Εφαρμόζοντας το αναλυτικό προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3 μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης στα άκρα των συνθέτων υλικών ώστε να μην επέλθει αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη δοκό του σχήματος, με διάγραμμα ροπών αυτό του σχήματος (σημειώνεται ότι το διάγραμμα ροπών πρέπει να μετατεθεί κατά  $a$ , βάσει του μηχανισμού ισοδυνάμου δικτυώματος για το μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας). Το σχήμα δίνει τις δυνάμεις που ασκούνται τόσο στον εφελκυσμένο χάλυβα ( $N_{sd}$ ) όσο και στα σύνθετα υλικά ( $N_{fd}$ ) σε κάθε διατομή, ως αποτέλεσμα της δρώσης ροπής σχεδιασμού  $M_{sd}$ . Προσεγγιστικά, η συνολική εφελκυστική δύναμη (σε ράβδους οπλισμού και σύνθετα υλικά), δηλαδή το άθροισμα  $N_{sd} + N_{fd}$ , ισούται με  $M_{sd} / Z$ , όπου  $Z$  ο μοχλοβραχίονας της δύναμης αυτής, περίπου ίσος με  $0.95 d$ .



Η θέση (διατομή A) πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης των συνθέτων υλικών προσδιορίζεται εκεί όπου η καμπύλη της συνολικής εφελκυστικής δύναμης  $M_{Sd} / Z$  τέμνει τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί από το χάλυβα μόνο,  $N_{Rsd} = A_{s1}f_{yd}$ . Στη θέση αυτή η εφελκυστική δύναμη στα σύνθετα υλικά είναι

$$\frac{M_{Sd}}{Z} = N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1}E_s\varepsilon_{s1}}{A_fE_f\varepsilon_f} \right) \approx N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1}E_s}{A_fE_f} \right)$$

$N_{fad}$ , ενώ το αντίστοιχο μήκος αγκύρωσης είναι  $l_b$ . Η προς αγκύρωση δύναμη  $N_{fad}$  (τιμή σχεδιασμού) μπορεί να προσεγγιστεί βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής:

Στην παραπάνω σχέση θεωρήθηκε ότι  $\varepsilon_{s1} / \varepsilon_f = 1$ .

Είναι αυτονόητο ότι η  $N_{fad}$  δεν πρέπει να ξεπερνά την  $N_{fad,max}$  [εξ. (3.3<sup>ο</sup>), με συντελεστή ασφάλειας  $\gamma_b$ ] και ότι θα πρέπει να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης  $l_b$ . Αν αυτό δεν συμβαίνει, η διατομή A θα πρέπει να ορισθεί παραπέρα (προς την κατεύθυνση όπου μειώνεται η ροπή κάμψης, δηλ. κοντά στη στήριξη), Σχ. 4.6δ-στ, έτσι ώστε ή να μειωθεί η  $N_{fad}$  μέχρι την τιμή  $N_{fad,max}$ , ή να απαιτείται μικρότερο  $l_b$  (όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5, μικρή σχετικά μείωση στη  $N_{fad}$  επιφέρει σημαντική μείωση στο  $l_b$ ). Αν το μήκος αγκύρωσης και πάλι δεν επαρκεί, θα πρέπει είτε να αυξηθεί το πλάτος και να μειωθεί το πάχος των ελασμάτων, είτε να βελτιωθεί η αγκύρωση με μηχανικό τρόπο.

##### (5) Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή

Και εδώ μπορεί να εφαρμοστεί το αναλυτικό προσομοίωμα, στο οποίο όμως πρέπει να γίνει μία μικρή διόρθωση, δεδομένου ότι η πραγματική εντατική κατάσταση στη

διεπιφάνεια συνθέτων υλικών - σκυροδέματος στις περιοχές δοκών με κατακόρυφη ρηγμάτωση (χαμηλή τιμή τέμνουσας δύναμης) διαφέρει ως προς αυτήν της πειραματικής διάταξης του. Λεπτομερείς αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία αλλά και πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για αποκολλήσεις σε περιοχές πολύ μικρής ή μηδενικής τέμνουσας η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με αυτήν της διάταξης του. Με βάσει λοιπόν διαθέσιμα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Teng et al. 2001), προτείνεται μία ελαφρά τροποποίηση, η οποία συνίσταται στην προσαύξηση της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση κατά 30%.

Συμπερασματικά, η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για αποκόλληση σε περιοχές καμπτικών ρωγμών (όπου η τέμνουσα είναι πρακτικά μηδέν) είναι:

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,\max} : \quad \varepsilon_{fbd,fl} = \alpha_{fl} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max} : \quad \varepsilon_{fbd,fl} = \alpha_{fl} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right)$$

όπου  $\alpha_{fl} = 1.30$ .

Κατά τα λοιπά, οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται όπως ακριβώς στην παραπάνω περίπτωση (2), με  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fbd,fl}$ .

#### (6) Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή

Για αποκολλήσεις σε καμπτο-διατμητικές ρωγμές ισχύουν οι παρατηρήσεις της προηγούμενης παραγράφου, με τη διαφορά ότι η προσαύξηση της δύναμης αποκόλλησης είναι μικρότερη, της τάξης του 25%. Έτσι η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι:

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,\max} : \quad \varepsilon_{fbd,fl-sh} = \alpha_{fl-sh} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max} : \quad \varepsilon_{fbd,fl-sh} = \alpha_{fl-sh} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right)$$

όπου  $\alpha_{fl-sh} = 1.25$ .

Κατά τα λοιπά, οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται όπως ακριβώς στην παραπάνω περίπτωση (2), με  $\epsilon_{fbd,fl-sh}$ .

### (7) Διατμητική αστοχία στο άκρο - αποκόλληση της επικάλυψης

Η αποκόλληση των συνθέτων υλικών λόγω της ανάπτυξης διατμητικής ρωγμής στο 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, ο οποίος οφείλει τη γένεσή του κατά βάση στην ανάπτυξη σημαντικών οριζοντίων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του οπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων, στη στρώση επικάλυψης του σκυροδέματος, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης δεκάδων ερευνητών (π.χ. Oehlers 1992, Ziraba et al. 1994, Jansze 1997, Raoof and Hassanen 2000). Μία απλή, συντηρητική και αρκετά αξιόπιστη μέθοδος αντιμετώπισης περιλαμβάνει την παρακάτω σειρά ελέγχων:

$$V_{Sd,end} \leq 1.4V_{cd}$$

$$M_{Sd,end} \leq \frac{2}{3}M_{Rd}$$

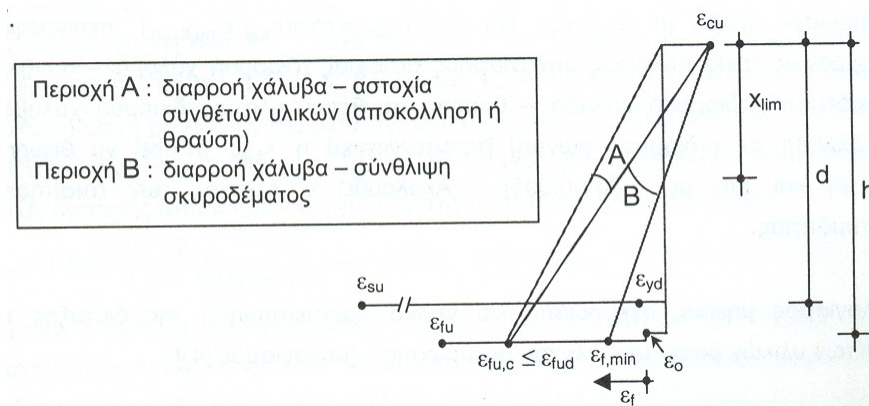
όπου  $V_{Sd,end}$  και  $M_{Sd,end}$  είναι η δρώσα τέμνουσα και ροπή (τιμές σχεδιασμού), αντίστοιχα, στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά,  $V_{cd}$  είναι η διατμητική αντοχή του μέλους αγνοώντας τη συνεισφορά οπλισμών διάτμησης (συνδετήρες) και  $M_{Rd}$  είναι η ροπή αντοχής του μέλους [δηλαδή η ελάχιστη τιμή εξ αυτών που αντιστοιχούν στους μηχανισμούς (1), (2), (5) και (6)]. Επισημαίνεται ότι η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται εύκολα, Π.χ. ρυθμίζοντας τη θέση τερματισμού των συνθέτων υλικών. Αν όμως δεν ικανοποιείται η συνθήκη, τότε απαιτείται ενίσχυση του μέλους (στην περιοχή κοντά στα άκρα των συνθέτων υλικών) έναντι τέμνουσας.

### **5.5 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ**

Βασική απαίτηση πλαστιμότητας αποτελεί η ενεργοποίηση μηχανισμού αστοχίας κατά τον οποίο η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα θα προηγείται σαφώς οποιασδήποτε άλλης αστοχίας, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται μία ελάχιστη τιμή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ). Τούτο σημαίνει ότι η εφελκυστική παραμόρφωση των συνθέτων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής,  $\epsilon_{fu,c}$ , θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή,  $\epsilon_{f,min}$ , ενώ έχει ως άνω όριο είτε την παραμόρφωση θραύσης,  $\epsilon_{fud}$ , είτε την παραμόρφωση εκείνη η οποία αντιστοιχεί σε



αποκόλληση (όχι όμως κατ' ανάγκη στην κρίσιμη διατομή σε κάμψη).



Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της κρίσιμης διατομής.

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά κατά την οριακή κατάσταση αντοχής,  $\epsilon_{f,min}$ , για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων,  $\mu_\phi$ , υπολογίζεται

$$\epsilon_{f,min} = \epsilon_{yd} \frac{\mu_\phi}{\left(\frac{d}{h} - \frac{x_y}{h}\right)} \frac{h}{d} - \epsilon_{cu} - \epsilon_0$$

από την παρακάτω σχέση:

όπου  $X_y$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την εκκίνηση διαρροής του χάλυβα. Σημειώνεται πάντως ότι η επίτευξη μεγάλης πλαστιμότητας δεν είναι πάντα εφικτή ιδιαίτερα όταν η απαιτούμενη ποσότητα συνθέτων υλικών καθορίζεται από τις απαιτήσεις της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας, οπότε το μέλος είναι υπερ-διαστασιολογημένο σε όρους αντοχής.

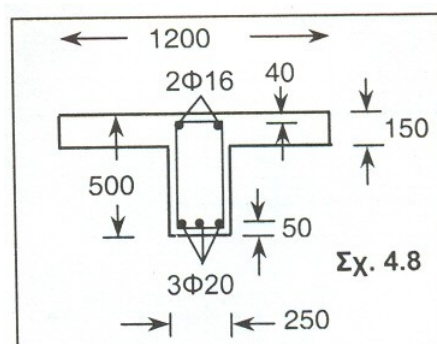
## **5.6 ΣΥΝΟΨΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ-ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ**

Η προτεινόμενη διαδικασία ελέγχων για την οριακή κατάσταση αντοχής συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός ροπής αντοχής πριν από την ενίσχυση ( $M_{o,Rd}$ ).
2. Υπολογισμός της αρχικής παραμόρφωσης εο στην ακραία εφελκυσμένη ίνα βάσει της ροπής  $M_o$  που ασκείται στην κρίσιμη διατομή κατά τη φάση της ενίσχυσης.
3. Υπολογισμός απαιτούμενης ποσότητας οπλισμού συνθέτων υλικών  $A_f$  (για δεδομένη  $M_{Rd}$ ) για τις περιπτώσεις αστοχίας (1), (2) και (6) [ή (5), αν δεν δρα τέμνουσα δύναμη] στην κρίσιμη διατομή, βάσει των εξ. (4.5)-(4.12). Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις αυτές με  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$  και  $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{f,lim} = \min(\varepsilon_{fud}, \varepsilon_{fbd,fl-sh})$  περιγράφουν ταυτοχρόνως τρεις πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας (διαρροή χάλυβα - σύνθλιψη σκυροδέματος, διαρροή χάλυβα - θραύση συνθέτων υλικών, διαρροή χάλυβα - αποκόλληση σε ενδιάμεση ρωγμή) [προσεγγιστικά η  $\varepsilon_{f,lim}$  μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 0.004-0.005. Ακολουθεί ο έλεγχος των απαιτήσεων πλαστιμότητας.
4. Υπολογισμός μήκους αγκύρωσης και γενικά οριστικοποίηση της διάταξης των συνθέτων υλικών βάσει του ελέγχου αγκύρωσης - [μηχανισμός (4)].
5. Έλεγχος μηχανισμού [7] (διατμητική αστοχία στο άκρο). Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται γίνεται ενίσχυση σε τέμνουσα.
6. Έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας του μέλους από διάτμηση (δεδομένου ότι έχει αυξηθεί η καμπτική αντοχή). Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται απαιτείται ενίσχυση.

## **5.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Θεωρούμε αμφιέριστη πλακοδοκό ανοίγματος 5 m με γεωμετρία διατομής όπως φαίνεται στο σχήμα. Η δοκός φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $q_d = 15$  kN/m (μόνιμο) και  $q_d = 30$  kN/m (κινητό). Υλικά: C20/25, 8500s. Να γίνουν οι υπολογισμοί καμπτικής ενίσχυσης με στόχο την αύξηση του κινητού φορτίου σχεδιασμού σε 50 kN/m. Θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1.1 mm, πλάτους 80 mm, μέτρου ελαστικότητας  $E_i = 150$  GPa και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού)  $\varepsilon_{fud} = 0.01$ .





Γεωμετρικά στοιχεία:  $A_{s1} = 940 \text{ mm}^2$ ,  $A_{s2} = 400 \text{ mm}^2$ ,  $h = 500 \text{ mm}$ ,  $d = 450 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 50 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 40 \text{ mm}$  και  $b = 1200 \text{ mm}$ . Η ροπή κάμψης κατά τη διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης είναι  $M_o = 15 \times 52 / 8 = 46.9 \text{ kNm}$ . Ο λόγος  $a_s = E_s / E_c$  είναι  $200 / 29 = 6.9$ . Επιλύοντας τις εξ. (4.1)-(4.4) βρίσκουμε  $\epsilon_o = 0.00066$ . Ακολουθώντας υπολογίζουμε την απαιτούμενη ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση:  $M_{Rd} \geq 65 \times 52 / 8 = 203.12 \text{ kNm}$ .

Θεωρώντας  $k_c = 1$  και  $k_b = 1.2$ , η εξ. (4.14<sup>a</sup>) για αποκόλληση στην περιοχή της μεσαίας διατομής (όπου η ροπή είναι μέγιστη και η τέμνουσα μηδέν) δίνει:

$$\epsilon_{fbd,fl} = 1.30 \frac{0.5 \times 1.2}{1.5} \sqrt{\frac{2.2}{150000 \times 1.1}} = 0.002, \text{ οπότε } \epsilon_{f,lim} = \min(0.01, 0.002) = 0.002.$$

Αυτή είναι η τιμή της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά στη διατομή όπου η ροπή είναι

μέγιστη (μέσον ανοίγματος), κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας (λόγω αποκόλλησης).

**Ακολουθώντας, από τις εξ. (4.5) - (4.12) υπολογίζεται  $\chi = 105 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_c = 0.00071$ , και**

$A_f = 246.9 \text{ mm}^2$ . Το εμβαδόν κάθε ελάσματος είναι  $88 \text{ mm}^2$ , οπότε απαιτούνται συνολικά 3 ελάσματα, συνολικού εμβαδού  $264 \text{ mm}^2$ , τα οποία αντιστοιχούν σε  $M_{Rd} = 205.83 \text{ kNm}$ ,  $\chi = 106 \text{ mm}$  και  $\epsilon_c = 0.00072$ . Τα ελάσματα αυτά θα τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός διπλής στρώσης.

