



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ
ΟΠΛΙΣΜΟ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ Ή ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ
ΤΣΟΥΚΑΛΑ ΑΝΤΩΝΙΑ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΠΑΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ- 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Δημητρίου Μπάρου.

Η παρούσα εργασία αφορά στην καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών οπλισμένου σκυροδέματος με πρόσθετους οπλισμούς όπως επικολλητά ελάσματα ή υφάσματα.

Καταρχάς, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας σε εκείνους τους οποίους βοήθησαν και συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της.

Ανεκτίμητη ήταν η συμβολή του επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Δημητρίου Μπάρου τον οποίο και θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την άριστη συνεργασία που είχαμε σε όλα τα στάδια της εργασίας μας, όποια στιγμή και αν χρειάστηκε.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους δικούς μας ανθρώπους για την αγάπη, την αμέριστη συμπαράσταση και τη συνεχή υποστήριξη που μας προσφέρουν σε κάθε στάδιο της ζωής μας.

Καραγιάννη Παναγιώτα

Τσουκαλά Αντωνία

Πάτρα, Οκτώβριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με πρόσθετο εξωτερικό οπλισμό από χάλυβα ή σύνθετα υλικά. Στόχος της εργασίας είναι αφενός η παρουσίαση και ανάλυση της παθολογίας των δοκών και πλακών οπλισμένου σκυροδέματος, αφετέρου η τρόποι επισκευής και ενίσχυσης δοκών και πλακών, επικεντρώνοντας ιδιαίτερα στην ενίσχυση με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην παθολογία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Περιγράφονται οι διάφορες μορφές βλαβών και οι τρόποι ενίσχυσης, επισκευής και αποκατάστασης των συγκεκριμένων κατασκευών.

Επίσης, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή και ταξινόμηση των συνθετών υλικών, και αναφορά των πλεονεκτημάτων τους σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά.

Το επόμενο κεφάλαιο εστιάζει στην ενίσχυση δοκών και πλακών με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα και σύνθετα υλικά. Γίνεται περιγραφή των ιδιοτήτων τόσο του χάλυβα όσο και των ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή, και έπειτα γίνεται μία σύγκριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των χαλύβδινων ελασμάτων και των ελασμάτων από σύνθετα υλικά.

Έπειτα γίνεται παρουσίαση δύο παραδειγμάτων εφαρμογής καμπτικής ενίσχυσης σύμφωνα με τον Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Το πρώτο παράδειγμα εφαρμογής αφορά την καμπτική ενίσχυση δοκού με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα. Το δεύτερο παράδειγμα εφαρμογής αφορά την καμπτική ενίσχυση πλάκας προβόλου με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα και σύνθετα υλικά.

Τέλος γίνεται εξαγωγή των σημαντικότερων συμπερασμάτων τα οποία προέκυψαν από τη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία για την ενίσχυση δοκών και πλακών με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα και σύνθετα υλικά.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστριών:

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες σπουδάστριες έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Οι Σπουδάστριες:

Παναγιώτα Καραγιάννη

Αντωνία Τσουκαλά

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	4
2. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ. ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	5
2.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	5
2.2. Παθολογία κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. Βλάβες και πού οφείλονται	5
2.3. Τεχνικές επισκευής και ενίσχυσης στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	17
3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	31
3.1. Ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά.....	31
3.2. Εισαγωγή - Ορισμός	31
3.3. Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών	32
3.4. Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.....	34
3.5. Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών.....	35
4. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΚΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	38
4.1. Εισαγωγικά Στοιχεία.....	38
4.2. Γενικά χαρακτηριστικά ελασμάτων που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος	38
4.3. Χαλύβδινα ελάσματα.....	39
4.4. Ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή	45
4.5. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών και χαλύβδινων ελασμάτων.....	49
4.6. Μηχανισμοί αστοχίας και τυπική συμπεριφορά ενισχυμένης με FRP σε κάμψη δοκού.....	51
4.7. Ενδιάμεση ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης.....	53
4.8. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία.....	54
4.9. Καμπτική ενίσχυση δοκού με χαλύβδινα ελάσματα και ινοπλισμένα πολυμερή τοποθετημένα σε αυλάκια (εγκοπές).	54
5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ	56
5.1. Παράδειγμα εφαρμογής: Καμπτική ενίσχυση δοκού με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα..	56
5.2. Παράδειγμα εφαρμογής: Καμπτική ενίσχυση πλάκας προβόλου με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα και σύνθετα υλικά.....	67
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πλειονότητα των κτιρίων στην Ελλάδα είναι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν αρκετά πριν τη θέσπιση των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Οι κατασκευές είναι φυσικό να ακολουθούν τις γνώσεις αντισεισμικού σχεδιασμού της εποχής που σχεδιάστηκαν και ακόμη μερικές έχουν κατασκευαστεί εμπειρικά, χωρίς στατικούς υπολογισμούς. Οι σεισμοί θέτουν σε ισχυρή δοκιμασία τις κατασκευές και προκαλούν βλάβες που αποκαλύπτουν τόσο τις υπολογιστικές όσο και τις κατασκευαστικές ατέλειες των κτιρίων. Μια πολύ σημαντική αιτία εμφάνισης βλαβών από σεισμό στις κατασκευές είναι η αδυναμία εκτίμησης των χαρακτηριστικών της αναμενόμενης σεισμικής καταπόνησης κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου [6]. Εκτός όμως από το σεισμό, βλάβες μπορούν να προκληθούν και από κάποια δυσμενή φορτία ή από ισχυρούς ανέμους που δεν λήφθηκαν σοβαρά υπ' όψη κατά τη φάση του σχεδιασμού της κατασκευής.

Η επισκευή και η ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ.) είναι ένα μείζων θέμα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι σύγχρονοι μηχανικοί. Ο σεισμός και συνακόλουθες βλάβες, οι περιβαλλοντολογικές επιδράσεις, το γεγονός ότι πολλές από τις κατασκευές έχουν σχεδιαστεί με παλιότερους κανονισμούς που σήμερα δεν ισχύουν είναι μερικοί από τους λόγους που καθιστούν αναγκαία την επέμβαση σε μία υφιστάμενη κατασκευή [16].