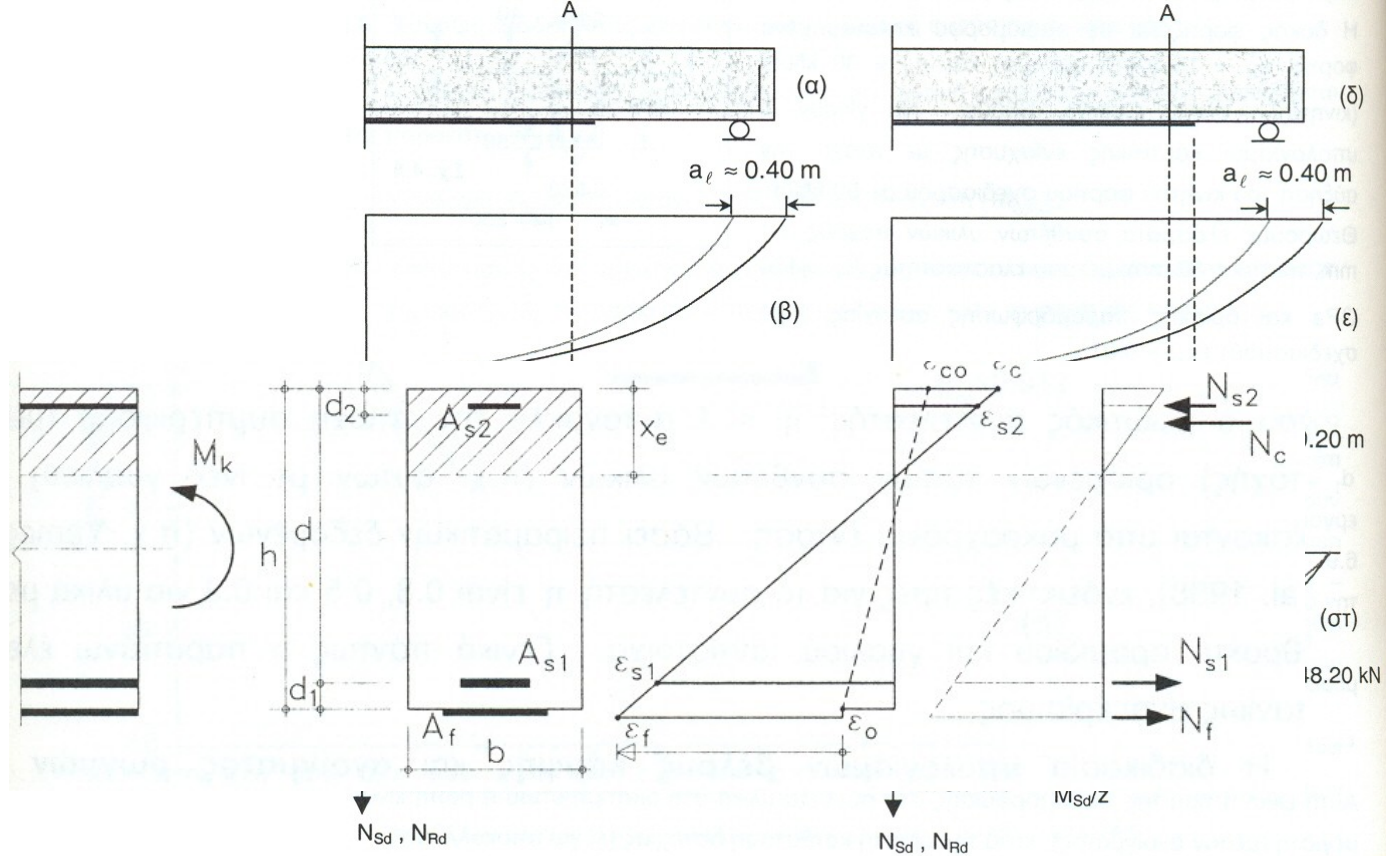
Ακολουθεί ο υπολογισμός της αγκύρωσης στα άκρα (Σχ. 4.9). Βάσει αυτού προκύπτει ότι τα ελάσματα θα πρέπει να επικολληθούν σε μήκος  $4.10 \text{ m}$ . Τέλος, γίνεται ο έλεγχος διατμητικής αστοχίας στο άκρο:

$$V_{Sd,end} = 65 \left( \frac{5}{2} - 0.45 \right) = 133.25 \text{ kN}, \quad M_{Sd,end} = 65 \times 0.45 \times \left( \frac{5}{2} - \frac{0.45}{2} \right) = 66.54 \text{ kNm}$$

$$1.4 V_{cd} = 1.4 \tau_{Rd} \max(1, 1.6-d) \min(2, 1.2+1.4\rho_\ell) b_w d =$$

$$1.4 \times 0.26 \times 1.15 \times 1.2024 \times 0.25 \times 0.25 \times 0.45 \times 10^3 = 56.62 \text{ kN}$$

Παρατηρούμε ότι η σχέση ικανοποιείται αλλά η σχέση παραβιάζεται, οπότε απαιτείται ενίσχυση στα άκρα για τέμνουσα δύναμη  $133.25 - 56.62 = 76.63 \text{ kN}$



$$408.7 \approx N_{fad} \left( 1 + \frac{940 \times 200}{264 \times 150} \right) \Rightarrow N_{fad} = 71.11 \text{ kN}$$

$$N_{fad,max} = 0.264 \times \left( \frac{0.5 \times 1.0 \times 1.0}{1.5} \sqrt{\frac{2.2 \times 150000}{1.1}} \right) = 48.20 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} b x_e^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_e) + \alpha_f A_f \left[ h - \left( 1 + \frac{\epsilon_o}{\epsilon_c} \right) x_e \right]$$

$$E_c \epsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} b x_e \left( h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1) A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)}$$

**5.8 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Οι υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας μπορούν να βασιστούν σε γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών (εξαιρουμένου βεβαίως του σκυροδέματος σε εφελκυσμό) , όπως δείχνει το σχήμα.

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x_e$  της ρηγματωμένης διατομής υπολογίζεται βάσει των συνθηκών ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων :

Όπου  $a_f = E_f / E_c$  και  $M_k$  η χαρακτηριστική ροπή κάμψης στη διατομή. Οι παραπάνω δυο εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για τους αγνώστους  $x_e$  και  $\epsilon_c$ .

Η ροπή της αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2$$

Ενώ της αρηγμάτωσης μπορεί προσεγγιστικά να λειφθεί ως

$$I_1 \approx \frac{bh^3}{12}$$

Σε ότι αφορά ελέγχους τάσεων, πλέον αυτών για το σκυρόδεμα και το χάλυβα, θα πρέπει να ελεγχθεί ότι η τάση στα σύνθετα υλικά, σι, για το μακροχρόνιο συνδυασμό δράσεων ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\sigma_f = E_f \left( \varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_o \right) \leq \eta f_{fk}$$

όπου ο μειωτικός συντελεστής  $\eta < 1$  αντανακλά την πωχή συμπεριφορά (μείωση αντοχής) ορισμένων τύπων συνθέτων υλικών (π.χ. αυτών με ίνες γυαλιού) όταν βρίσκονται υπό μακροχρόνια ένταση. Βάσει πειραματικών δεδομένων (π.χ. Yamaguchi et al. 1998), ενδεικτικές τιμές για το συντελεστή  $\eta$  είναι 0.8, 0.5 και 0.3 για υλικά με ίνες άνθρακα, αραμιδίου και γυαλιού, αντίστοιχα. Γενικά πάντως ο παραπάνω έλεγχος σπανίως είναι κρίσιμος.

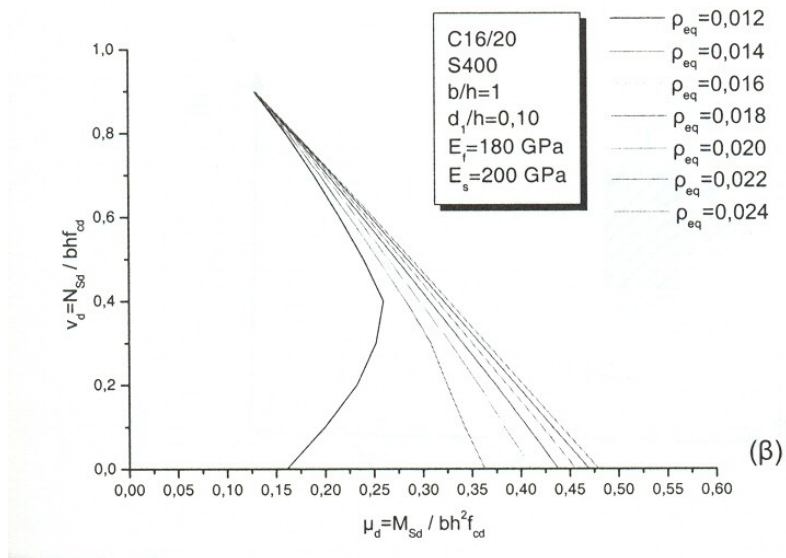
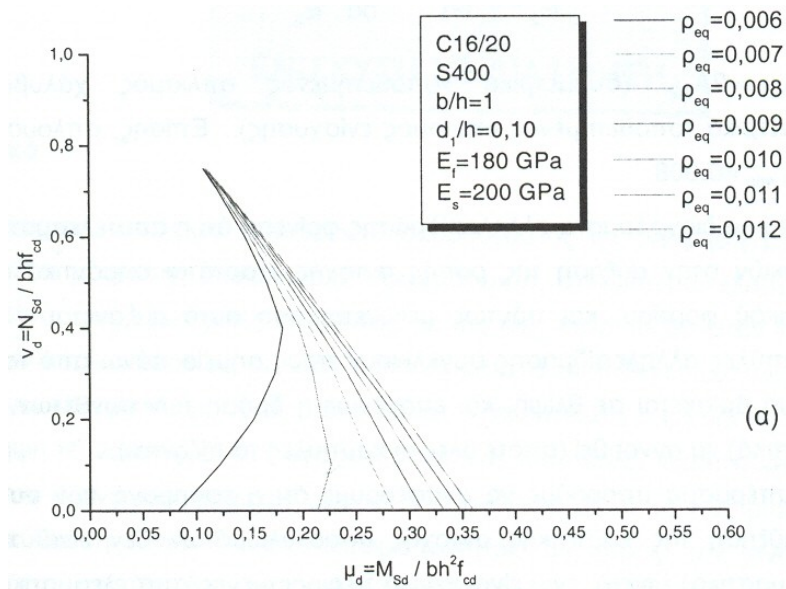
Η διαδικασία υπολογισμών βέλους κάμψης και ανοίγματος ρωγμών είναι αντίστοιχη αυτής για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. *fib* 2001).

## **5.9 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ**

Η ανάλυση διατομών για τις οποίες πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής κάμψης - αξονικής δύναμης (υποστυλώματα) γίνεται σε πλήρη αναλογία με τα προαναφερθέντα, με βασική διαφορά την προσθήκη ενός επί πλέον όρου στις εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και υπολογισμού ροπών, αυτού που αντιστοιχεί στην αξονική δύναμη (τιμή σχεδιασμού) που ασκείται στη διατομή, δηλ.  $N_{Sd}$  στο δεξί μέλος της εξίσωσης και  $N_{sd}[(h/2) - \delta_{GX}]$  στο δεξί μέλος της εξίσωσης. Επί πλέον μπορεί να αγνοηθεί η συνεισφορά των συνθέτων υλικών σε θλίψη. Υπό την προϋπόθεση επαρκούς αγκύρωσης (π.χ. συνέχειας των συνθέτων υλικών στους κόμβους), ο μηχανισμός αστοχίας θα είναι ένας από τους παρακάτω:

- διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα ( $\varepsilon_{s1} \geq f_{yd} / E_s$ ), σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ )
- διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα ( $\varepsilon_{s1} \geq f_{yd} / E_s$ ), αποκόλληση ή θραύση συνθέτων υλικών [ $\varepsilon_f = \varepsilon_{f,lim} = \min(\varepsilon_{fud}, \varepsilon_{fbd}, \varepsilon_{fsh})$ ]
- σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ )

Ο συνδυασμός ροής - αξονικής δύναμης κατά την αστοχία της κρίσιμης διατομής μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης.



Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τετραγωνική ς διατομής ( $b=h$ ) για μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη. Σκυρόδεμα C16/20, χάλυβας S400,  $d_1/h=0.10$ ,  $E_f = 180$  GPa. (α)  $\rho_{s,tot} = 0.006$ , (β)  $\rho_{s,tot} = 0.012$ .

Στα παραπάνω διαγράμματα το ισοδύναμο ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού,  $\rho_{eq}$ , ορίζεται ως

$$\rho_{eq} = \rho_s + \rho_f \frac{E_f}{E_s} = \frac{A_{s,tot}}{bd} + \frac{A_{f,tot}}{bd} \frac{E_f}{E_s}$$

όπου  $A_{s,tot} = 2A_{s1} = 2A_{s2}$  (συμμετρικά τοποθετημένος οπλισμός χάλυβα) και  $A_{c,tot} = 2A_c$ , (συμμετρικά τοποθετημένος οπλισμός ενίσχυσης). Επίσης, απλουστευτικά έχει υποθεθεί ότι  $\epsilon_{f,min} = 0.008$ .

Από τα παραπάνω διαγράμματα αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα των συνθέτων 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 συνθέτων υλικών μπορεί (προσεγγιστικά) να αγνοηθεί (οπότε όλες οι καμπύλες ταυτίζονται).

Ως γενικό συμπέρασμα μπορούμε να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή των συνθέτων 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.  $\nu_d < 0.2$ ).

## **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Θεωρούμε υποσύλωμα ορθογωνικής διατομής 250x400 mm, με στατικό ύψος 365 mm. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμάται γύρω στα 2 MPa. Ζητείται ο σχεδιασμός μανδύα συνθέτων υλικών έτσι ώστε το υποσύλωμα να παραλάβει πρόσθετη τέμνουσα 100 kN παράλληλα στη μεγάλη πλευρά.

Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ύφασμα συνθέτων υλικών, πάχους 0.12 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας  $E_i = 230$  GPa και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού  $f_{fd} = 3200$  MPa. Η τιμή αυτή, μειωμένη κατά 20%, δίνει την αντοχή σχεδιασμού του μανδύα:  $f_{fde} = 2560$  MPa. Ο μανδύας θα εφαρμοσθεί σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος (πλήρης περιτύλιξη).

$$\epsilon_{fd,max} = 2560/230000 = 0.0111$$

$$\epsilon_{fe,d} = D_f \epsilon_{fd,max} = 0.5 \times 0.0060 = \mathbf{0.0030}$$

$$V_{fd} = 2 \times (n \times 0.12) \times 0.9 \times 365 \times (0.0030 \times 230) \geq 100 \text{ kN} \rightarrow n \geq 1.84$$

Συνεπώς χρειάζονται 2 στρώσεις (αντιστοιχούν σε πρόσθετη τέμνουσα  $V_{fd} = 108.8$  kN).

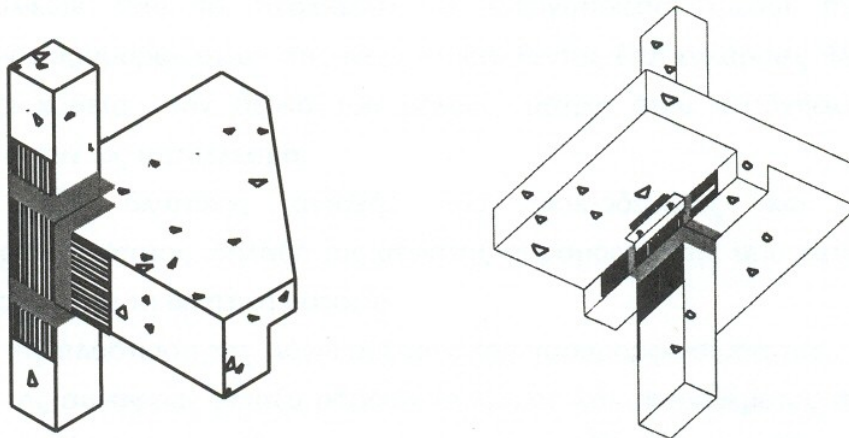
## **5.10 ΚΟΜΒΟΙ**

Η μελέτη της ενίσχυσης κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων σε διάτμηση ξεκίνησε σχετικά πρόσφατα (π.χ. Αντωνόπουλος 2002, Antonopoulos and Triantafillou 2002,

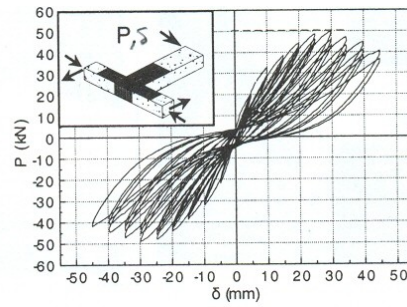
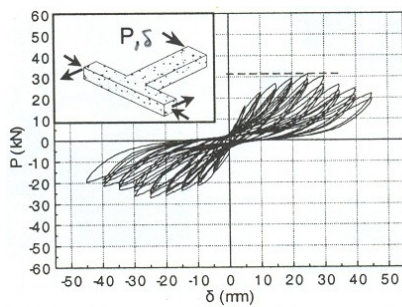


Antonopoulos and Triantafyllou 2003), και κατέδειξε ότι ακόμα και σχετικά μικρά ποσοστά συνθέτων υλικών (π.χ. 2-3 στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα) καλά αγκυρωμένων έξω από τις περιοχές των κόμβων επαρκούν για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των κόμβων σε ποσοστά μέχρι και 80-100%. Η διάταξη των συνθέτων υλικών για να καταστεί τούτο εφικτό θα πρέπει να περιλαμβάνει υφάσματα τοποθετημένα με τη διεύθυνση των ινών παράλληλη κατά προτεραιότητα στις δοκούς, αλλά όπου είναι δυνατόν και στα υποστυλώματα.

Η σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής κόμβων μέσω της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά καταδεικνύεται μέσω των αποτελεσμάτων του σχήματος, το οποίο δίνει την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μη ενισχυμένου και ενισχυμένου (με 2 στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα) δοκιμίου μορφής κόμβου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Antonopoulos and Triantafyllou 2003).



Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης κόμβων με σύνθετα υλικά σε δύο διευθύνσεις (δοκού, υποστυλώματος) και αγκύρωση των υλικών εκτός περιοχής κόμβου. (α) Εξωτερικός κόμβος, (β) εσωτερικός κόμβος.



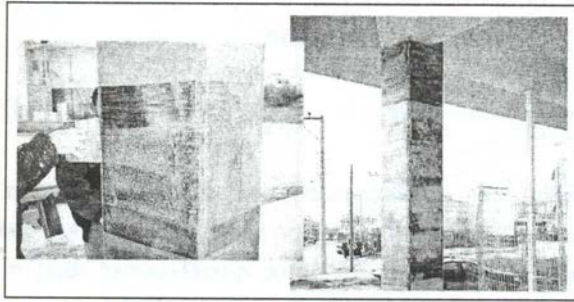
Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για κόμβο οπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκή οπλισμό διάτμησης (έλλειψη συνδετήρων στην περιοχή του κόμβου). (α) Μη ενισχυμένο δοκίμιο. (β) Αύξηση διατμητικής αντοχής της τάξης του 70% για το ενισχυμένο δοκίμιο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ**

### **6.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η δράση των συνθέτων υλικών κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ευνοϊκή και γενικά ευνοϊκότερη σε σχέση με αυτήν μεταλλικών μανδύων ίσης δυσκαμψίας. Κατά την αξονική καταπόνηση υποστυλωμάτων (π.χ. λόγω κάμψης και/ή αξονικού φορτίου) το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο μανδύας συνθέτων υλικών που το περιβάλλει να ενεργοποιείται (μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες), επιβάλλοντας έτσι εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις (περίσφιγξης) κάθετα στον άξονα του μέλους, μέχρις ότου αστοχήσει. Οι τάσεις περίσφιγξης έχουν ως αποτέλεσμα:

1. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και αύξηση της παραμορφωσιμότητας, δηλαδή της μέγιστης παραμόρφωσης που καταγράφεται στο σκυρόδεμα μέχρι τη θλιπτική αστοχία.
2. Αύξηση της πλαστιμότητας, λόγω αύξησης της παραμορφωσιμότητας.
3. Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
4. Παρεμπόδιση του τοπικού λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.



(α)



(β)

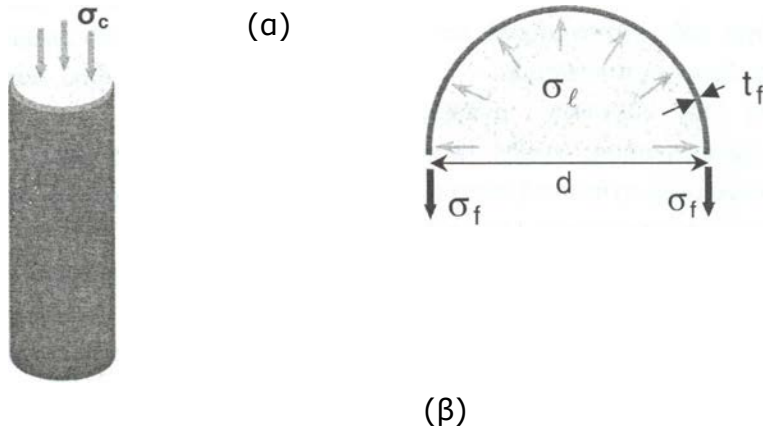
Περίσφιγξη Συμπεριφορά και καταστατικός νόμος σκυροδέματος περισφιγμένου υποστυλωμά μέσω συνθέτων υλικών.

των με  
μανδύες  
συνθέτων  
υλικών: (α)  
εφαρμογή  
υφάσματος  
με τις ίνες σε  
οριζόντια  
διάταξη, (β)  
εφαρμογή  
υφάσματος  
με τις ίνες  
υπό γωνία  
ως προς τον  
άξονα του  
μέλους.  
Κάθε ένα  
από τα  
παραπάνω  
εξετάζεται  
ακολουθώς  
σε χωριστές  
ενότητες.



## 6.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Ας θεωρήσουμε ένα κυλινδρικό στοιχείο από σκυρόδεμα, με διάμετρο  $d$ , το οποίο περιβάλλεται από μανδύα συνθέτων υλικών πάχους  $t_f$  και μέτρου ελαστικότητας (παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, δηλαδή κατά την έννοια της περιμέτρου)  $E_f$ .

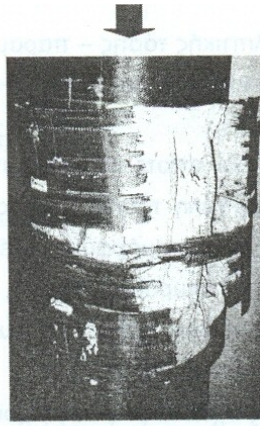
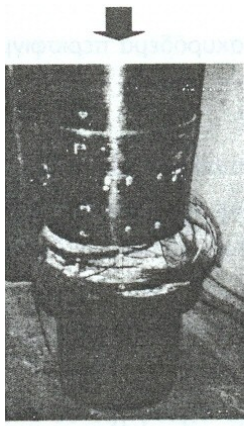


(α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα συνθέτων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης.

Οι λόγω διόγκωσης εγκάρσιες (κατά την ακτινική διεύθυνση) τάσεις στο μανδύα (ίσες και αντίθετες ασκούνται στο σκυρόδεμα),  $\sigma_l$ , δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma_l = \frac{2t_f}{d} \sigma_f = \frac{2t_f}{d} E_f \varepsilon_f$$

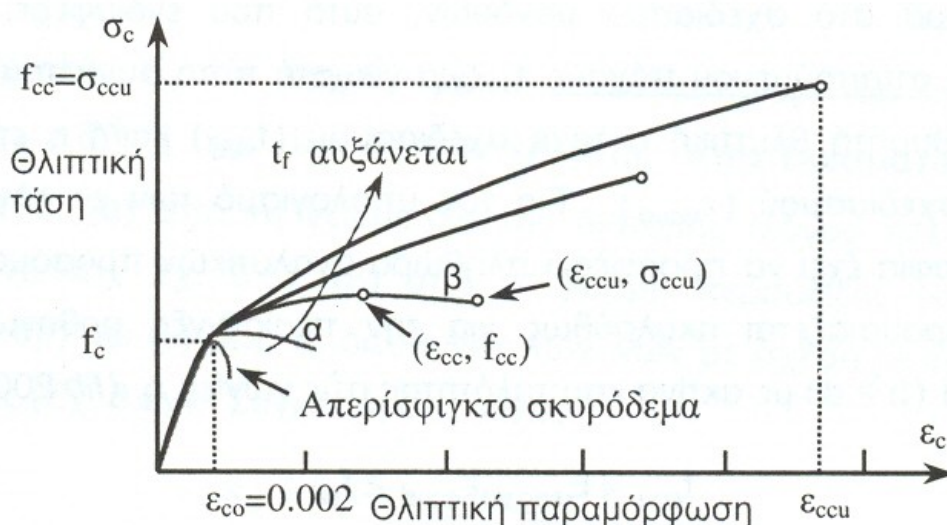
όπου  $\sigma_l$  και  $E_f$  = εφελκυστική τάση και παραμόρφωση στο μανδύα, αντίστοιχα. Αποτέλεσμα των τάσεων περίσφιγξης  $\sigma_l$  είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας, έως ότου η εφελκυστική τάση  $\sigma_l$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $E_f$ ) στον μανδύα φθάσει την αντοχή του,  $f_{fd,e}$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_{f,d,e}$ ), οπότε θα προκληθεί θραύση του μανδύα που σηματοδοτεί και την αντοχή του στοιχείου (υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι δεν θα προηγηθεί αποκόλληση των συνθέτων υλικών).



Θραύση μανδύα συνθέτων υλικών κατά τη διεύθυνση της περιμέτρου όταν η εφελκυστική τάση σι φθάσει την αντοχή του μανδύα  $f_{fde}$ .

Εδώ σημειώνεται και πάλι ότι η εφελκυστική αντοχή του μαωδύα κατά την έννοια της περιμέτρου είναι γενικά μικρότερη από την αφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών όπως αυτή μετράται μέσω δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται στην πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στον μανδύα, σε τυχόν συγκεντρώσεις τάσεων κοντά σε γωνιές, στην ενδεχόμενη ύπαρξη αρκετών στρώσεων αλλά και στην ποιότητα εφαρμογής του μανδύα. Η διαφορά αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψην μέσω του

$$f_{fde} = \eta_e f_{fd}$$



μειωτικού συντελεστή  $\eta_e$ , που μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά περίπου ίσος με 0.7-0.9

Καμπύλες θλιπτικής τάσης - παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά.

Η σχέση θλιπτικής τάσης - παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα συνθέτων υλικών δίνεται παραστατικά στο σχήμα.

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων μπορεί να διατυπώσει κανείς τις εξής παρατηρήσεις: . Γενικά η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης είναι περίπου διγραμμική, με αλλαγή

κλίσης στην παραμόρφωση ( $\epsilon_{co} = 0.002$ ) που αντιστοιχεί στην αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος ( $f_{cd}$ ).

. Μανδύες εξαιρετικά μικρού πάχους αυξάνουν μόνο την μέγιστη παραμόρφωση  $\epsilon_{ccu}$ .

Για μανδύες σχετικά μικρού πάχους η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος  $f_{cc}$  αντιστοιχεί σε παραμόρφωση  $\varepsilon_{cc}$  μικρότερη από τη μέγιστη ( $\varepsilon_{ccu}$ ).

. Για δεδομένο τύπο συνθέτων υλικών, η αντοχή  $f_{cc}$  και η μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon_{ccu}$  του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα.

. Για μανδύες ίσου πάχους αλλά διαφορετικού τύπου ινών (π.χ. άνθρακας, γυαλί), η αντοχή  $f_{cc}$  αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα  $f'd_e$  (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες άνθρακα), ενώ η μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος  $\varepsilon_{ccu}$  αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα  $f'd_e$  αλλά κυρίως με την μέγιστη παραμόρφωσή του  $\varepsilon_{fud,e}$  (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες γυαλιού).

. Για μανδύες ίσης δυστένειας (εκφράζεται από το γινόμενο  $E_f t_f$ ), η αντοχή  $f_{cc}$  αυξάνεται με την μέγιστη παραμόρφωση του μανδύα  $\varepsilon_{fud,e}$ .

### **6.2.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Σε ό,τι αφορά στο σχεδιασμό μανδύων, αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους  $t_f$ , (για γνωστό τύπο συνθέτου υλικού) ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θλιπτική αντοχή σχεδιασμού ( $f_{ccd}$ ) και/ή η επιθυμητή μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού ( $\varepsilon_{ccud}$ )' Για τον υπολογισμό των εν λόγω ποσοτήτων η διεθνής βιβλιογραφία έχει να προσφέρει πληθώρα αναλυτικών προσομοιωμάτων, ένα εκ των οποίων παρουσιάζεται ακολούθως για την περίσφιγξη ορθογωνικών διατομών πλευρών  $b$  και  $d$  ( $b > d$ ) με ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες  $r_c$  (*fib* 2001):

$$f_{ccd} = E_{sec,ud} \varepsilon_{ccud} \geq f_{cd}$$

$$\varepsilon_{ccud} = 0.002 \left[ 1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1) \right] \left[ \frac{E_{sec,Md} (E_c - E_{sec,ud})}{E_{sec,ud} (E_c - E_{sec,Md})} \right]^{1 - \frac{E_{sec,Md}}{E_c}}$$

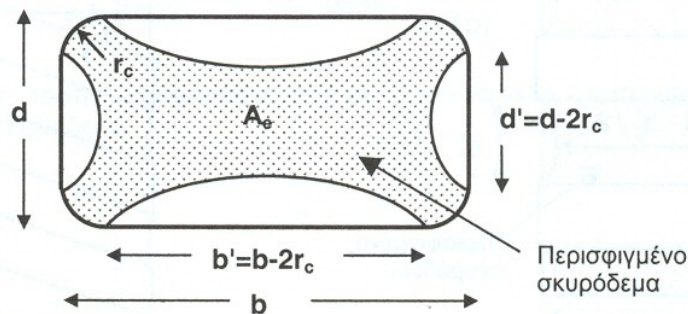
$$E_{\text{sec,ud}} = \frac{E_c}{1 + 2 \left( \frac{E_c}{f_{cd}} - \frac{1}{0.002} \right) \frac{f_{fde}}{E_f}}$$

$$E_{\text{sec,Md}} = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} f_{cd}}{0.002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)]}$$

$$\alpha_{1d} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_{\ell\text{ud,b}}}{f_{cd}}} - 2 \frac{\sigma_{\ell\text{ud,b}}}{f_{cd}} - 1.254$$

$$\alpha_{2d} = 1 - \left[ 0.6 \left( \frac{d}{b} \right)^2 - 1.4 \frac{d}{b} + 0.8 \right] \sqrt{\frac{\sigma_{\ell\text{ud,b}}}{f_{cd}}}$$

$$\sigma_{\ell\text{ud,b}} = k_e \frac{2t_f}{d} f_{fde}$$



Η περίσφιγξη σκυροδέματος (με σύνθετα υλικά) σε ορθογωνικές διατομές επιτυγχάνεται μέσω των γωνιών.

Στις παραπάνω σχέσεις  $E_c$  = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος [ $E_c = 1.05 \times 9500 \times (f_{ck} + 8) / 3$ ] και  $k_e$  = **συντελεστής αποτελεσματικότητας** του μανδύα, που εξαρτάται: (α) από τη γεωμετρία της διατομής (λόγος πλευρών, ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες, Σχ. 6.5), (β) από το βαθμό περιτύλιξης (κάλυψης) του σκυροδέματος (Σχ. 6.6β) και (γ) από τη διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα του περισφιγμένου μέλους (Σχ. 6.6γ). Συγκεκριμένα, είναι:

$$k_e = k_{e1} \times k_{e2} \times k_{e3} \leq 1$$

$$k_{e1} = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \left( 1 - \frac{A_s}{A_g} \right)}$$

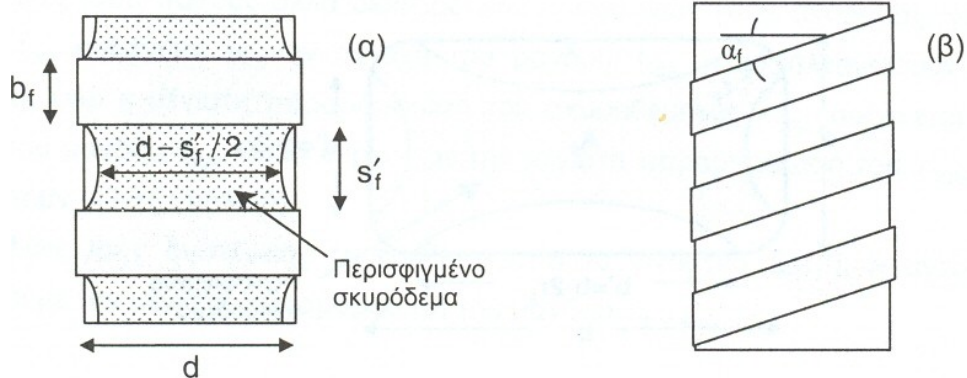
Συντελεστής κάλυψης:

$$k_{e2} = \frac{\left(1 - \frac{s'_f}{2d}\right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_g}}$$

Συντελεστής διεύθυνσης:

$$k_{e3} = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2}$$

όπου  $A_g$  = εμβαδόν διατομής,  $A_s$  = εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού,  $s'_f$  = καθαρή απόσταση λωρίδων σε περίπτωση μερικής περιτύλιξη  $\varsigma$  (Σχ. 6.6<sup>α</sup>),  $d$  = μήκος μικρότερης πλευράς (ή διάμετρος, στην περίπτωση κυκλικής διατομής),  $\alpha_f$  = γωνία ινών ως προς τον άξονα του μέλους (Σχ. 6.6β). Σημειώνεται ότι για κυκλικές διατομές  $k_{e1} = 1$ , για πλήρη κάλυψη του στοιχείου  $k_{e2} = 1$  και για οριζόντια διάταξη των ινών  $k_{e3} = 1$ .



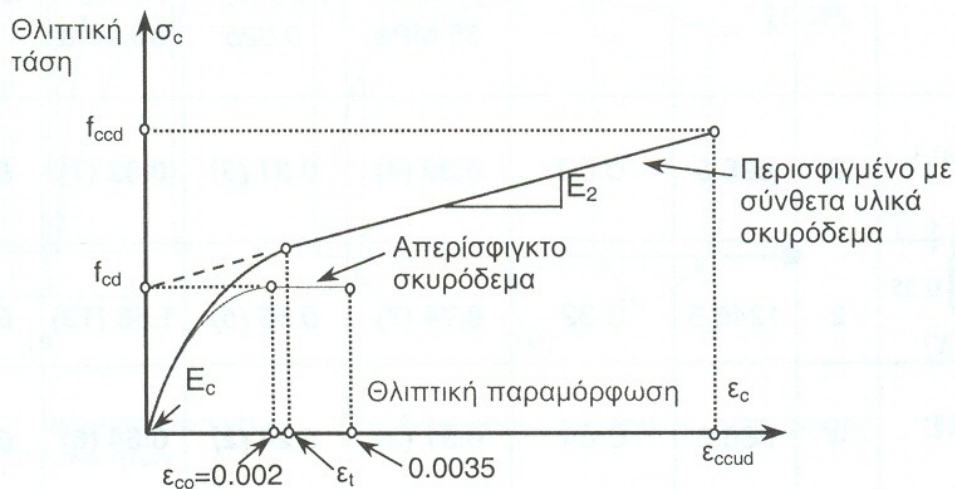
Περίσφιγξη (α) με λωρίδες ανά αποστάσεις, (β) με τις ίνες υπό γωνία (σύνθετα υλικά σε ελικοειδή διάταξη).

Αν οι υπολογισμοί απαιτούν, πλέον της αντοχής και μέγιστης παραμόρφωσης, τον πλήρη **κατασταστικό νόμο** για σκυρόδεμα περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών (π.χ. ανάλυση διατομής υποστυλώματος για συνδυασμό κάμψης και αξονικού φορτίου), τότε μπορεί να γίνει χρήση του παρακάτω απλού προσομοιώματος των Lam and Teng

(2003), το οποίο περιγράφεται και στο σχήμα:

$$\varepsilon_t = \frac{2f_{cd}}{(E_c - E_2)}$$

$$E_2 = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\varepsilon_{ccud}}$$




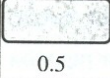

Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για απερίσφιγκτο και περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών σκυρόδεμα.

### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Θεωρούμε ορθογωνική διατομή σκυροδέματος αντοχής  $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$  και μέτρου ελαστικότητας  $E_c = 33.5 \text{ GPa}$ . Έστω ότι διαθέτουμε δύο διαφορετικούς τύπους υλικών, προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα με στόχο την αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε  $f_{ccd} = 35 \text{ MPa}$  και της μέγιστης παραμόρφωσης σε  $\varepsilon_{ccud} = 0.025$ : (α) Σύνθετα υλικά ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230 \text{ GPa}$ , εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500 \text{ MPa}$ , πάχος υφάσματος  $0.12 \text{ mm}$ . (β) Υφάσματα ινών γυαλιού με  $E_f = 70 \text{ GPa}$ ,  $f_{fk} = 2100 \text{ MPa}$ , πάχος υφάσματος  $0.17 \text{ mm}$ . Υποθέτουμε συνήθεις συνθήκες ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 5% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλαδή  $\eta_e = 0.95$ ).



Για τα σύνθετα υλικά ινών άνθρακα είναι  $f_{rde} = \eta_e(f_{fk} / \gamma_f) = 0.95(3500/1.35) = 2465$  MPa ενώ για τα σύνθετα υλικά ινών γυαλιού  $f_{rde} = 0.95(2100/1.5) = 1330$  MPa. Τα αποτελέσματα για το απαιτούμενο πάχος υφάσματος και τον αντίστοιχο αριθμό στρώσεων δίνονται στον Πίνακα , για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διατομών.

| Διατομή<br>(b, d σε m)   | $r_c$<br>(cm) | $A_g$<br>(cm <sup>2</sup> ) | $k_{e1}$<br>(αποτελεσμα-<br>τικότητα) | Απαιτούμενο πάχος υφάσματος $t_f$ (mm)<br>[και σε ( ) ο αντίστοιχος αριθμός στρώσεων] |                                  |                           |                                  |
|--|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
|  |               |                             |                                       | Ίνες άνθρακα  |                                  | Ίνες γυαλιού              |                                  |
|  |               |                             |                                       | για $f_{ccd} =$<br>35 MPa   | για $\epsilon_{ccud} =$<br>0.025 | για $f_{ccd} =$<br>35 MPa | για $\epsilon_{ccud} =$<br>0.025 |
|  d=0.3<br>b=0.3 | 2             | 896.5                       | 0.50                                  | <b>0.39 (4)</b>   | <b>0.31 (3)</b>                  | <b>0.82 (7)</b>           | <b>0.12 (1)</b>                  |
|  0.25<br>0.5    | 2             | 1246.5                      | 0.32                                  | <b>0.74 (7)</b>   | <b>0.56 (5)</b>                  | <b>1.56 (13)</b>          | <b>0.22 (2)</b>                  |
|  0.3<br>0.3     | 4             | 886.2                       | 0.64                                  | <b>0.31 (3)</b>   | <b>0.24 (2)</b>                  | <b>0.64 (6)</b>           | <b>0.10 (1)</b>                  |

Τα αποτελέσματα του Πίνακα δείχνουν ότι για τις τιμές ιδιοτήτων υλικών που επελέγησαν: (α) Υλικά με ίνες άνθρακα υπερέχουν έναντι αυτών με ίνες γυαλιού όταν στόχος της περίσφιγξης είναι η αύξηση της αντοχής (στα παραπάνω παραδείγματα χρειαζόμαστε περίπου διπλάσιο πάχος υλικού με ίνες γυαλιού για την ίδια θλιπτική αντοχή σκυροδέματος). (β) Υλικά με ίνες γυαλιού υπερέχουν έναντι αυτών με ίνες άνθρακα όταν στόχος της περίσφιγξης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας (στα παραπάνω παραδείγματα χρειαζόμαστε κάτι παραπάνω από διπλάσιο πάχος υλικού με ίνες άνθρακα για την ίδια παραμορφωσιμότητα).

### **6.3 ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ**

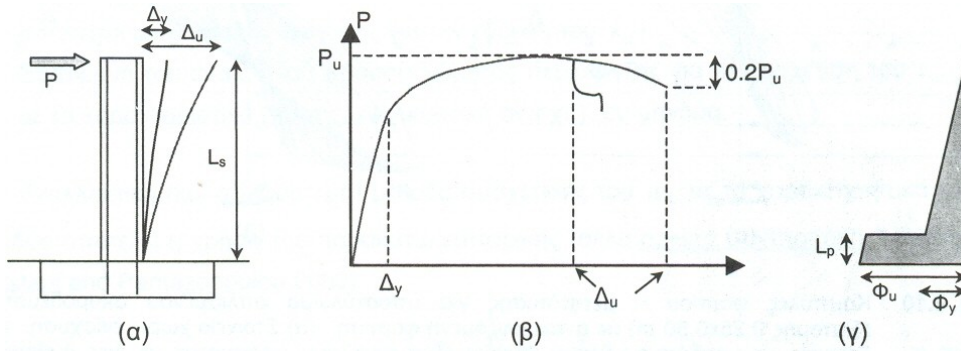
Ένας από τους βασικούς στόχους αντισεισμικών ενισχύσεων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία είναι η αύξηση της πλαστιμότητας, η οποία συνήθως ποσοτικοποιείται μέσω του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων,  $\mu_\Delta$ :

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

όπου  $\Delta_u$  η μετατόπιση κατά την αστοχία του μέλους και  $\Delta_y$  η μετατόπιση κατά τη



διαρροή του διαμήκους οπλισμού. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση μη διακριτής πτώσης της δύναμης λόγω κάποιας αστοχίας (π.χ. θραύση ή λυγισμός ράβδου, θραύση του μανδύα ενίσχυσης) η  $\Delta_u$  συνήθως ορίζεται εκεί όπου το μέγιστο φορτίο υφίσταται μείωση κατά 20%.

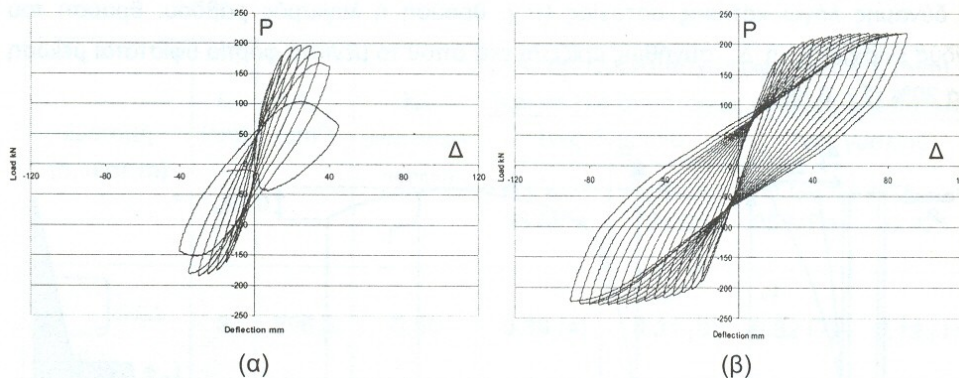


(α) Φόρτιση στοιχείου. (β) Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης. (γ) Διάγραμμα καμπυλοτήτων.

Ο δείκτης πλαστιμότητας  $m_s$  μπορεί να αυξηθεί μέσω της κατασκευής μανδύα συνθέτων υλικών στις κρίσιμες περιοχές, εκεί δηλαδή όπου ενδέχεται να αναπτυχθούν σημαντικές παραμορφώσεις στο χάλυβα και στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων καμπυλοτήτων. Η περίσφιγξη του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές αυξάνει τη μέγιστη παραμόρφωσή του (πλέον του ότι παρεμποδίζει το λυγισμό ράβδων και/ή την απώλεια συνάφειας σε περιοχές με ματίσεις) και άρα την πλαστιμότητα.



Ενίσχυση κρίσιμων περιοχών με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας.



Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για υποστυλώμα οπλισμένου σκυροδέματος (διατομής 0.25x0.50 m) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. (α) Στοιχείο χωρίς ενίσχυση. (β) Στοιχείο με μανδύα συνθέτων υλικών (δύο στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα, πάχος στρώσης 0.12 mm) στην κρίσιμη περιοχή (ύψος μανδύα 0.6 m).

Ο σχεδιασμός μανδύα συνθέτων υλικών για την επίτευξη δεδομένης πλαστιμότητας προϋποθέτει τη συσχέτιση του  $\mu\Delta$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα. Τούτο μπορεί να γίνει βάσει των παρακάτω βημάτων:

1. Εκτίμηση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu\Delta$  βάσει της μετατόπισης κατά τη διαρροή  $\Delta Y$  και της επιθυμητής μετατόπισης κατά την αστοχία  $\Delta u$ .
2. Υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης  $l_p$ , βάσει της γεωμετρίας του μέλους και των χαρακτηριστικών των διαμήκων ράβδων οπλισμού (π.χ. Priestley et al. 1996).

$$L_p = 0.08L_s + 0.022f_y d_b \geq 0.044f_y d_b$$

όπου  $L_s$  = διατμητικό μήκος (απόσταση από τη βάση του υποστυλώματος μέχρι το σημείο μηδενισμού ροπών),  $f_y$  = τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού (MPa),  $d_b$  = διάμετρος ράβδων διαμήκους οπλισμού. Εναλλακτικά, το  $l_p$  μπορεί να ληφθεί περίπου ίσο με το στατικό ύψος της διατομής.

3. Υπολογισμός του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu\phi$  (=  $\Phi u I \phi Y$ ) από τη σχέση:

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3\left(\mu_{\phi} - 1\right)\frac{L_p}{L_s}\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}\right)$$

4. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά τη διαρροή, το βήμα αυτό προϋποθέτει ανάλυση της διατομής (εύρεση της σχέσης ροπών - καμπυλοτήτων).
5. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά την αστοχία (θραύση σκυροδέματος),  $\Phi_u = \mu_\phi \Phi_y$   
 Εναλλακτική (και απλούστερη) μέθοδο συσχέτισης του  $\mu_\Delta$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα αποτελεί η χρήση της παρακάτω <sup>6</sup> μέγιστης εμπειρικής (αλλά αρκετά συντηρητικής) σχέσης (Tastani and Pantazopoulou 2002): παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα κατά την αστοχία,  $\epsilon_{ccud} = \Phi_u X_u$ , όπου  $X_u$  = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία (και εδώ απαιτείται ανάλυση της διατομής για την εύρεση του  $x_u$ ).
7. Εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος περίσφιγξης για τη συσχέτιση του  $\epsilon_{ccud}$  με τα χαρακτηριστικά (πάχος, εφελκυστική αντοχή) του μανδύα.

Εναλλακτική (και απλούστερη) μέθοδο συσχέτισης του  $\mu_\Delta$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα αποτελεί η χρήση της παρακάτω εμπειρικής (αλλά αρκετά συντηρητικής) σχέσης (Tastani and Pantazopoulou 2002):

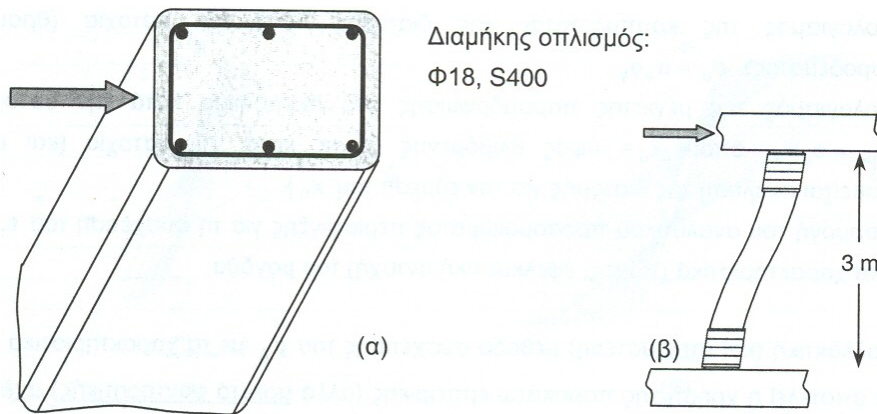
$$\mu_\Delta = 1 + 3(\mu_\phi - 1) \frac{L_p}{L_s} \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right)$$

όπου  $\sigma_{lud}$  η τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας (Τιμή σχεδιασμού), η οποία (αγνοώντας, επί το συντηρητικότερον, την περίσφιγξη μέσω υφισταμένων συνδετήρων) δίνεται από την εξ. (6.9). Εδώ σημειώνεται ότι για τη χρήση της εξ. (6.9) σε ορθογωνικά υποστυλώματα ως  $d$  θα πρέπει να ληφθεί η πλευρά του υποστυλώματος που είναι κάθετη στη διεύθυνση φόρτισης.

### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Θεωρούμε υποστυλώμα ορθογωνικής διατομής 0.30x0.40 m, για το οποίο η σεισμική φόρτιση (οριζόντια δύναμη - επιβαλλόμενη μετατόπιση) δρα παράλληλα στη μεγάλη πλευρά (Σχ. 6.11). Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι  $r_c = 25$  mm. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή σχεδιασμού  $f_{cd} = 10.67$  MPa. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230$  GPa, εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500$  MPa και πάχος 0.12 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στις κρίσιμες περιοχές με στόχο την επίτευξη δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta = 4$ . Υποθέτουμε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. Τέλος, θεωρούμε ότι η

εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 10% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλαδή  $\eta\theta = 0.90$ ). Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων.



Για το υλικό του μανδύα είναι  $f_{fde} = \eta_e(f_{fk}/\gamma_f) = 0.90(3500/1.20) = 2625$  Μpa. Εύρεση συντελεστή αποτελεσματικότητας από την εξ. (6.11)  $A_g = 1195$  cm<sup>2</sup>,  $A_s = 15.25$  cm<sup>2</sup>.

$$k_{e1} = 1 - \frac{35^2 + 25^2}{3 \times 1195 \times \left(1 - \frac{15.25}{1195}\right)} = 0.48$$

Από την εξίσωση έχουμε

$$4 = 1.3 + 12.4 \left( \frac{0.48 \times \frac{2t_f}{300} \times 2625}{10.67} - 0.1 \right) \quad \text{άρα} \quad t_f = 0.40 \text{ mm}$$

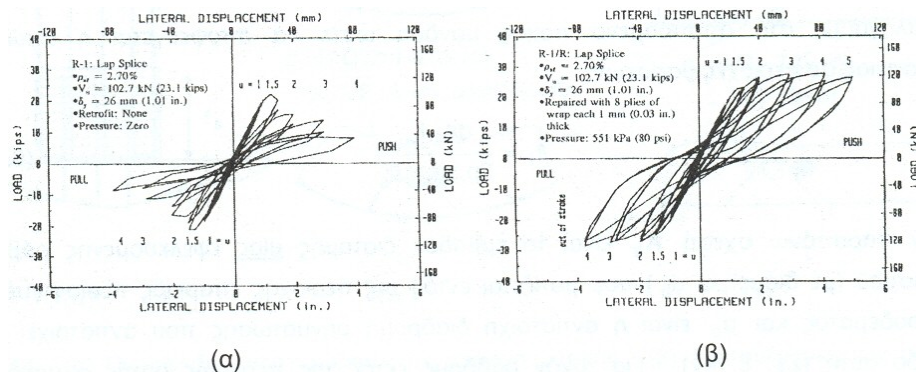
Δηλαδή απαιτούνται  $0.40 \times 10.12 = 3.3 \sim 4$  στρώσεις (επανάληψη των υπολογισμών με  $t_f = 4 \times 0.12$  mm δίνει  $\mu\Delta = 4.75$ ).