Η επισκευή αλλά και η ενίσχυση των κτηρίων κέντριζε ανέκαθεν το ενδιαφέρον των μηχανικών αλλά η ελλιπής γνώση του παρελθόντος, οδηγούσε σε εύκολες λύσεις, όπως αυτή της ανακατασκευής, κυρίως για συνήθη κτήρια κατοικίας. Με την πάροδο των χρόνων, η ακαδημαϊκή κοινότητα μαζί με εταιρίες κατάφεραν μέσω συνεργασία θεωρίας και πειραμάτων, να εφεύρουν πρακτικές και σχετικά οικονομικές λύσεις, με ικανοποιητική γενικά αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Σε συνδυασμό με την οικονομική και περιβαλλοντική κρίση των τελευταίων ετών, η οποία ασκεί πίεση για την διατήρηση των κατασκευών, είχε ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της εφαρμογής των μεθόδων αποκατάστασης και ενίσχυσης από τους μηχανικούς.

Η ωριμότητα της επιστημονικής γνώσης και το πολύπλοκο των θεμάτων που σχετίζονται με τις επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, καθιστούν ιδιαίτερα δυσχερή την ανάπτυξη ενός κανονιστικού πλαισίου. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη να παραχθεί ένας οδηγός – κανονισμός όπου θα επιβάλει κάποιους συγκεκριμένους κανόνες αλλά και θα βοηθάει τους μηχανικούς στην εφαρμογή της ενίσχυσης. Έτσι πρόσφατα παράχθηκε ο Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ), η θεσμοθέτηση του οποίου εξασφαλίζει μια αρτιότερη αντιμετώπιση στην επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων επισκευής και ενίσχυσης.

2. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ. ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα που βρίσκεται σε μια έντονη σεισμική περιοχή, τα κτίρια καλούνται να δοκιμαστούν για τα φορτία (σεισμικά) που έχουν σχεδιαστεί. Με δεδομένη την ένταση των σεισμικών δράσεων που οδηγεί σε σημαντικές τιμές ισοδύναμων σεισμικών φορτίων, γίνεται κατανοητό ότι η ύπαρξη βλαβών στις κατασκευές συχνά δεν μπορεί να αποφευχθεί. Αυτό γίνεται αποδεκτό και στους σύγχρονους Κανονισμούς όπου προβλέπεται ότι ο φέρων οργανισμός της κατασκευής θα υποστεί βλάβες κατά τη δράση του σεισμού σχεδιασμού που θα πρέπει να είναι περιορισμένες και επισκευάσιμες, ενώ για ένα πολύ ισχυρότερο σεισμό προβλέπεται ότι η πιθανότητα κατάρρευσης πρέπει να είναι επαρκώς μικρή.

Ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι ακραίων σεισμικών καταπονήσεων είναι η ψαθυρή αστοχία των κοινών περιοχών δοκών και υποστυλωμάτων. Στη χώρα μας ο κόμβος εθεωρείτο ότι αποτελούσε μια απλή προέκταση των υποστυλωμάτων και επομένως στην καλύτερη περίπτωση διαστασιολογούταν με τις ίδιες απαιτήσεις τέμνουσας. Στην πραγματικότητα όμως είναι μικρές περιοχές από τις οποίες ζητούνται παρά πολλά και πολύ εύστοχα χαρακτηρίστηκαν "πυριτιδαποθήκες" που μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε καταρρεύσεις οικοδομικών έργων όπως παρατηρήθηκε κατά τους τελευταίους σεισμούς [2]. Το σύνολο σχεδόν των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με δεσπόζουσα την πλαισιακή λειτουργία παρουσιάζουν έντονες βλάβες ή και τοπικές καταρρεύσεις και έχουν προβλήματα στους κόμβους, από ελαφρά διαγώνια ρηγματώση έως αποδιοργάνωση του σκυροδέματος. Σήμερα και καθώς οι διατάξεις των σύγχρονων κανονισμών προσπαθούν όλο και περισσότερο να εξασφαλίσουν ικανή αντοχή, πλαστικότητα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας τόσο στις δοκούς όσο και στα υποστυλώματα, η περιοχή του κόμβου χρειάζεται ακόμη περισσότερη προσοχή έτσι ώστε να μη γίνεται ο αδύναμος κρίκος του συστήματος.

2.2. Παθολογία κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. Βλάβες και πού οφείλονται

Πρέπει εξ' αρχής να τονιστεί ότι οι βλάβες στις κατασκευές δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν έστω και αν ο σχεδιασμός είχε γίνει σύμφωνα με τους πιο σύγχρονους Κανονισμούς με άρτια μελέτη και κατασκευή. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στο βαθμό αξιοπιστίας των δεδομένων και ιδιαίτερα των σεισμικών ή στις παραδοχές εξιδανίκευσης και τις προσεγγίσεις του αναλυτικού προσομοιώματος. Η ίδια η φιλοσοφία των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, επιτρέπει τις βλάβες όχι μόνο στα μη-φέροντα στοιχεία αλλά στο ίδιο το δομικό σύστημα [3]. Στο άρθρο 1.2 του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού [3] γίνεται αποδεκτό ότι ο φέρων οργανισμός της κατασκευής θα υποστεί βλάβες κατά τη δράση του σεισμού σχεδιασμού που θα πρέπει να είναι «περιορισμένες και επιδιορθώσιμες». Εξάλλου για ένα πολύ ισχυρότερο σεισμό προβλέπεται ότι η πιθανότητα κατάρρευσης πρέπει

να είναι επαρκώς μικρή. Όμως πέρα από όλα αυτά, και ειδικότερα καθόσον αφορά την ελληνική πραγματικότητα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο ανθρώπινος παράγοντας που επιδρά στο σύνολο των διαδικασιών για την ανέγερση των κατασκευών.