## **6.4 ΜΑΤΙΣΕΙΣ**

Σε υφιστάμενες κατασκευές πολλά προβλήματα πτωχής αντισεισμικής συμπεριφοράς άπτονται του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων των διαμήκων οπλισμών (π.χ. ακριβώς πάνω από την βάση του κάθε ορόφου, όπου σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις αντισεισμικού σχεδιασμού προβλέπεται η πραγματοποίηση πλαστικών αρθρώσεων, χωρίς όμως την πρόβλεψη περίσφιγξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού). Συνηθισμένα αίτια αστοχιών σε περιοχές ματίσεων είναι το μικρό μήκος μάτισης και/ή η χρήση λείων ράβδων (οπότε η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται κυρίως από τον μηχανισμό τριβής στο διάστημα που

ανατύσσεται η αγκύρωση).

Η ευνοϊκή δράση της περίσφιγξης που παρέχουν οι μανδύες συνθέτων υλικών σε περιοχές ματίσεων έχει καταδειχθεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες (π.χ. Ma and Xiao 1997, Saadatmanesh et al. 1997, Seible et al. 1997, Restrepo et al. 1998, Osada et al. 1999, Chang et al. 2001, Haroun et al. 2001). Ενδεικτικά πειραματικά



αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα.

Συμπεριφορά (α) μη ενισχυμένου και (β) ενισχυμένου στην περιοχή μάτισης υποστυλώματος ορθογωνικής διατομής υπό οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Saadatmanesh et al. 1997).

Η δύναμη  $F$  που μπορεί να αναπτυχθεί σε ράβδο οπλισμού εμβαδού  $A_b$  στην περιοχή μάτισης μήκους  $l_s$  εξισορροπείται από την διατμητική τάση συνάφειας  $\tau_b$  που ανατύσσεται στην περιφέρεια της ράβδου. Η τάση αυτή λαμβάνεται από θεωρηση μοντέλου τριβής, είναι δηλαδή ανάλογη με την εγκάρσια τάση  $\sigma$  ( μέσω συντελεστή  $\mu$ , ο οποίος είναι περίπου ίσος με 1.4 . Απουσία εγκάρσιου οπλισμού στο μήκος μάτισης, η εγκάρσια τάση αναλαμβάνεται μόνον από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης (πάχους  $c$ ) του οπλισμού, ανατύσσοντας ρωγμή διαδρομής  $P_c$  . Για τον σχεδιασμό μανδύα συνθέτων υλικών σε περιοχές ματίσεων αρκεί να εξασφαλισθεί ότι η διαρροή του διαμήκους οπλισμού θα αναπτυχθεί πριν από την απώλεια συνάφειας, δηλαδή ότι:

$$A_b f_{yd} = \rho_c \mu \sigma_{el} l_s$$

όπου  $\sigma_l$  η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των συνθέτων υλικών (αγνοώντας, επί το συντηρητικότερον, τη συνεισφορά συνδετήρων) κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας ( $\sigma_l = \sigma_{lud}$ ). Σημειώνεται ότι η τάση αυτή ασκείται μόνο στις ράβδους εκείνες που βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος, δίνεται δε



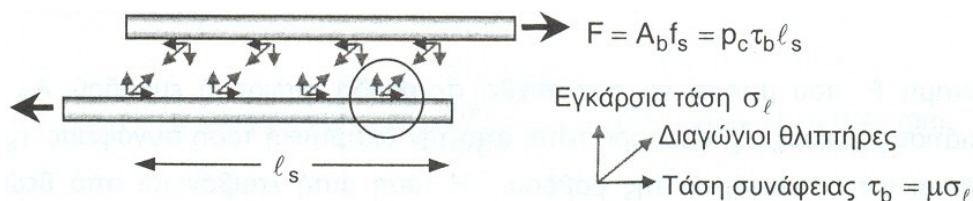
από τη σχέση:

$$\sigma_{\ell ud} = \frac{2t_f}{d} f_{fde}$$

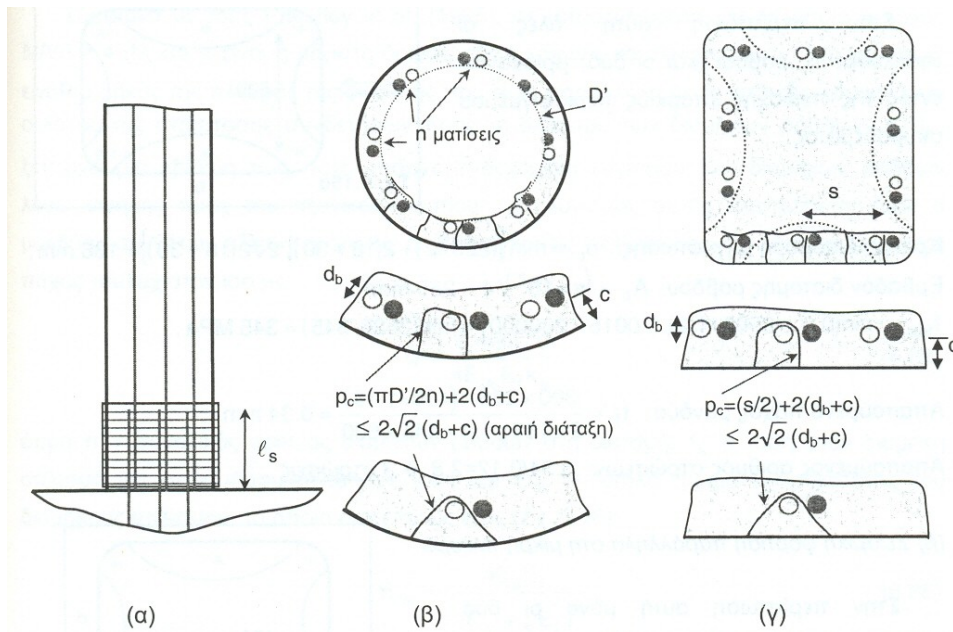
όπου  $d$  η μικρότερη πλευρά του υποστυλώματος. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις καταλήγουμε στο απαιτούμενο πάχος μανδύα ώστε να αποφεύγεται η απώλεια συνάφειας σε περιοχές ματίσεων:

$$t_f = \frac{d A_b f_{yd}}{2 \rho_c \mu f_{fde} \ell_s}$$

Στην παραπάνω σχέση  $A_b$  είναι το εμβαδόν διατομής μίας εφελκυσμένης ράβδου οπλισμού (με διάμετρο  $d_b$ ) που ματίζεται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος και  $\rho_c$  είναι η αντίστοιχη διαδρομή ρηγμάτων που αντιστοιχεί στη ράβδο αυτή. Για τυχόν ράβδους εκτός της περιοχής αυτής ο μανδύας συνθέτων υλικών είναι μειωμένης αποτελεσματικότητας ως προς την αποτροπή απώλειας συνάφειας σε ματίσεις.



Σύμφωνα με τους Seible et al. (1997), η εξίσωση δεν εξασφαλίζει πάντα την μη ενεργοποίηση του μηχανισμού απώλειας συνάφειας. Βασισμένοι σε σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων, οι παραπάνω ερευνητές διετύπωσαν μία επί πλέον συνθήκη, σύμφωνα με την οποία για να εξασφαλισθεί η συνάφεια ράβδου - σκυροδέματος θα πρέπει η εγκάρσια παραμόρφωση (διόγκωση του σκυροδέματος) να μην ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή, γύρω στο 0.001-0.002. Έτσι, στην εξίσωση για το σχεδιασμό του πάχους μανδύα, η ενεργή τάση σχεδιασμού των συνθέτων υλικών  $f_{fde}$  θα πρέπει να περιορίζεται σε:



(α) Περίσφιγξη υποστυλώματος σε περιοχή μάτισης. (β) Ανάπτυξη ρωγμών στην εφελκόμενη περιοχή κυκλικού υποστυλώματος λόγω αστοχίας συνάφειας και ορισμός της κρίσιμης διαδρομής ρηγμάτωσης. (γ) Ομοίως για ορθογωνικά υποστυλώματα, για τα οποία οριοθετείται και η περιοχή επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος.

### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

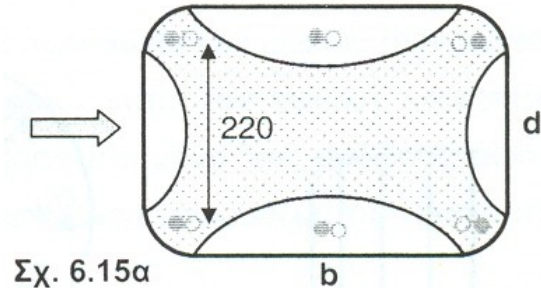
Θεωρούμε το υποστυλόμετρο του σχήματος (ορθογωνική διατομή 0.30x0.40 m), το οποίο καταπονείται σε σεισμική φόρτιση (οριζόντια δύναμη - επιβαλλόμενη μετατόπιση) η οποία ενδέχεται να δρα παράλληλα είτε στη μεγάλη είτε στη μικρή πλευρά. Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι  $r_c = 25 \text{ mm}$  και ότι η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 30 \text{ mm}$ . Το σκυρόδεμα έχει αντοχή σχεδιασμού

$f_{cd} = 10.67 \text{ MPa}$ . Οι διαμήκεις ράβδοι του υποστυλώματος θεωρούνται ματισμένες στη βάση, σε μήκος 0.60 m. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_i = 230 \text{ GPa}$ , εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500 \text{ MPa}$  και πάχος 0.12 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στην περιοχή της μάτισης με στόχο την αποτροπή απώλειας συνάφειας. Υποθέτουμε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 10% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλαδή  $\eta_e = 0.90$ ). Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων.



(α) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μεγάλη πλευρά

Στην περίπτωση αυτή όλες οι εφελκυόμενες ράβδοι (και οι δύο) βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος.



Σχ. 6.15α

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης:

$$p_c = \min\left\{\left[\left(\frac{220}{2}\right) + 2(18 + 30)\right], 2\sqrt{2}(18 + 30)\right\} = 136 \text{ mm}$$

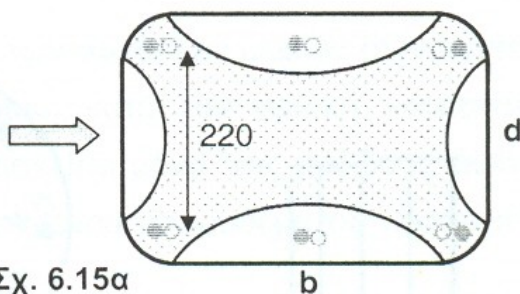
Εμβαδόν διατομής ράβδου:

$$A_b = (\pi \times 18^2) / 4 = 255 \text{ mm}^2$$

$$f_{fde} = \min(0.9 \times (3500 / 1.2), 0.0015 \times 230000) = \min(2625, 345) = 345 \text{ MPa}$$

Απαιτούμενο πάχος μανδύα

$$t_f = \frac{300 \times 255 \times (400 / 1.15)}{2 \times 136 \times 1.4 \times 345 \times 600} = 0.34 \text{ mm}$$



Σχ. 6.15α

(β) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μικρή πλευρά

Στην περίπτωση αυτή μόνο οι δύο γωνιακές εφελκυόμενες ράβδοι βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος.

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης:

$$p_c = \min\left\{\left[\left(\frac{150}{2}\right) + 2(18 + 30)\right], 2\sqrt{2}(18 + 30)\right\} = 136 \text{ mm}$$

Εμβαδόν διατομής ράβδου:  $A_b = 255 \text{ mm}^2$ ,  $f_{fde} = 345 \text{ MPa}$ .

Επομένως το απαιτούμενο πάχος μανδύα είναι ίδιο με αυτό της παραπάνω περίπτωσης. Βασική διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι ο μανδύας συνθέτων υλικών θα αποτρέψει την αστοχία συνάφειας στις δύο γωνιακές ράβδους, αλλά όχι κατ' ανάγκη και στη μεσαία.

Τέλος, επ' ευκαιρία του παραδείγματος αυτού επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους μανδύα για τον συνδυασμό αύξησης πλαστιμότητας και αποτροπής αστοχίας συνάφειας σε ματίσεις δεν θα πρέπει να έχει αθροιστικό χαρακτήρα, διότι για μεν την πλαστιμότητα ενδιαφέρει το τμήμα του μανδύα που εγκλιβωτίζει το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη περιοχή, για δε τις ματίσεις ενδιαφέρει το τμήμα του μανδύα στην εφελκυσόμενη. Συνεπώς, οι 4 στρώσεις μανδύα που υπολογίσθηκαν στο Παράδειγμα 6.2 αρκούν και για τον έλεγχο των ματίσεων.

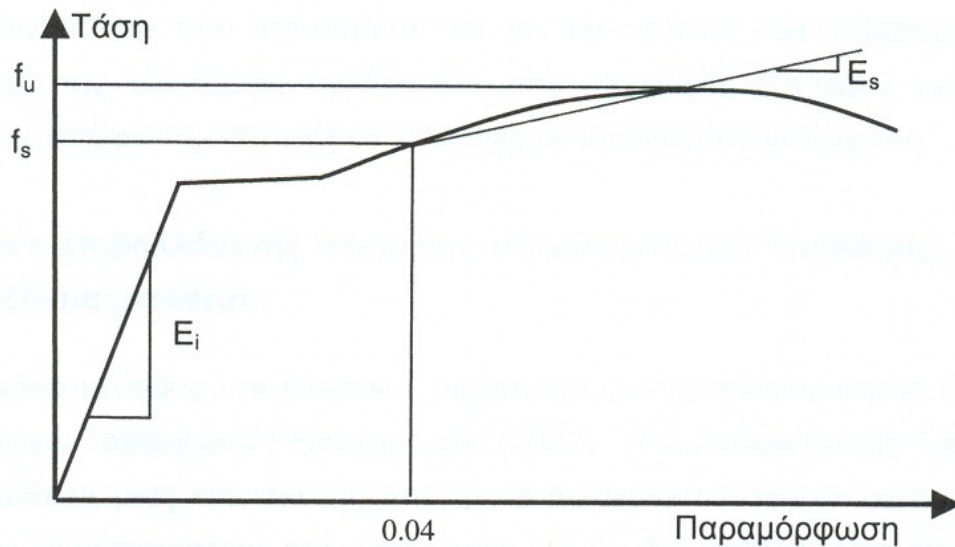
## **6.5 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΡΑΒΔΩΝ**

Σύμφωνα με τους Priestley et al. (1995), σε υποστυλώματα για τα οποία ο λόγος  $M/Vd > 4$  ( $M$  και  $v$  είναι η μέγιστη δρώσα ροπή κάμψης και τέμνουσα, αντίστοιχα, και  $d$  είναι το μήκος της πλευράς της διατομής που είναι παράλληλη με το επίπεδο κάμψης) και ο λόγος της απόστασης συνδετήρων προς τη διάμετρο των διαμήκων ράβδων,  $s/d_b$ , ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή, τότε υπάρχει ενδεχόμενο λυγισμού των διαμήκων ράβδων λόγω υψηλής τιμής του αξονικού φορτίου. Ο λυγισμός αυτός αποτρέπεται όταν ο μανδύας συνθέτων υλικών ο οποίος επιβάλλει τάσεις περισφιγξης στο υποστυλώμα έχει πάχος τουλάχιστον ίσο με:

$$t_f = \frac{0.45n f_s^2 d}{4E_{ds} E_f k_e}$$

όπου  $n$  = συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στη διατομή,  $f_s$  = τάση στον διαμήκη οπλισμό για παραμόρφωση ίση με 0.04 και  $E_{ds}$  = «διπλό» μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους οπλισμού, το οποίο ορίζεται ως εξής :

$$E_{ds} = \frac{4E_s E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2}$$

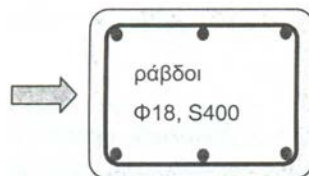


$E_s$  = τέμνον μέτρο ελαστικότητας του διαμήκου χάλυβα από την τάση  $f_s$  στην τάση  $f_u$  (αντοχή του χάλυβα) και  $E_i$  = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκου χάλυβα. Στην εξίσωση η ποσότητα  $0.45f_s^2 / E_{ds}$  μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά (και συντηρητικά) ίση με 40 MPa, οπότε:

$$t_f = \frac{10nd}{E_f k_e} \quad (E_f \text{ σε MPa})$$

### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Θεωρώντας το υποστύλωμα του σχήματος (Παράδειγμα 2), για σύνθετα υλικά με  $E_f = 230 \text{ GPa}$  και πάχος υφάσματος  $0.12 \text{ mm}$ , το απαιτούμενο πάχος μανδύα για την



αποφυγή λυγισμού είναι:

$$t_f = \frac{10 \times 6 \times 400}{230000 \times 0.48} = 0.22 \text{ mm}$$

δηλαδή  $0.22/0.12 = 1.83 \rightarrow \underline{2 \text{ στρώσεις}}$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 :ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ**

### **7.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Θα πρέπει να καταστεί σαφές ότι η χρήση μανδύα συνθέτων υλικών σε υποστυλώματα προσδίδει αντοχή και παραμορφωσιμότητα χωρίς να αυξάνει την δυσκαμψία των ενισχυμένων στοιχείων (όπως συμβαίνει στην περίπτωση συμβατικού μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος). Σε ιδιαίτερα εύκαμπες κατασκευές (π.χ. κτίρια με πιλοτή) τούτο θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, διότι αν η οριζόντια μετάθεση ορόφου αποτελέσει παράμετρο ελέγχου στο σχεδιασμό της ενίσχυσης των επιμέρους κατακόρυφων στοιχείων, τότε η βελτίωση μόνον της ικανότητας για παραμόρφωση μέσω μανδύα συνθέτων υλικών μπορεί να αποδειχθεί ανεπαρκής λύση σε σχέση με τις σύγχρονες απαιτήσεις αντισεισμικότητας (οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν και αύξηση της δυσκαμψίας).

Υπό την προϋπόθεση ότι η επέμβαση δεν αποσκοπεί σε αύξηση της δυσκαμψίας, με δεδομένη την επιβαλλόμενη σεισμική καταπόνηση θα πρέπει αρχικά να υπολογισθεί για κάθε υποστυλώμα (α) η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων και (β) η τέμνουσα σχεδιασμού (η οποία, ανάλογα με τη δυσκαμψία κάθε υποστυλώματος, θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η διαρροή του διαμήκους οπλισμού να προηγείται της διατμητικής αστοχίας - ικανοτική τέμνουσα). Το πάχος του μανδύα συνθέτων υλικών είναι το μέγιστο των παχών που απαιτούνται για την εξασφάλιση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας, της τέμνουσας σχεδιασμού, της αποφυγής λυγισμού των διαμήκων ράβδων και της αποφυγής αστοχίας σε περιοχές με ματίσεις (αν υπάρχουν).

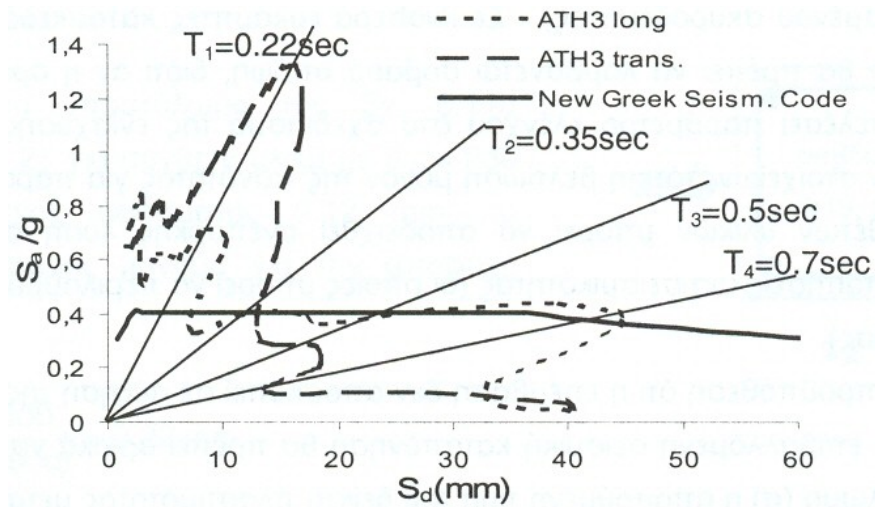
### **7.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΘΕΣΗ**

Η παρακάτω μέθοδος υπολογισμού της απαιτούμενης πλαστιμότητας έχει βασισθεί στην εργασία των Tazani and Pantazopoulou (2002). Η τέμνουσα βάσης  $v$  και η μέγιστη οριζόντια μετάθεση μιας κατασκευής μπορεί να απεικονιστεί σε ένα φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων - μετατοπίσεων, όπως Π.χ. αυτό του σχήματος (σεισμός των Αθηνών, 1999). Στον κατακόρυφο άξονα του σχήματος η ανηγμένη επιτάχυνση  $S_a / 9$  είναι ίση με τον λόγο

$v / W$ , όπου  $W$  είναι το βάρος της κατασκευής =  $Mg$  και  $M$  η μάζα. Στον οριζόντιο άξονα  $S_d$  είναι η ελαστική μετατόπιση που ανατύσσει το σύστημα κατά την απόκρισή του σε σεισμική τέμνουσα  $V$  και είναι ίση με:

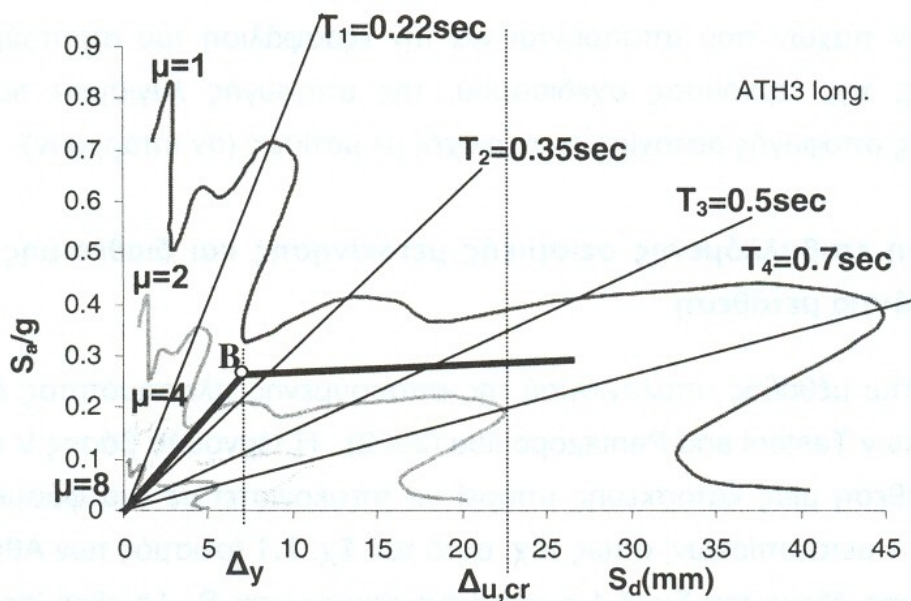
$$S_d = S_a / \omega^2 \quad S_a = V / M \quad \omega^2 = k / M \quad S_d = V / k$$

Συνεπώς, για δεδομένη μάζα  $M$  η κλίση της γραμμής που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και τέμνει το φάσμα απόκρισης είναι ανάλογη της δυσκαμψίας  $k$  του αντίστοιχου γραμμικά ελαστικού ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.



Φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης - μετατόπισης του σεισμού Αθηνών 1999

Ισοδύναμο φάσμα διαρροής για το ATH3Iong.



(Tastani and Pantazopoulou 2002).

Από το ελαστικό φάσμα μπορεί να προκύψει το ισοδύναμο φάσμα διαοοορ, χρησιμοποιώντας κάποια από τις θεωρήσεις συσχέτισης του ελαστικού με το ανελαστικό σύστημα (π.χ. θεώρηση ίσων μετατοπίσεων ή ίσων ενεργειών). Στο Σχήμα χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή ATH3 long. η θεώρηση ίσων μετατοπίσεων ( $V_{el}/V_y = \Delta_u/\Delta_y = \mu_\Delta$ ), οπότε για διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας  $M_\Delta$  προέκυψαν διαφορετικά φάσματα διαρροής.

Επόμενο βήμα είναι η παράθεση της καμπύλης ανελαστικής ς στατικής ανάλυσης (μονότονη σχέση τέμνουσας βάσης - μετακίνησης κορυφής που προκύπτει από ανελαστική στατική ανάλυση - push over analysis) στο φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης

μετατόπισης, μετά από κατάλληλη τροποποίηση των αξόνων. Σημειώνεται ότι εδώ απαιτείται μια προκαταρκτική ανάλυση του κτιρίου με τις κλασσικές μεθόδους ιδιομορφικής ανάλυσης για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής στην απόκριση του κτιρίου. Εναλλακτικά, στις αντίστοιχες εκφράσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα οποιοδήποτε σχήμα που προσεγγίζει ποιοτικά τη θεμελιώδη ιδιομορφή του κτιρίου. Απουσία άλλης, πιο τεκμηριωμένης επιλογής, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η τριγωνική κατανομή, όπου η μέγιστη συντεταγμένη του σχήματος είναι μονάδα στην κορυφή του κτιρίου. Έτσι, εάν  $\Gamma$  είναι ο συντελεστής συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής στην απόκριση και  $a$  ο συντελεστής συμμετοχής της μάζας του κτιρίου στη συγκεκριμένη ιδιομορφή αντιστοίχως, τότε η τέμνουσα διαρροής καθώς και η μετακίνηση διαρροής του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή ισούται με την τέμνουσα διαρροής και τη μετακίνηση διαρροής του κτιρίου πολλαπλασιασμένη με το λόγο  $\Gamma/a$ . Με αναγωγή των τιμών του κατακόρυφου άξονα προς την μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή ο άξονας των δυνάμεων στην καμπύλη ανελαστικής στατικής ανάλυσης μετατρέπεται εύκολα σε επιτάχυνση. Έτσι, με εναπόθεση της καμπύλης ανελαστικής στατικής ανάλυσης του μονοβάθμιου ταλαντωτή στο φάσμα επιτάχυνσης - μετατόπισης προκύπτει αφενός το μέγεθος της απαιτούμενης πλαστιμότητας για το δεδομένο σεισμό (αυτή είναι η τιμή  $\mu_\Delta$  που χαρακτηρίζει το ανελαστικό φάσμα που διέρχεται από το σημείο διαρροής), αφετέρου η μέγιστη αναμενόμενη ανελαστική μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή από το γινόμενο της μετακίνησης διαρροής επί την απαιτούμενη πλαστιμότητα. Με περαιτέρω πολλαπλασιασμό αυτού του μεγέθους με το λόγο  $a/\Gamma$  προκύπτει η αναμενόμενη μετακίνηση στην κορυφή του κτιρίου, η οποία μπορεί να συγκριθεί με τη διαθέσιμη ικανότητα μετακίνησης, καθώς και με τις προεπιλεγμένες τιμές που συσχετίζονται με τα διάφορα στάδια επιτελεστικότητας.

Η ανηγμένη καμπύλη ανελαστικής ς στατικής ανάλυσης παρεμβάλλει το σημείο διαρροής

Β μεταξύ των ισοδύναμων φασμάτων διαρροής για διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας. Το μέγεθος αυτό του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu_B$  (στο παράδειγμα του σχήματος είναι μεταξύ των τιμών 1 και 2) προσδιορίζει την απαίτηση για πλαστιμότητα του ανελαστικού συστήματος για το δεδομένο ιστορικό μετατοπίσεων. Η οριακή μετατόπιση σχεδιασμού  $\Delta_{u,cr}$  προκύπτει άμεσα με πολλαπλασιασμό του  $\mu_B$  με τη μετατόπιση διαρροής  $\Delta_Y$ , ενώ η αντίστοιχη αναλαμβανόμενη δύναμη συνάγεται από την καμπύλη ανελαστικής στατικής ανάλυσης.

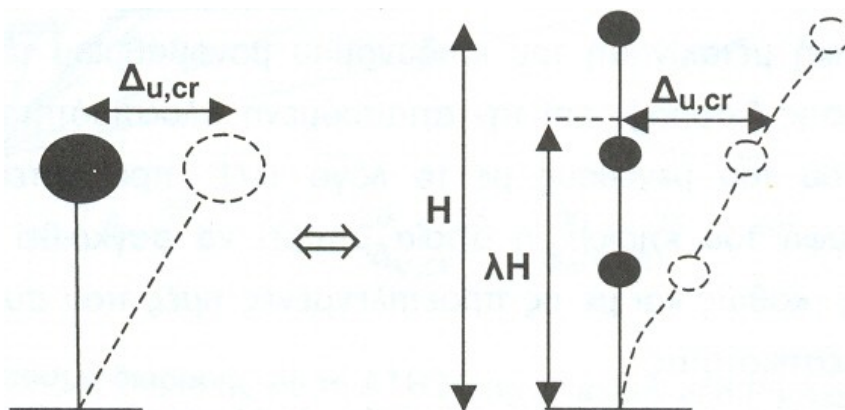
Στην περίπτωση εύκαμπτων κατασκευών, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραμόρφωσης αναλαμβάνεται από έναν όροφο (π.χ. κτίριο με πιλοτή), η στροφή των κατακόρυφων στοιχείων θα πρέπει να περιοριστεί σε ένα εύρος τιμών συνήθως  $1\%+2\%$ , προκειμένου να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη βλάβη λόγω φαινομένων δεύτερης τάξης (κυρίως από το μόνιμο αξονικό φορτίο της κατασκευής). Σημειώνεται ότι η συσχέτιση της ποσότητας  $\Delta_{u,cr}$  από το εξιδανικευμένο μονοβάθμιο σύστημα με την πραγματική στροφή της κατασκευής γίνεται με βάση τη σχέση:

$$\Delta_{u,cr} = \lambda \theta_{cr} H$$

όπου  $H$  = συνολικό ύψος της κατασκευής, και  $\lambda$  = συντελεστής που προκύπτει από την ισοδυναμία των δύο συστημάτων (εξίσωση ροπών των αδρανειακών δυνάμεων στη στάθμη των μαζών) και δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1,N} m_i \Phi_i^2}{\sum_{j=1,N} m_j \Phi_j}$$

όπου  $m_j$  = μάζα ορόφου  $i$  και  $\Phi_j$  = στοιχείο  $i$  της θεμελιώδους ιδιομορφής. Σημειώνεται ότι η περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής μαζών καθ' ύψος της κατασκευής για



ιδιομορφή τριγωνικού σχήματος δίνει  $\lambda = 0.67$ , ενώ η περίπτωση κατασκευής με πιλοτή και συγκεντρωμένες μάζες στους ορόφους δίνει  $\lambda = 1$ . Στην τελευταία περίπτωση η στροφή της κατασκευής ισούται με  $\theta_{cr,1} = \Delta_{u,cr} / h_1 = \theta_{cr} H / h_1$ , όπου  $h_1$  το ύψος του



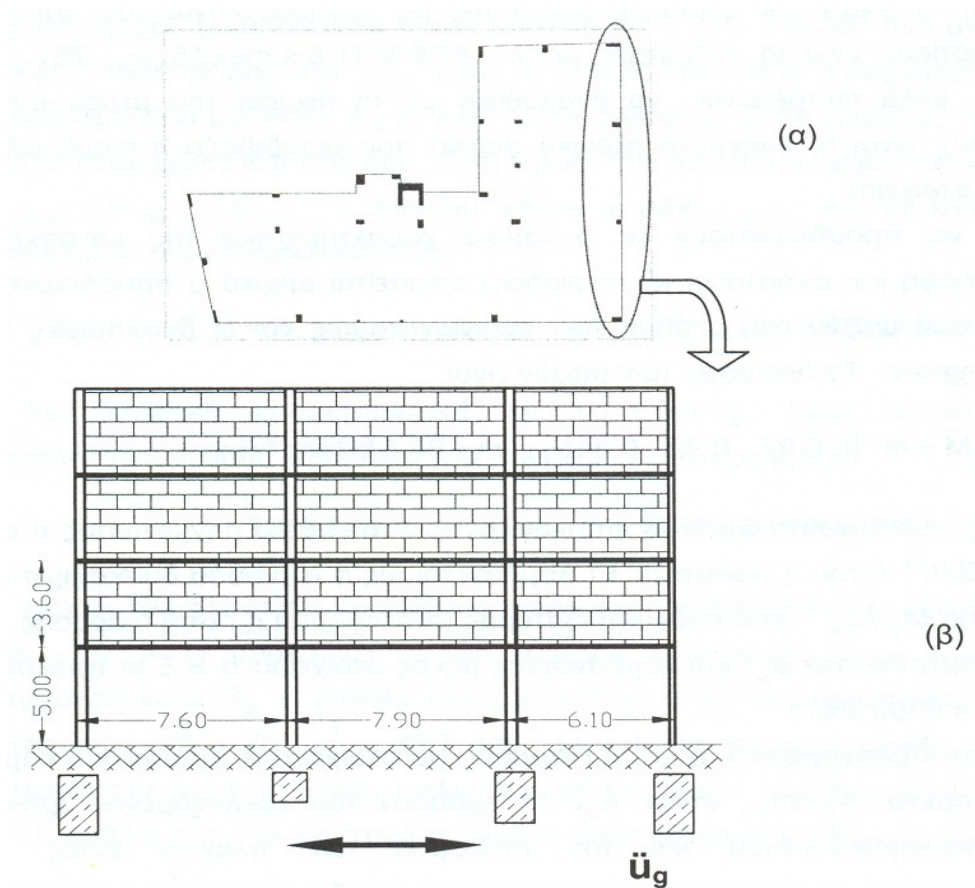
πρώτου ορόφου.