Σύμφωνα με το σύνηθες πλαίσιο κατασκευής συνήθων, οικοδομικών κυρίως, έργων στην Ελλάδα, ο ιδιοκτήτης ή ο «επί αντιπαροχή» κατασκευαστής ζητάει από το μηχανικό την «έκδοση της οικοδομικής άδειας» και συχνά αδιαφορεί για την ποιότητα της στατικής και αντισεισμικής μελέτης. Στη συνέχεια αναθέτει την εκτέλεση των εργασιών σε 25, κατά μέσον όρο, διαφορετικά συνεργεία, κατά κανόνα άγνωστα μεταξύ τους με μοναδικό συνήθως κριτήριο επιλογής, την οικονομικότητα των επιμέρους εργασιών. Τα δύο βασικά για την ασφάλεια της κατασκευής συνεργεία, οι «καλουπιτζήδες και οι σιδεράδες» είναι χωρίς καμία ειδική παιδεία, με μοναδικό εφόδιο την προγενέστερη εμπειρία τους που μερικές φορές μπορεί να είναι επιβλαβής. Συνεργεία όπως π.χ. υδραυλικοί και ηλεκτρολόγοι εν αγνοία τους προξενούν συχνά βλάβες στο φέροντα οργανισμό των κτιρίων. Άλλες απαραίτητες εργασίες αιωρούνται μεταξύ συνεργείων, ή συνεργείων και ιδιοκτήτου. Για παράδειγμα, ποιος αναλαμβάνει τη συστηματική συντήρηση οριζοντίων και κατακόρυφων μελών του δομικού συστήματος μετά από τη σκυροδέτηση; Και για το σκυρόδεμα, ποιος ευθύνεται για τη συχνά χαμηλότερη αντοχή του στο έργο; Το σκυρόδεμα έρχεται στο εργοτάξιο με μικρή ρευστότητα για λόγους οικονομίας του παραγωγού (λιγότερο τσιμέντο για σταθερό υδατοτσιμεντοσυντελεστή). Ο μηχανικός δεν θα ξεχάσει τη δειγματοληψία των 6 δοκιμίων που όμως μπορεί να βρεθούν εντάξει. Το συνεργείο σκυροδέτησης που δυσκολεύεται στη δόνηση λόγω της έλλειψης ρευστότητας του σκυροδέματος, ζητάει τηλεσυνθηματικά, περισσότερο νερό από το χειριστή της μπετονιέρας. Έτσι τυπικά όλοι φαίνεται να είναι εντάξει ενώ η αντοχή του σκυροδέματος είναι μειωμένη δραματικά [3].

Σε όλα αυτά έρχεται να προστεθεί και ο τεράστιος χρόνος διάρκειας της κατασκευής του έργου. Περισσότερο από 50% των διώροφων-τριώροφων κτιρίων που κατασκευάζονται ιδιόκτητα έχουν χρόνο περάτωσης 10 χρόνια [3]. Υπάρχουν μάλιστα κατασκευές που βρίσκονται οιοιδήποτε υπό εκτέλεση. Πολλές φορές ο ιδιοκτήτης μιας διώροφης π.χ. οικοδομής, φροντίζει για την αποπεράτωση του ορόφου όπου και κατοικεί, ενώ το ισόγειο παραμένει αδιαμόρφωτο. Εξαιρέση αποτελεί η περιοχή του συνήθως έκκεντρου κλιμακοστασίου μαζί με την είσοδο για τον όροφο, όπου χτίζονται οι τοιχοπληρώσεις αυξάνοντας έτσι ακόμη περισσότερο την ασυμμετρία κατανομής των δυσκαμψιών στο ισόγειο. Δηλαδή όχι μόνο δημιουργείται η περίπτωση μαλακού ορόφου αλλά συγχρόνως και η δυσμενέστερη από σεισμικής απόψεως κατανομή των δυσκαμψιών. Είναι πιθανόν, ότι το παραπάνω πλέγμα διαδικασιών έχει το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης για τις βλάβες στις κατασκευές. Η δυνατότητα για ουσιαστική παρέμβαση είναι μειωμένη και είναι πρωταρχικός παράγοντας για την ασφάλεια των κατασκευών η αλλαγή αυτού του συστήματος διαδικασιών για την κατασκευή των έργων, γιατί σε τελική ανάλυση είναι άδικο να αναλαμβάνει ο μηχανικός ευθύνες που δεν του ανήκουν.

Τέλος δεν θα πρέπει να αγνοηθεί η Ελληνική πραγματικότητα όσον αφορά τις κατασκευές που έχουν δομηθεί στο παρελθόν με βάση τους παλαιότερους κανονισμούς και διαφορετικές γνώσεις. Δυστυχώς, ακόμα και σήμερα, πολλές φορές στην κατασκευή εφαρμόζονται λανθασμένες συνήθειες και νοοτροπίες του παρελθόντος.

Σήμερα είναι γνωστό, ότι πολλές από τις υφιστάμενες κατασκευές με έντονη μεταβολή δυσκαμψίας καθ' ύψος όπως κτίρια με Pilotis (Σχήμα 1) ή με καταστήματα στο ισόγειο, όπου η δημιουργία μαλακού ορόφου είναι πολύ πιθανή, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε έναν ισχυρό σεισμό.



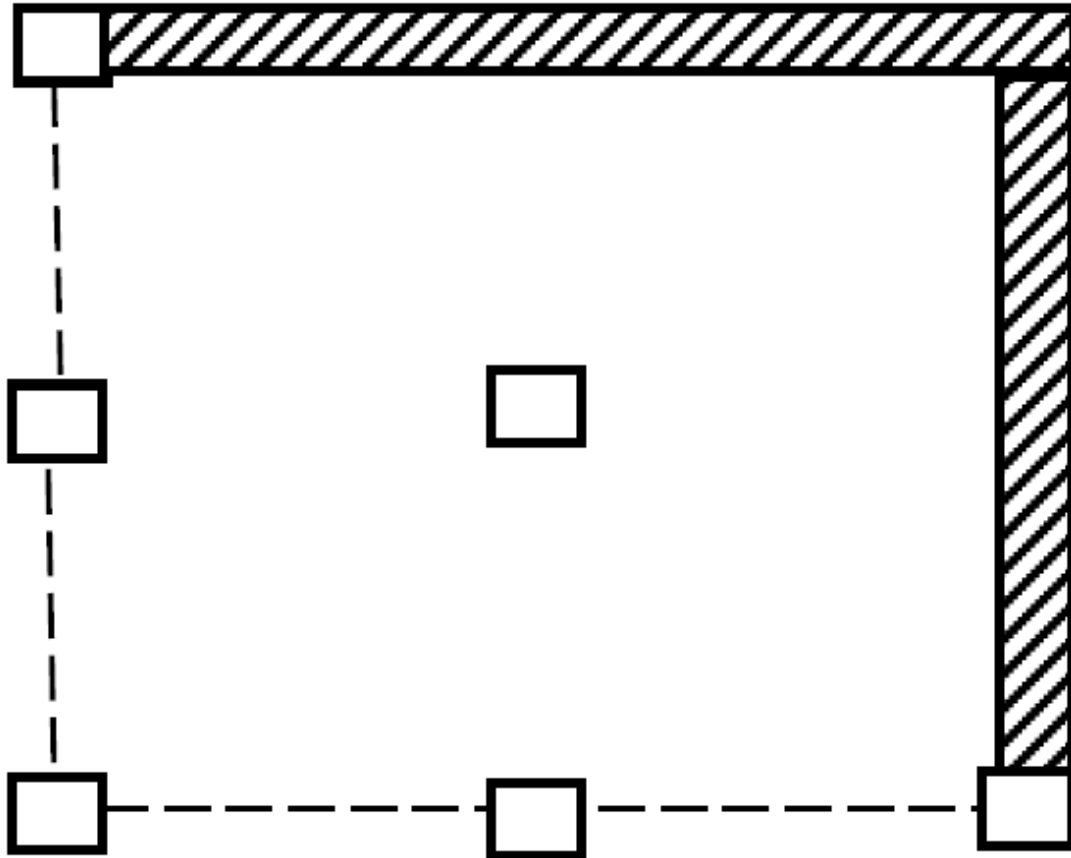
Σχήμα 1: Παράδειγμα κτιρίου με pilotis (<http://www.marneris.gr/parsant/>).

Επίσης εκκεντρότητες από ακανόνιστη κατανομή των δυσκαμψιών των κατακόρυφων μελών του δομήματος (Σχήμα 2) ή από «υποτιθέμενη» μη συνεργασία των τοιχοπληρώσεων με το δομικό σύστημα, επαυξάνουν την ένταση με στρεπτικές δυνάμεις και δημιουργούν ανομοιόμορφη κατανομή της σεισμικής καταπόνησης στο επίπεδο.

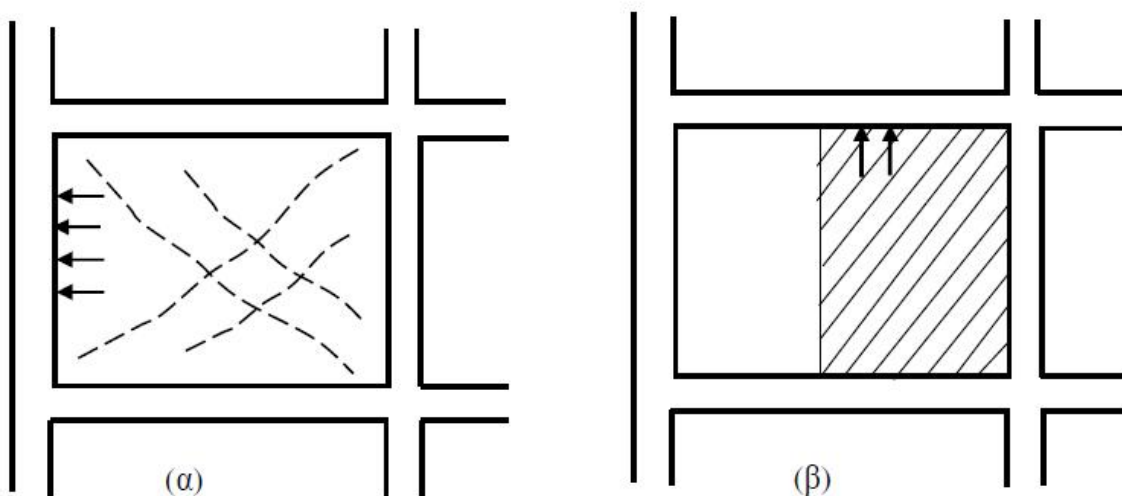
«Κοντά» υποστυλώματα συναντώνται συχνά σε συνήθεις τύπους κατασκευών όπως σε περιμετρικά κατακόρυφα στοιχεία ημιπόγειων, στην περίμετρο κλιμακοστασίων λόγω ενδιάμεσων στηρίξεων της κλίμακας, σε καταστήματα με πατάρια ή σε βιομηχανικούς χώρους όπου ισχυρές περιμετρικές τοιχοπληρώσεις σταματούν χαμηλότερα από τη στάθμη της δοκού για τη δημιουργία φεγγιτών. Σήμερα έχει πλέον συνειδητοποιηθεί ότι τα στοιχεία αυτά όχι μόνο καταπονούνται με μεγαλύτερη διατμητική ένταση λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας τους αλλά έχουν και μικρότερη διατμητική αντοχή [3].

Βλάβες επίσης μπορούν να παρουσιαστούν λόγω δυσμενούς επίδρασης των τοιχοπληρώσεων στα περιβάλλοντα δομικά στοιχεία. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις αυτού του τύπου. Η πρώτη (Σχήμα 3α) αφορά τη δυσμενή επίδραση στα περιβάλλοντα υποστυλώματα λόγω των πρόσθετων δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτά μετά τη

ρηγμάτωση της τοιχοποιίας. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου η τοιχοπλήρωση καλύπτει τμήμα μόνο του φανώματος του πλαισίου (Σχήμα 3β), το στατικό σύστημα στήριξης της δοκού οροφής μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικό απ' αυτό που έγινε αποδεκτό στην ανάλυση και ως εκ τούτου δημιουργούνται περιοχές με απρόβλεπτα υψηλότερες καταπονήσεις απ' ότι η αρχική εκτίμηση.



Σχήμα 2: Ακανόνιστη κατανομή δυσκαμψιών κατακόρυφων μελών [3].



Σχήμα 3: Δυσμενής επίδραση τοιχοπληρώσεων (α) σε υποστυλώματα, (β) σε δοκούς [3].

Επίσης, σκόπιμο είναι να επισημανθεί ότι οι περιοχές σύνδεσης ισχυρών και αδυνάτων στοιχείων του φορέα είναι εν γένει ευάλωτες.

Τέλος υπενθυμίζεται ότι συχνά παρουσιάζονται βλάβες είτε λόγω πρόσκρουσης (κατά τη σεισμική διέγερση) με γειτονικό κτίριο είτε λόγω προβλημάτων στη θεμελίωση.

Κλείνοντας, πρέπει να επισημανθεί και μία κατηγορία βλαβών που δημιουργούνται στις κατασκευές με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να οφείλεται σε υπέρβαση αντοχής αλλά στην επίδραση περιβαλλοντικών δράσεων όπως π.χ. η οξείδωση των οπλισμών και η αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης. Βλάβες αυτής της κατηγορίας καθώς επίσης και κάθε άλλη μορφή βλάβης που δεν κρίνεται άμεσα επικίνδυνη (ρηγματώσεις σε μη- φέροντα στοιχεία, πλάκες κλπ.) χρήζουν επισκευής όχι μόνο για λόγους αισθητικούς και λειτουργικούς ή για προστασία από περιβαλλοντικές δράσεις αλλά πολλές φορές και για την αποκατάσταση της αντοχής, δυσκαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας σε ένα μελλοντικό σεισμό.