Ο ορισμός τιμής στροφής εντός των ορίων που έχουν αναφερθεί οδηγεί στον καθορισμό ενός κατακόρυφου ορίου  $\Delta_{u,cr}$  στο φάσμα του σχήματος. Αποδεκτό σύστημα ενίσχυσης είναι γενικά αυτό που μπορεί να βελτιώσει την αντοχή και την δυσκαμψία (σχηματικά, τιμές δεξιά του ορίου  $\Delta_{u,cr}$  και πάνω από την καμπύλη ισοδύναμου φάσματος διαρροής που αντιστοιχεί στην οριακή διαθέσιμη πλαστιμότητα  $\mu_u$

του μονοβάθμιου συστήματος όπως προκύπτει από τα χαρακτηριστικά των πλαστικών αρθρώσεων των κατακόρυφων στοιχείων).

### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Οι αρχές διαστασιολόγησης ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών όπως διατυπώθηκαν παραπάνω έχουν εφαρμοσθεί από τους Tastani and Pantazopoulou (2002) στο τετραόροφο πλαίσιο με πιλοτή του σχήματος και παρουσιάζονται ακολούθως.





Τα τρία ανοίγματα του πλαισίου έχουν μήκη 7.6 m, 7.9 m και 6.1 m αντίστοιχα, ενώ οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων λαμβάνονται ως 0.4x0.7 m, 0.35x0.35 m, 0.4x0.6 m και

0.4x0.7 m στην πιλοτή, και 0.35x0.60 m, 0.35x0.35 m, 0.35x0.5 m και 0.35x0.6 m στους ανώτερους ορόφους. Σημειώνεται ότι ο ισχυρός άξονας των υποστυλωμάτων είναι κάθετος στο επίπεδο του πλαισίου με αποτέλεσμα κατά την σεισμική δράση η κάμψη να ασκείται περί τον ασθενή άξονα της διατομής. Το ύψος του ισογείου είναι 5 m ενώ των ανώτερων ορόφων 3.6 m. Οι ονομαστικές αντοχές των υλικών αντιστοιχούν σε C25/30 και 5400, ενώ ως οπλισμός διάτμησης θεωρούνται συνδετήρες 5220 με διάταξη  $\Phi 6/300$  mm. Τα ποσοστά διαμήκους οπλισμού (εφελκυόμενου και θλιβόμενου) για τα υποστυλώματα της πιλοτής λαμβάνονται αντίστοιχα: 0.97% για 40/170, 0.82% για 35/35 και 0.54% για 40/60.

Ο προκαταρκτικός έλεγχος της λυγνότητας των υποστυλωμάτων της πιλοτής υποδεικνύει την ανάγκη δυσκαμψίας: τα ακραία στοιχεία έχουν τιμή  $\lambda = 41.7 < \max(25, 15/v_d)$  και χαρακτηρίζονται ως μη λυγνρό (λόγω του χαμηλού αξονικού τους φορτίου), ενώ τα ενδιάμεσα με  $\lambda = 47.6$  &  $41.6 > \max(15/v_d, 75/v_d)$  είναι μεν λυγνρό, αλλά επιτρέπεται να αναλυθούν με τη θεωρία του μεμονωμένου υποστυλώματος ( $v_d$  είναι το ανηγμένο αξονικό φορτίο που μεταβιβάζει η ανωδομή σε κάθε κατακόρυφο στοιχείο).

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής (θεμελιώδης ιδιομορφή και αντίστοιχη ιδιοπερίοδος) απαιτείται αρχικό ο προσδιορισμός των συγκεντρωμένων μαζών στη στάθμη των ορόφων καθώς και οι δυσκαμψίες των κατακόρυφων στοιχείων. Το διάνυσμα των μαζών είναι:

$$\bar{M} = m \cdot \{1, 0.92, 0.92, 0.84\}, \quad m = 98.4 \text{ kNsec}^2/\text{m}$$

Οι δυσκαμψίες των υποστυλωμάτων υπολογίζονται στο στάδιο ρηγμάτωσης II από τη σχέση  $K_j = 12EI/h^3$  όπου η ποσότητα EI λαμβάνεται ως η τέμνουσα δυσκαμψία στο στόδιο της διαρροής  $M_y I \varphi_y$ . Από ανάλυση διατομής υπολογίζεται η ροπή διαρροής  $M_y$  και η αντίστοιχη καμπυλότητα  $\varphi_y$  και λαμβάνοντας μήκος στοιχείου  $h = 5$  m προκύπτει τελικό ότι  $K_{\text{πιλοτής}} = 9300$  kN/m.

Σημειώνεται ότι, προσεγγιστικό, η ροπή διαρροής για στοιχεία σε προέχουσα κάμψη ισούται με το γινόμενο  $A_{s1} z d f_y$ , όπου  $A_{s1}$  το εμβαδόν του εφελκυόμενου (μόνον) οπλισμού (συμπεριλαμβανομένου και του οπλισμού των πλακών εντός του συνεργαζόμενου πλάτους σε περίπτωση αρνητικής κάμψης δοκών ή σε τοιχώματα με πτερύγια όταν το πτερύγιο βρίσκεται στην εφελκυσόμενη ζώνη), Z αδιάστατος αριθμός που κυμαίνεται μεταξύ 0.75 και 0.85 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής, d το

στατικό ύψος της διατομής και  $f_y$  η τάση διαρροής του εφελκυσμένου χάλυβα (π.χ. για 5400,  $f_y = 400$  MPa). Η καμπυλότητα διαρροής  $\phi_y$  δίνεται από τις παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις, ανάλογα με το σχήμα της διατομής (ορθογωνική ύψους  $h$  ή κυκλική διαμέτρου  $O$ ) (Priestley et al. 1996):

$$\phi_y h = 2.15 \frac{f_y}{E_s}$$

$$\phi_y D = 2.45 \frac{f_y}{E_s}$$

όπου  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (200 GPa).

Η δυσκαμψία των τοιχοπληρώσεων των ανώτερων ορόφων ορίζεται ως  $E_m t_m / [4(h_j / l_{mi})^3 + (h_j / f_{mi})]$ , όπου  $E_m$  και  $t_m$  το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος της τοιχοπλήρωσης (λαμβάνονται προσεγγιστικά ως  $0.3 E_c$  και 200 mm αντίστοιχα),  $h_j$  είναι το ύψος του ορόφου και  $f_{mi}$  είναι το μήκος του κάθε ανοίγματος το οποίο στους υπολογισμούς λαμβάνεται ως το μισό του ανοίγματος, ώστε εμμέσως να ληφθούν υπόψη τα κενά (παράθυρα και πόρτες). Έτσι προκύπτει ότι η δυσκαμψία του κάθε ορόφου είναι:  $K_{ορόφου} = K_{υποστ.} + K_{τοιχ.} = 830000 \text{ kN/m} = 89K_{\piλοτής}$ , και το αντίστοιχο διάνυσμα δυσκαμψιών της κατασκευής είναι:

$$\bar{K} = K_{\piλοτής} \cdot \{1, 89, 89, 89\}, \quad K_{\piλοτής} = 9300 \text{ kN/m}$$

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως προκύπτουν από την επαναληπτική μέθοδο ανάλυσης του Rayleigh, έχουν ως εξής:

$$T = 1.24 \text{ sec} \quad \bar{\Phi} = \{0.984, 0.992, 0.997, 1\}$$

Με χρήση του ελαστικού φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων - μετατοπίσεων (ATH3 long. -  $\mu = 1$ ) προκύπτει ότι για περίοδο κατασκευής  $T = 1.24 \text{ sec}$  η σεισμική επιτάχυνση είναι  $S_a = 0.088g$  και η αντίστοιχη ελαστική μετατόπιση του μονοβάθμιου συστήματος  $S_d^{el} = S_a / \omega^2 = 33.7 \text{ mm}$ . Ο συντελεστής συμμετοχής της 1ης ιδιομορφής υπολογίστηκε σε  $\lambda = 0.993$ , οπότε η μετατόπιση του πλαισίου είναι ίση με  $S_{\piλαισίου}^d = S_d^{el} / \lambda = 33.9 \text{ mm}$ . Η ελαστική τέμνουσα βάσης είναι  $V_{el} = K_{\piλοτής} S_{\piλαισίου}^d \Phi_1 = 310.23 \text{ kN}$ . Το επόμενο βήμα ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός της εγγενούς αντοχής της πιλοτής σε οριζόντια δύναμη. Η συνολική τέμνουσα δύναμη προσδιορίζεται από την συμβολή οπλισμού και σκυροδέματος των τεσσάρων υποστυλωμάτων (δεν λαμβάνεται υπόψη η ευμενής συμβολή του αξονικού φορτίου στην βελτίωση της αντοχής σε διάτμηση διότι

οι θεωρούμενοι αραιά τοποθετημένοι συνδετήρες - Φ6/300 - παρέχουν πτωχή περίσφιγξη) ως εξής:

$$V_{Rd,tot} = \sum_{i=1,4} V_{Rdi} = \sum_{i=1,4} (0.3V_{Rd1} + V_{wd}) = 174.87 \text{ kN}$$

Ακολουθως υπολογίζεται η αθροιστική τέμνουσα δύναμη διαρροής, ίση με 378.49 kN, η οποια είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή του φορέα (174.87 kN). Ο απαιτούμενος δείκτης πλαστιμότητας σε σχέση με το δεδομένο ελαστικό φάσμα προσδιορίζεται σε  $\mu_u = V_{el}/V_{Rd,tot} = 310.23/174.87 \gg 1.8$ , ενώ η αντίστοιχη μετατόπιση της πιλοτής είναι  $\Delta_u = \mu_u S_d^{el} = 1.8 \times 33.7 = 60.66 \text{ mm}$ , από την οποία προκύπτει στροφή βάσης για τα υποστυλώματα της πιλοτής ίση με 1.21 % ( $= \Delta_u / h_j$ ).

Προκειμένου η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης να είναι αποτελεσματική προάγοντας την επιθυμητή ελαστοπλαστική απόκριση της κατασκευής και αποτρέποντας ταυτοχρόνως την υπερβολική στροφή βάσης, πρέπει να τεκμηριωθεί με κατάλληλο έλεγχο ότι επαρκεί η διατήρηση της δυσκαμψίας και η αύξηση της ικανότητας για παραμόρφωση των επιμέρους στοιχείων. Δηλαδή, διατηρώντας τη λειτουργία «μαλακού ορόφου» (διατήρηση δυσκαμψίας) αλλά αποτρέποντας την αστοχία των υποστυλωμάτων σε διάτμηση (το οποίο επιτυγχάνεται με αύξηση της διατμητικής αντοχής σε τιμή μεγαλύτερη από την δύναμη που απαιτείται για να διαρρεύσει ο διαμήκης οπλισμός των ισχυρότερων υποστυλωμάτων) η εκτιμώμενη τέμνουσα βάσης είναι ίση με την τέμνουσα διαρροής  $V_y = 378.49 \text{ kN}$ . Στον πίνακα υπολογίζεται η μετατόπιση κάθε υποστυλώματος  $\Delta_y$  κατά τη διαρροή στη στάθμη του 1<sup>ου</sup> ορόφου καθώς και η ανηγμένη δυσκαμψία  $k_j$  κάθε υποστυλώματος ως προς τη συνολική δυσκαμψία του ορόφου. Σημειώνεται ότι κατά τη διαρροή των πλέον δύσκαμπτων υποστυλωμάτων  $K_1$ ,  $K_3$  και  $K_4$  η οριζόντια μετάθεση του ορόφου εκτιμάται προσεννιστικά σε  $0.5 \times (35.96 + 40.70) = 38.33 \text{ mm}$ , που αντιστοιχεί σε στροφή βάσης περίπου 0.8%, ενώ το υποστυλώμα  $K_2$  παραμένει ελαστικό. Η αναρτυσσόμενη οριζόντια δύναμη  $\sigma'$  αυτό το επίπεδο μετατόπισης για το  $K_2$  προσδιορίζεται σε  $V_{sd2} = K_2 \times 38.33 = 44.83 \text{ kN}$ , και επομένως η συνολική πλευρική δύναμη  $V_{Sd,tot}$  για την οποια θα σχεδιαστεί η ενίσχυση είναι 348.59 kN. Αν συγκριθούν τα μεγέθη της διαθέσιμης αντοχής (174.87 kN) και της αντοχής διαρροής (378.49 kN) προκύπτει ότι η διαθέσιμη πλαστιμότητα είναι μόλις 0.5, γεγονός που δηλώνει την πρώιμη διατμητική αστοχία. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή της τέμνουσας διαρροής προσεγγίζει την ελαστική τέμνουσα βάσης του τροποποιημένου ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων - μετατοπίσεων (310.23 kN), γεγονός που οδηγεί σε απαιτούμενη πλαστιμότητα  $\mu_{plast} = 1$ .

Κατά την έναρξη της ανάλυσης της κατασκευής αναφέρθηκε ότι τα ενδιάμεσα

υποστυλώματα είναι λυγηρά, γεγονός που δηλώνει την ιδιαίτερη αδυναμία που παρουσιάζουν σε φαινόμενα δεύτερης τάξης: αν θεωρηθεί μετατόπιση αστοχίας κατά την διαστασιολόγηση της ενίσχυσης 38.33 mm, τότε η προκληθείσα ροπή δεύτερης τάξης ( $M_{P-\Delta}$ ) λόγω του αξονικού φορτίου της κατασκευής στις περιπτώσεις των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων υπερβαίνει το όριο 10% της ροπής διαρροής ( $M_y$ ) του διαμήκους οπλισμού που θεωρείται ως αποδεκτή τιμή χωρίς την ανάγκη επανασχεδιασμού του στοιχείου. Ωστόσο, η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης θα πρέπει να συμβαδίζει με της απαιτήσεις των νέων κανονισμών περί πλαστικής συμπεριφοράς κατά την αστοχία, οπότε θα πρέπει να επιλεγεί τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta > 1$  αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να υπάρξει ιδιαίτερη αντιμετώπιση των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος αστοχίας από φαινόμενα δεύτερης τάξης. Μία πιθανή λύση είναι η εφαρμογή συμβατικού μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος όμως θα αυξήσει τη δυσκαμψία της πιλοτής. Λαμβάνοντας υπόψη

όλα τα παραπάνω αποφασίζεται ως' απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta = 2.5$  (που αντιστοιχεί σε οριακή πραγματοποιούμενη στροφή βάσης  $2.5 \times 38.33 / 5000 = 1.9\%$ ).

Συγκεντρωτικά στοιχεία ανάλυσης.

| Υποστύλωμα             | $V_{Rd}$<br>(kN) | $V_y$<br>(kN) | $\Delta_y$<br>(mm) | $k_i = \frac{K_i}{\sum K_j}$ | $V_{Sd}$<br>(kN) | $N_{Sd}$<br>(kN) | $\frac{M_{P-\Delta}}{M_y}$ |
|------------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| K <sub>1</sub> (40/70) | 51.55            | 103.40        | 35.96              | 0.31                         | 103.40           | 625              | 9.27%                      |
| K <sub>2</sub> (35/35) | 27.81            | 74.73         | 63.89              | 0.13                         | 44.83            | 1275             | 43.60%                     |
| K <sub>3</sub> (40/60) | 43.96            | 96.96         | 40.70              | 0.25                         | 96.96            | 1150             | 18.18%                     |
| K <sub>4</sub> (40/70) | 51.55            | 103.40        | 35.96              | 0.31                         | 103.40           | 500              | 7.41%                      |
| <b>Σύνολα</b>          | <b>174.87</b>    | <b>378.49</b> | <b>---</b>         | <b>1.00</b>                  | <b>348.59</b>    | <b>---</b>       | <b>---</b>                 |

Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογισθεί ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων μανδύα για την επίτευξη  $\mu_\Delta = 2.5$  αλλά και για την αποφυγή των διαφόρων μορφών αστοχίας ψαθυρού τύπου (διάτμηση, λυγισμός θλιβόμενων οπλισμών, αστοχία αγκύρωσης σε ματίσεις), βάσει της μεθοδολογίας του Κεφ. 6 (για την πλαστιμότητα, τον λυγισμό και τις ματίσεις) και του Κεφ. 5 (για την διάτμηση). Για την εφαρμογή της ενίσχυσης επιλέγονται σύνθετα υλικά ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230$  GPa, εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{rk} = 3500$  MPa και πάχος υφάσματος 0.13 mm. Επίσης υποθέτουμε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής.

Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 10% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκίμιων (δηλαδή  $\eta_{\theta} = 0.10$ ). Η αντοχή σχεδιασμού του μανδύα υπολογίζεται ως  $f_{de} = \eta_e(f_{fk} / \gamma_f) = 0.90(3500/1.20) = 2625$  MPa. Ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων για την επίτευξη  $\mu_{\Delta} = 2.5$  δίνεται στον πίνακα, ενώ ας σημειωθεί ότι για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις (διάτμηση, λυγισμός, αγκύρωση) οι υπολογισμοί (εδώ παραλείπονται) δίνουν 1 ή το πολύ 2 στρώσεις.

Πίνακας Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων μανδύα συνθέτων υλικών ανά υποστύλωμα για την επίτευξη  $\mu_{\Delta} = 2.5$ .

| Υποστύλωμα             | Πλαστιμότητα $\mu_{\Delta} = 2.5$ |          |                   |
|------------------------|-----------------------------------|----------|-------------------|
|                        | $\frac{\sigma_{\ell ud}}{f_{cd}}$ | $k_{e1}$ | Αρ. στρώσεων      |
| K <sub>1</sub> (40/70) | 0.2                               | 0.34     | 10.05 → <b>10</b> |
| K <sub>2</sub> (35/35) | 0.2                               | 0.50     | 3.42 → <b>4</b>   |
| K <sub>3</sub> (40/60) | 0.2                               | 0.40     | 7.33 → <b>8</b>   |
| K <sub>4</sub> (40/70) | 0.2                               | 0.34     | 10.05 → <b>10</b> |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Ε.Μ.Π. ΔΙΠΛ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΠΕΙΩΝ ΕΠΙΣΤ.

ΔΕ. ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΗΡΑΤΤΕΣ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ε. Γ. ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΑ

| Α/Α       | 46                        | ΑΡΙΣΚΟΣ        | ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΓΟΥ                               | ΕΠΙΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ | ΜΗΚΟΣ | 4500              | ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ |
|-----------|---------------------------|----------------|--|---------------|-------|-------------------|-------------------|
| ΣΗΡΑΤΤΑ   | ΑΡΙΣΚΟΣ                   | ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΓΟΥ   | ΕΠΙΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ                              | ΜΗΚΟΣ         | 4500  | ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ |                   |
| ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ | ΑΡΟΣΟΧΩΡΙ ΠΟΤΑΜΟΣ ΑΡΑΧΘΟΣ | ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ      | ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ - ΟΚ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ       | ΔΙΑΤΟΜΗ       | 100   | ΑΠΟ               |                   |
| ΕΙΔΟΣ     | ΟΔΙΚΗ                     | ΕΡΓΟΛΑΒΟΣ      | ΕΛ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ, ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΙΚΗ, ΠΛΑΝΤΕΧΝΙΚΗ | ΠΛΑΤΟΣ        | 11    | ΩΣ                |                   |
| ΣΚΟΠΟΣ    | ΕΠΙΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ             | ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ | 29.500.000,000,00 Δρχ                      | ΤΡΟΧΙΑ        | 2     | ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΡΑΤΤΩΝ  |                   |
|           |                           |                |  |               |       | 2                 |                   |

Γεωτεχνικός κλάος - ΙΟΝΙΑ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

- ..... Ενώσεις
- ..... ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ
- ..... ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
- ..... ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ
- ..... ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ 2
- ..... ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ
- ..... ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ 3

ΔΑΝΔΙΕΝ ΔΑΝΔΙΕΝΑ 200Μ, 12 ΣΥΝΑΕΤΗΡΙΕΣ ΣΗΡΑΤΤΕΣ, ΜΕΘΟΔΟΣ ΝΑΤΜ 5 ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ, ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΗΡΑΤΤΩΝ 30Μ

ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

ΕΠΕΡΟΤΕΝΕΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΓΣΝΩΔΕΙΣ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ, ΖΩΝΕΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ, ΔΙΑΤΜΩΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ, ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ, ΕΝΤΟΝΗ ΥΑΡΟΦΟΡΙΑ ΛΟΓΩ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ ΨΑΜΜΙΤΗ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΝ, ΔΥΣΚΟΝΗ ΑΠΟΣΤΡΑΤΤΙΣΗ ΛΟΓΩ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ - ΦΥΣΧΟΣ ΔΙΑΤΡΑΛΙΜΕΝΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ ΚΑΙ ΑΠΡΟΒΛΕΠΤΟΣ - ΣΥΝΘΕΛΙΒΟΝΤΑ ΕΑΔΦΗ, ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΦΟΡΑ - ΔΙΟΚΟΛΩΔΕΙΣ ΠΛΑΚΩΝ

ΕΚΤ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ  ΕΙΔΟΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΡΑΒΔΟΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΑΚΤΗΣΗΣ

ΠΛΑΣΙΑ  ΕΙΔΟΣ ΠΛΑΣΙΩΝ

ΑΓΚΥΡΙΑ  ΠΑΧΟΣ ΕΚΤ ΣΚΥΡ

ΔΟΚΟΙ ΠΡΟΠΟΡΕΑΣ

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΕΙΣ, ΑΓΚΥΡΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 6Μ ΣΕ ΚΑΝΑΒΟ 1Χ1 Φ32 ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΑΚΤΩΣΗΣ, ΠΛΑΣΙΑ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ, ΑΡΧΙΚΑ ΕΦΑΡΜΟΣΘΕΚΑΝ ΠΛΑΣΙΑ ΙΓ ΣΤΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΠΛΑΣΙΑ ΤΥΠΟΥ ΗΕΒ, ΚΑΘΕΤΕΣ ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ ΣΤΟΜΙΩΝ, ΕΚ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΙΝΟΙΔΙΣΜΕΝΟ ΠΑΧΟΥΣ 40 ΕΚ

ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΩΠΙΩΝ, ΑΝΑΡΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΑΝΑΛΗΝ ΣΕ ΝΕΕΣ ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕ ΝΕΑ GSI, ΠΡΟΓΩΔΗ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΝΟΧΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ - ΚΑΘ' ΑΡΕΣΗ ΠΛΑΣΙΩΝ, ΜΙΚΡΑ ΒΗΜΑΤΑ, ΠΡΟΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ - ΑΠΟΣΤΡΑΤΤΙΣΤΙΚΕΣ ΟΠΕΣ ΜΗΚΟΥΣ 12Μ, ΠΡΟΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΝΟΣ ΚΑΛΑΟΥ ΑΡΚΕΤΑ ΩΣΤΕ ΝΑ ΥΠΑΡΧΕΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΡΑΤΤΙΣΗ -

ΑΔΑΔ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ - ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ 15 ΕΚ ΜΕΣΑ ΣΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΔΙΟΦΩΛΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΓΚΥΡΙΩΝ, GSI ΜΙΚΡΟΤΕΡΑ ΚΑΤΑ 30% ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΧΙ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΚ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΛΑ ΣΗΜΕΙΑ ΛΟΓΩ ΟΧΙ ΚΑΝΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ ΣΤΩΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΟΥ ΘΩΛΟΥ



Ε.Μ.Π. ΔΙΜΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΤΙΤΛΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΕ. ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΗΡΑΤΕΣ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ε. Γ. ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ

Α/Α 6  
 ΣΗΡΑΤΑ **ΘΗΣΑΥΡΟΥ**  
 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΝΕΣΤΟΣ  
 ΕΙΔΟΣ ΥΠΟΤ. ΘΑΛΑΜΟΣ  
 ΣΚΟΠΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΒΑΒΛΙΑΣΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΙΔΑΣΩΣΩΣ ΠΡΟΥΧΙΟΔΟΤΗΜΟΣ ΥΗ

ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΓΟΥ ΔΕΗ ΔΑΥΕ  
 ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ ENGINEER REPORT  
 ΕΡΓΟΛΑΒΟΣ

ΜΗΚΟΣ 100  
 ΔΙΑΤΟΜΗ 973  
 ΠΛΑΤΟΣ 23  
 ΤΡΟΧΙΑ 0

ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΠΟ 01/1973  
 ΟΣ 01/1996  
 ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΡΑΤΩΝ 1

Γεωτεχνικός Σάμος - Μέγα Ροδόμη  
 Εγείριτες  
 ΓΕΩΔΟΤΙΚΟΣ ΓΝΕΥΣΙΟΣ ΓΡΑΝΙΤΟΓΝΕΥΣΙΟΣ  
 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ  
 ΓΕΩΔΟΤΙΚΟΣ ΣΧΕΤΟΛΟΓΟΣ ΒΙΟΤΙΤΙΚΟΣ  
 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ 2  
 ΓΕΩΔΟΤΙΚΟΣ  
 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ 3  
 ΔΙΑΝΟΜΗ  
 ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ, ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΝΑ 5Μ

ΕΚΤ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ  ΕΙΔΟΣ ΑΓΚΥΡΩΝ ΠΡΟΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΛΑΜΙΔΕΣ

ΠΛΑΚΙΑ  ΕΙΔΟΣ ΠΛΑΚΙΩΝ

ΑΓΚΥΡΑ  ΠΛΑΧΟΣ ΕΚΤ ΣΚΥΡ 150-200

ΔΟΚΟΙ ΠΡΟΤΟΡΕΙΑΣ

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ 15 22 Μ, 4Χ4, ΑΓΚΥΡΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ SPIN LOCK 6Μ 2Χ2, ΙΝΟΠΛΕΜΕΝΟ ΕΚΤ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 15 ΜΜ ΜΕ ΠΛΑΚΙΑ, ΑΠΟΣΤΡΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΟΠΕΣ 6Μ ΜΕ ΚΑΙΣΗ 100

ΓΕΩΔΟΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

ΦΑΕΒΕΣ ΑΙΔΑΤΗ ΚΑΙ ΠΗΛΜΑΤΤΗ - ΤΡΙΕΣ ΟΙΚΟΤΕΝΕΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ, ΚΥΡΙΑ ΣΧΕΤΟΤΗΤΑ, ΕΝΤΟΝΗ ΕΞΑΛΟΙΩΣΗ ΣΧΕΤΟΛΟΓΟΥ, ΕΠΙΠΕΔΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ - ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΣΕ ΑΣΤΙΑΘΗ ΜΑΖΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ - ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΛΑΚΑ ΔΙΟΤΚΟΥΜΕΝΑ ΥΑΙΚΑ (ΜΟΝΤΜΟΡΙΛΟΝΙΤΕΣ), ΔΙΟΚΟΛΗΕΙΣ ΣΦΗΡΑΣ

ΑΝΙΜΕΤΩΣΤΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΡΑΤΩΣΗ ΕΚΚΑΣΣΦΗΣ ΔΕΚΑΝΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΠΛΟ ΥΨΗΛΟ ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΘΡΥΠΗΣ ΥΠΟΔΟΤΗΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ BACK ANALYSIS, ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΠΟΚΟΛΗΕΩΝ ΣΦΗΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ UNWEDGE, ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΑΓΚΥΡΙΑ SPIN LOCK, ΠΡΟΑΓΚΥΡΩΣΗ ΜΕΤΩΠΙΟΥ

ΑΛΛΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ  
 ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΑΛΙΣΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΖΩΝΩΝ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ, ΠΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΡΕΣΗ ΣΤΟΝ ΑΡΜΩ ΔΙΑΣΤΩΛΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΘΩΛΟΥ.

ΕΜΠΛΗ ΔΙΜΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΘΕΣΗ ΕΡΓΩΝ

ΔΕ ΕΚΔΗΛΗΚΕΣ ΣΗΡΑΤΕΣ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ε. Γ. ΦΩΤΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

Α/Α 64

ΣΗΡΑΤΙΑ **ΣΙΝ**

ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΓΟΥ ΕΠΙΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ

ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΗΡΙΑΣ ΤΜΗΜΑ 122 ΑΓ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΟΥΜ ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ ΟΤΜ

ΜΗΚΟΣ 771 ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΠΟ

ΕΙΔΟΣ ΟΔΙΚΗ

ΕΡΓΟΛΑΒΟΣ ΑΤΕΜΚΕ, ΤΕΧΝΟΛΟΜΗ ΑΦΟΙ ΤΡΑΥΛΟΥ, ΗΦΑΙΣΤΟ

ΠΛΑΤΟΣ 100 ΩΣ 12/2001

ΣΚΟΠΟΣ ΕΠΙΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ

ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ 2.100.000,000,00 ΔΡΧ

ΤΡΟΧΙΑ 0

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΡΑΤΙΩΝ 2

Γεωτεχνικός Σύνδεσμος ΙΟΝΙΑ

ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

ΕΚΤ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ  ΕΙΔΟΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ SWELEX

..... ΓΕΩΔΟΤΙΚΟΣ ΦΑΛΥΣΧΗΣ ΙΟΝΙΟΥ

ΠΛΑΞΙΑ  ΕΙΔΟΣ ΠΛΑΞΙΩΝ LG

..... ΓΕΩΔΟΤΙΚΟΣ ΙΑΥΟΛΙΘΟΣ

ΑΓΚΥΡΙΑ  ΠΛΑΧΟΣ ΕΚΤ ΣΚΥΡ 350 - 400

..... ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ 2

ΔΟΚΟΙ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ

..... ΓΕΩΔΟΤΙΚΟΣ

ΥΠΟΣΤΡΩΣΗ

..... ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ 3

ΙΝΟΠΛΑΣΜΕΝΟ ΕΚΤ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΠΛΑΞΙΑ LG, ΑΓΚΥΡΙΑ SWELEX

..... ΔΙΑΝΟΜΗ

ΚΑΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΣΗ

ΝΑΤΜ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΔΥΟ ΜΕΤΩΛΙΑ - ΧΡΗΣΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΜΕ ΒΗΜΑ 3Μ - ΜΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΚΑΛΩΔΩΝ ΤΗΣ

ΓΕΩΔΟΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

ΕΝΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΜΑΡΜΑΡΥΤΟΥΧΩΝ ΨΑΜΜΙΤΩΝ ΚΑΙ ΙΑΥΟΛΩΔΩΝ ΜΑΡΜΩΝ, ΣΕ ΜΙΚΡΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΧΟΥΝ ΜΟΡΦΗ ΥΠΕΙΘΥΣ ΒΡΑΧΟΥ - 2 ΟΙΚΟΤΕΝΕΙΣ

ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΚΑΙ 2 ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΕΡΕΚΣΚΑΦΗΣ ΑΥΤΟ ΑΠΟΚΟΛΗΘΗ ΚΑΙ ΠΙΣΤΩΣΗ ΣΦΗΜΑΣ ΛΟΓΩ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ - ΕΝΤΟΝΗ ΥΑΡΟΦΟΡΙΑ ΣΕ ΖΩΝΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΑΠΟΣΤΡΑΤΤΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΑΠΟΣΤΡΑΤΤΗΤΙΚΕΣ ΟΠΕΣ 6Μ - ΑΜΕΣΗ ΕΠΕΝΑΥΣΗ ΕΚΤ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΤΑΧΕΙΑΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΙΑΥΟΛΙΘΟΥ - ΧΡΗΣΗ ΝΤΟΠΙΩΝ ΥΑΚΩΝ ΣΤΑ ΣΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΣΕ ΟΙΚΕΚΟ - Ο ΑΕΥΤΕΡΟΣ ΚΑΛΩΔΟΣ ΕΓΙΝΕ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΟΥ

ΑΛΛΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΤΙΑΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΛΛΑ ΣΗΜΕΙΑ ΧΑΡΑΞΗΣ, ΕΠΙΧΟΝΗΘΗ ΟΡΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΕΠΙΠΛΟΝΤΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ - ΥΠΗΡΞΕ ΑΛΛΑΤΗ ΕΡΓΟΛΑΒΙΑΣ



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1)ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΑΚΟΣ**, "Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία", Β' έκδοση τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδας,Αθήνα 2004.
- 2)Δρος ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΥΡ. ΔΗΜΑΚΟΥ**, "Σημειώσεις για το μάθημα τεχνολογίας σκυροδέματος", Αθήνα 1993
- 3)Ε. ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ**,μεταπτυχιακή εργασία "Ολοκληρωμένες και υπό κατασκευή σήραγγες στην Ελλάδα" / Ε.Ε.Σ.Υ.Ε. (Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων), 2001
- 4)Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων**,Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.),"Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια", Αθήνα 2001.
- 5)ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Χ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ**, "Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά", Α' έκδοση, Πάτρα 2003.
- 6)Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας**, "Κανονισμός Επεμβάσεων", Αθήνα 2004.
- 7)Newman, A.** "Structural Renovation of Buildings : Methods, Details, and Design Examples", McGraw-Hill, New York 2001
- 8)Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας**, "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός", Αθήνα 2000
- 9)Federal Emergency Management Agency**, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Whashington D.C., 2000
- 10)Penelis G. & Kappos A.** "Earthquake Resistant Concrete Structures", 1997

**11)American Technology Council,** "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", November 1996

**12)Αντωνόπουλος Κ.** "Ενίσχυση Κόμβων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά", Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα 2001

**13)Antonopoulos C.P. and Triantafillou T.C.** "Analysis of FRP-Strengthened RC Beam – Column joints", 2002

**14)Triantafillou T.C. and Plevris N.** "Strengthening of RC Beams with epoxy-bonded fibre – composite materials", 1992



