Στη συνέχεια επιχειρείται μία στοιχειώδης ταξινόμηση των συνηθέστερων βλαβών ανάλογα με το δομικό στοιχείο. Η κατάταξη αυτή στοχεύει να βοηθήσει στην εκτίμηση της σοβαρότητας της υφιστάμενης κατάστασης για τη λήψη άμεσων μέτρων αφενός, και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επέμβασης αφετέρου. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Βλάβες σε Υποστυλώματα.
- Βλάβες σε Κόμβους Δοκών-Υποστυλωμάτων.
- Βλάβες σε Τοιχώματα
- Βλάβες σε Δοκούς.
- Βλάβες σε Πλάκες.

2.2.1. Βλάβες σε Υποστυλώματα

Οι βλάβες στα υποστυλώματα θεωρούνται από τις πιο συχνές και πιο σοβαρές μορφές βλαβών, καθώς σε πολλές περιπτώσεις ένας μετασεισμός μπορεί να προκαλέσει μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής. Οι βλάβες αυτές ανάλογα με την καταπόνηση του υποστυλώματος διακρίνονται σε καμπτικού και διατμητικού χαρακτήρα.

Οι βλάβες καμπτικού χαρακτήρα εμφανίζονται στα σημεία με τη μεγαλύτερη καμπτική ένταση δηλαδή στην κορυφή και τη βάση των υποστυλωμάτων. Στα σημεία με μικρότερη ένταση όπως είναι τα περιμετρικά υποστυλώματα των ανωτέρω ορόφων, η βλάβη παρουσιάζεται με τη μορφή οριζόντιας ρωγμής [10]. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της ρωγμής τόσο μεγαλύτερη είναι και η βλάβη. Η ρωγμή έχει ως αιτία την υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα σε εφελκυσμό, η οποία οφείλεται στην ανεπάρκεια του διαμήκους οπλισμού. Στην περίπτωση της υπέρβασης του ορίου θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, η βλάβη εμφανίζεται ως αποφλοίωση του στην περιοχή επικάλυψης των οπλισμών. Δεν είναι ιδιαίτερα σοβαρή όταν παρατηρείται σε περιοχή εκτός του πυρήνα. Οφείλεται στην παρουσία υπεροπλισμένων στοιχείων σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Μία άλλη σοβαρότερη βλάβη, ψαθυρού χαρακτήρα, είναι αυτή που οφείλεται στην ταυτόχρονη συνύπαρξη κάμψης και διάτμησης σε δομικά στοιχεία που υπόκεινται σε θλίψη μεγάλης έντασης. Η συγκεκριμένη κατάσταση προκαλεί σύνθλιψη και αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης, εμφανίζεται και στις δύο πλευρές του υποστυλώματος, οδηγεί σε βράχυνσή του και σε λυγισμό των κατακόρυφων ράβδων οπλισμού. Τα υποστυλώματα αυτά

έχουν μικρότερη διατομή από αυτήν που απαιτείται και βρίσκονται κοντά σε κόμβους που συντρέχουν ισχυροί δοκοί [10]. Το σημαντικότερο πρόβλημα το οποίο δημιουργεί η βλάβη αυτή στην κατασκευή, είναι η σημαντική μείωση της δυσκαμψίας του υποστυλώματος, η οποία με τη σειρά της αποφέρει αδυναμία μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων. Η αδυναμία αυτή οδηγεί σε υπερφόρτωση των γειτονικών υποστυλωμάτων από ανακατανομή της έντασης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση της κατασκευής μέσα από μία διενέργεια αλυσιδωτών αστοχιών.

Οι βλάβες διατμητικού χαρακτήρα παρουσιάζονται στις περιοχές των υποστυλωμάτων με τη μεγαλύτερη διατμητική αδυναμία. Τα δομικά στοιχεία που έχουν μικρότερη αντοχή στις υψηλές καμπτικές ροπές, όπως τα περιμετρικά υποστυλώματα, εμφανίζουν διαρροή του οπλισμού τους με αποτέλεσμα να έχουν μειωμένη διατμητική αντίσταση.

Όταν οι τιμές του λόγου διάτμησης είναι μικρότερες από 2.5, οι διατμητικού χαρακτήρα βλάβες εμφανίζονται τακτικά. Οι κατασκευές που παρατηρείται συχνότερα αυτό το φαινόμενο, είναι κατοικίες ή βιομηχανικοί χώροι με παράθυρα ή φεγγίτες εκατέρωθεν του υποστυλώματος. Λόγω του ότι οι βλάβες αυτές είναι ψαθυρές θεωρούνται σημαντικές. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις διατμητικές βλάβες όπου η αστοχία της τοιχοπλήρωσης ενός πλαισιώματος επεκτείνεται στα υποστυλώματα του πλαισίου. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε περιπτώσεις μονόπλευρης και καλά δομημένης τοιχοπλήρωσης, σφηνωμένης περιμετρικά σε πλαίσιο με ασθενή κατακόρυφα στοιχεία.

Οι βλάβες στα υποστυλώματα και στα τοιχώματα μπορούν να διακριθούν σε πέντε (5) κατηγορίες, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την επιλογή της μεθόδου ενίσχυσης και για την λήψη μέτρων ασφαλείας. Οι κατηγορίες είναι οι εξής [10]:

- Βαθμός Βλάβης Α

Περιλαμβάνει μεμονωμένες οριζόντιες ρωγμές με πλάτος 1-2 mm οι οποίες οφείλονται σε τοπικές αστοχίες όπως π.χ. αρμοί διακοπής εργασίας, ανεπαρκής αγκύρωση οπλισμών και μη ανεπάρκεια της διατομής σε κάμψη.

- Βαθμός Βλάβης Β

Ο συγκεκριμένος τύπος βλάβης αναφέρεται σε πλήθος πλατιών καμπτικών ροπών ή μεμονωμένων λοξών διατμητικών ρωγμών με πλάτος μικρότερο από 0,5 mm με την προϋπόθεση πως δεν παρατηρούνται εναπομένουσες μετακινήσεις.

- Βαθμός Βλάβης C

Σε αυτόν τον τύπο ανήκουν βλάβες όπως: χιαστί λοξές διατμητικές ρωγμές ή έντονη τοπική σύνθλιψη και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος υπό την προϋπόθεση πως δεν παρατηρούνται σημαντικές εναπομένουσες μετακινήσεις.

- Βαθμός Βλάβης D

Πλήρης αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στην περιοχή της βλάβης, λυγισμός του διαμήκους οπλισμού, διαρροή ή θραύση των συνδετήρων της περιοχής και ασυνέχεια στην περιοχή, χωρίς κατάρρευση του υποστυλώματος. Λαμβάνουμε υπόψη επίσης ότι οι εναπομένουσες μετακινήσεις (οριζόντιες ή κατακόρυφες κυρίως) είναι σχετικά μικρές.

- Βαθμός Βλάβης E

Πλήρης κατάρρευση του υποστυλώματος (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Κατάρρευση υποστυλώματος λόγω του σεισμού Northridge στην Καλιφόρνια το 1994. (<http://umich.edu/~acemrl/NewFiles/projects/recc.html>)

2.2.2. Βλάβες σε Κόμβους Δοκών-Υποστυλωμάτων

Οι βλάβες σε κόμβους δοκών και υποστυλωμάτων ακόμη και όταν βρίσκονται σε πρωταρχικό στάδιο, δηλαδή οι πρώτες ρηγματώσεις, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη από το μηχανικό και να θεωρούνται ιδιαίτερα ανησυχητικές για την κατασκευή. Οι βλάβες αυτής της μορφής υποβαθμίζουν την ακαμψία των φερόντων στοιχείων και οδηγούν σε μη ελεγχόμενες ανακατανομές εντάσεως [10]. Στο Σχήμα 5 παρατηρείται βλάβη σε ακραίο κόμβο (αριστερά) και σε μεσαίο κόμβο (δεξιά).



Σχήμα 5: Βλάβη σε ακραίο κόμβο (αριστερά) και σε μεσαίο κόμβο (δεξιά) [10].

2.2.3. Βλάβες σε Τοιχώματα

Οι βλάβες οι οποίες προκαλούνται από τον σεισμό στα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις (3) τύπους:

- Χιαστί ρωγμές λόγω διάτμησης
- Ολίσθηση στον αρμό διακοπής εργασίας
- Βλάβες καμπτικού χαρακτήρα όπως οι οριζόντιες ρηγματώσεις με σύνθλιψη της θλιβόμενης ζώνης.

Οι πιο συχνά εμφανιζόμενες βλάβες είναι οι ρηγματώσεις στους αρμούς σκυροδετήσεως. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι βλάβες αυτές δεν προκαλούν κατάρρευση της κατασκευής, διότι η οριζόντια διάταξη των ρηγματώσεων δεν αφαιρεί τη δυνατότητα από το τοίχιο να μπορεί να φέρει τα κατακόρυφα φορτία. Ακόμη και από πλευράς ακαμψίας το όλο φέρον σύστημα επηρεάζεται ελάχιστα [10]. Αιτία της βλάβης αυτής είναι η κακή σύνδεση του παλιού με το νέο σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί επιβάλλουν την κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση του αρμού εργασίας. Αυτή περιλαμβάνει αγρίεμα, καθάρισμα και βρέξιμο του παλιού σκυροδέματος, έγχυση ισχυρού τσιμεντοκονιάματος και μετά σκυροδέτηση. Αναπόσπαστο κομμάτι της ένωσης παλιού και νέου σκυροδέματος είναι η τοποθέτηση οπλισμού ραφής στον αρμό διακοπής εργασίας με τη μορφή βλήτρων.

Οι αμέσως συχνότερες βλάβες μετά από τις ρηγματώσεις στους αρμούς είναι οι λοξές ή χιαστί ρωγμές. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ένα τυπικό τοίχωμα που έχει υποστεί διατμητική βλάβη. Είναι μία μορφή διατμητικής αστοχίας ψαθυρού χαρακτήρα. Λόγω του ότι οι ρωγμές είναι χιαστί, η πίεση που ασκούν τα κατακόρυφα φορτία, ωθεί τα δύο ισοσκελή τρίγωνα που δημιουργούνται εκατέρωθεν των ρωγμών, να αποκολληθούν με αποτέλεσμα να οδηγήσουν το τοίχωμα σε κατάρρευση. Για το λόγο αυτό όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί προβλέπουν την ύπαρξη κρυφού υποστυλώματος στο πέρασ του κάθε τοιχώματος, ώστε να παραλαμβάνεται το αξονικό φορτίο μετά τη διατμητική αστοχία.

Οι βλάβες καμπτικού χαρακτήρα εμφανίζονται σπανιότερα και αυτό οφείλεται στη δεσπόζουσα διατμητική λειτουργία των στοιχείων αυτών και στις αυξημένες απαιτήσεις που αυτή συνεπάγεται.



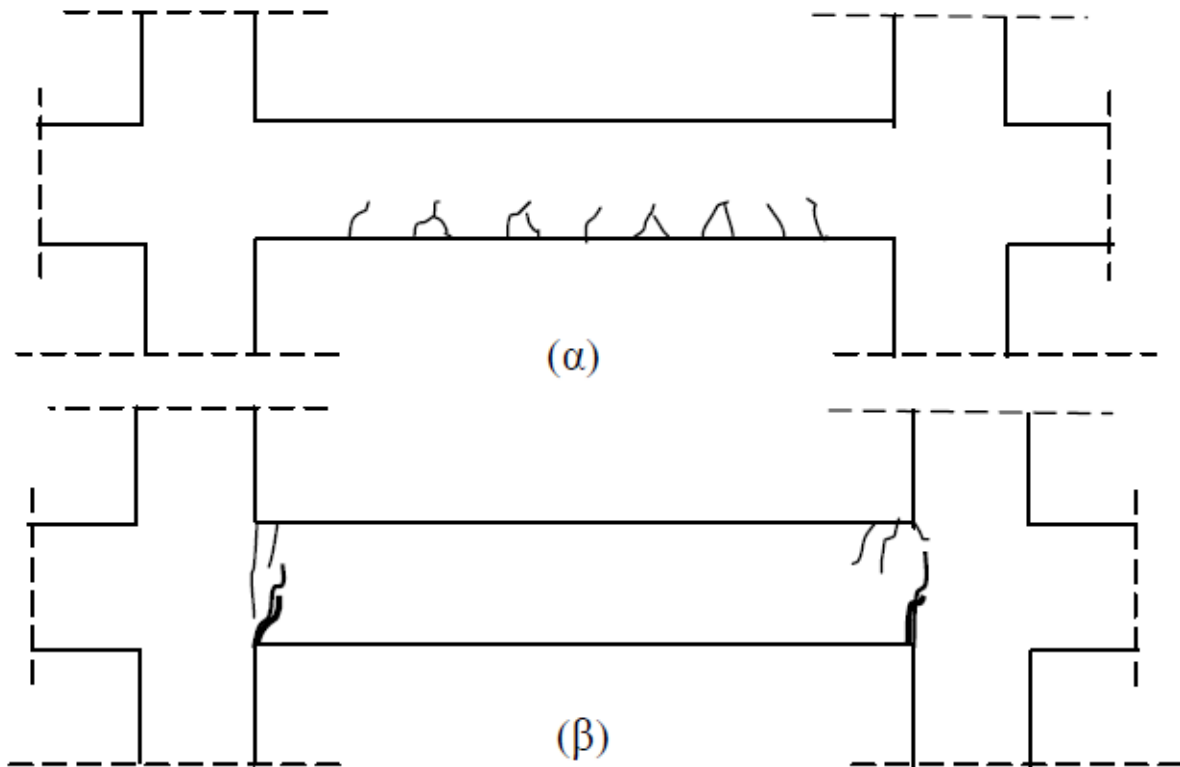
Σχήμα 6: Διατμητική βλάβη τοιχώματος (<http://www.eqclearinghouse.org>).

2.2.4. Βλάβες σε Δοκούς

Οι βλάβες σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι εξίσου συχνές είτε προέρχονται από σεισμό είτε από κατακόρυφα φορτία. Είναι όμως λιγότερο επικίνδυνες σε ότι αφορά την ευστάθεια του φορέα σαν σύνολο, και ως εκ τούτου έπονται σε σπουδαιότητα των βλαβών που παρατηρούνται σε υποστυλώματα.

Μία πολύ συνηθισμένη μορφή βλαβών στις δοκούς είναι η εμφάνιση εγκάρσιων καμπτικών ρωγμών στο κάτω πέλμα, συνήθως μετά από ένα σεισμό. Ανάλογη εικόνα παρουσιάζεται και στην περίπτωση ανεπάρκειας εξαιτίας της δράσης κατακόρυφων φορτίων. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται αρκετές ρωγμές μεγάλου πλάτους στην περιοχή της μέγιστης ροπής κάμψης. Επίσης πολύ πιθανή είναι η εμφάνιση καμπτικών ρωγμών κοντά στις στηρίξεις που όταν εμφανίζονται στο πάνω πέλμα των δοκών οφείλονται σε μακροχρόνιες ή σεισμικές δράσεις, ενώ όταν εμφανίζονται στο κάτω πέλμα οφείλονται συνήθως στην ανεπαρκή αγκύρωση και ολίσθηση του κάτω οπλισμού. Οι πιο σοβαρές βλάβες που μπορούν να εμφανιστούν σε μία δοκό, είναι διατμητικές βλάβες στις περιοχές στήριξης, οι οποίες εμφανίζονται συνήθως μετά από έναν πολύ ισχυρό σεισμό.

Στο Σχήμα 7α παρουσιάζεται μία συνήθης εικόνα δοκού, με εγκάρσιες καμπτικές ρωγμές στο κάτω πέλμα. Αυτός ο τύπος βλάβης είναι ο συχνότερος στα δοκάρια μετά από ένα σεισμό. Το 83% των κατασκευών που παρουσίασαν βλάβες σε δοκούς στο σεισμό της Θεσσαλονίκης του 1978, είχαν βλάβες αυτής της μορφής [13]. Όμως είναι προφανές ότι η μορφή της σεισμικής έντασης δεν δικαιολογεί τέτοιου είδους βλάβες. Τις περισσότερες φορές είναι απλώς η αποκάλυψη προϋπαρχουσών τριχοειδών ρωγμών που έγιναν ορατές αφού διευρύνθηκαν λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.



Σχήμα 7: Καμπτικές βλάβες σε δοκούς (α) καμπτικές ρωγμές στο εφελκόμενο πέλμα, (β) καμπτική αστοχία στο άνω πέλμα και ολίσθηση οπλισμών στο κάτω [3].

Όμως η ίδια εικόνα είναι ένδειξη καμπτικής ανεπάρκειας αν οφείλεται σε δράση κατακόρυφων φορτίων. Στην περίπτωση αυτή συχνά παρατηρούνται αρκετές ρωγμές μεγάλου πλάτους συγκεντρωμένες σε μία περιοχή της δοκού που μπορεί να πιθανολογηθεί ανάπτυξη μέγιστου ροπής κάμψης και είναι ένδειξη διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα [3].

2.2.4.1. Καμπτικές βλάβες

Καμπτικές βλάβες στο πάνω πέλμα των δοκών (Σχήμα 7β) είναι πολύ πιθανόν να εμφανιστούν κοντά στις στηρίξεις από σεισμικές ή από μακροχρόνιες δράσεις. Παρόμοιες εγκάρσιες ρωγμές μπορούν να εμφανιστούν κοντά στις στηρίξεις και στο κάτω πέλμα της δοκού για δύο πιθανούς λόγους. Ο ένας είναι η καμπτική αστοχία της διατομής από διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού στο κάτω πέλμα και μπορεί να συμβεί στην περίπτωση ισχυρής σεισμικής έντασης. Ο δεύτερος λόγος, που είναι συχνότερος, είναι η ανεπαρκής αγκύρωση και η ολίσθηση του οπλισμού κάτω πέλματος. Εμφανίζεται συνήθως με μία ρωγμή μεγάλου πλάτους στην παρειά της στήριξης και μπορεί να συμβεί για κάθε περίπτωση φόρτισης.

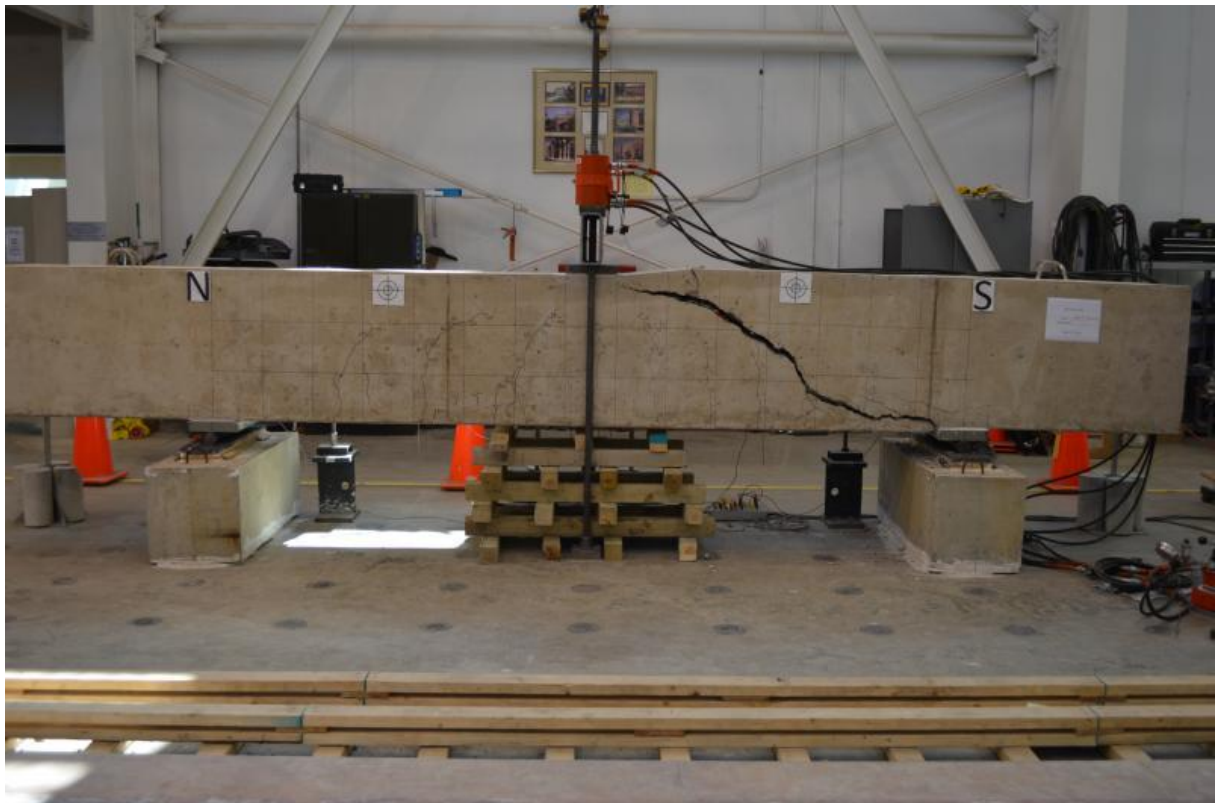
2.2.4.2. Διατμητικές βλάβες

Διατμητικές βλάβες στις περιοχές στήριξης των δοκών (Σχήμα 8) είναι οι σοβαρότερες που μπορούν να παρουσιαστούν σε δοκούς και είναι πολύ συχνές μετά από ένα ισχυρό σεισμό. Είναι ο πιο ανεπιθύμητος τύπος βλάβης λόγω της ψαθυρής μορφής αστοχίας. Για την αποφυγή του προβλέπεται πλέον στους σύγχρονους κανονισμούς ο ικανοτικός σχεδιασμός σε τέμνουσα με βάση τις μέγιστες ροπές που μπορεί να αναπτυχθούν στα άκρα της δοκού.



Σχήμα 8: Διατμητική αστοχία δοκού (<https://www.youtube.com/watch?v=zn3-VM9Eurw>).

Επίσης ένας άλλος τύπος διατμητικής αστοχίας είναι αυτός που παρατηρείται σε περιπτώσεις εφαρμογής συγκεντρωμένων φορτίων όπως π.χ. τα «φυτευτά» υποστυλώματα ή δευτερεύουσες δοκοί (Σχήμα 9) και οφείλεται συχνά σε ανεπαρκή οπλισμό διάτμησης και ανάρτησης [19].



Σχήμα 9: Εικόνα διατμητικής αστοχίας λόγω εφαρμογής συγκεντρωμένων φορτίων (<https://www.pinterest.com/pin/164240717640574621/>).

2.2.5. Βλάβες σε Πλάκες

Οι βλάβες οριζοντίων επιφανειακών στοιχείων μιας κατασκευής όπως είναι οι πλάκες, είναι εν γένει δευτερεύουσας σημασίας αφού σχεδόν πάντα δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του συνολικού φορέα [3]. Επίσης λόγω του μεγάλου βαθμού υπερστατικότητας που έχουν οι ίδιες οι πλάκες δεν αντιμετωπίζουν κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα. Εκτός τούτου, συνήθως δεν υπάρχει κίνδυνος ούτε για την ίδια την πλάκα λόγω του μεγάλου βαθμού υπερστατικότητας της, με εξαίρεση βέβαια τους προβόλους. Εξάλλου, όπως είναι γνωστό, οι πλάκες είναι στοιχεία ουσιαστικά ανεπηρέαστα από σεισμικές δράσεις. Μερικές φορές, μετά από ένα ισχυρό σεισμό, μπορεί να παρατηρηθούν διαμπερείς εγκάρσιες ρωγμές κατ' επέκταση καμπτικών ρηγματώσεων στη παρειά στήριξης των δοκών, σαν αποτέλεσμα της συνεργασίας πλάκας και δοκού [3]. Δικαιολογείται έτσι η κατασκευαστική διευκόλυνση, που προτείνεται από τον ΕΚΩΣ 2000, για τοποθέτηση του 1/4 του απαιτούμενου οπλισμού στήριξης εντός της πλάκας και εκατέρωθεν του κορμού.

Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι τύποι βλαβών είναι οι εξής [10]:

- Ρωγμές παράλληλα ή κάθετα προς τους οπλισμούς σε τυχαίες θέσεις
- Ρωγμές σε κρίσιμες διατομές μεγάλων ανοιγμάτων ή μεγάλων προβόλων κάθετα προς τους κύριους οπλισμούς
- Ρωγμές σε περιοχές ανωμαλιών κατόψεως, όπως στις γωνίες μεγάλων οπών (φωταγωγοί, ανοίγματα εσωτερικών κλιμακοστασίων).
- Ρήγματα σε σημεία συγκεντρώσεως μεγάλων σεισμικών δυνάμεων στις ζώνες συνδέσεως των πλακών με τοιχία ή με υποστυλώματα χωρίς δοκούς.

Ο πρώτος τύπος βλάβης είναι και ο συχνότερος. Οφείλεται στη διεύρυνση των τριχοειδών ρηγμάτων που υπήρχαν στο σκυρόδεμα από την καμπτική λειτουργία ή από τις θερμοκρασιακές μεταβολές που εμφανίστηκαν από το σεισμό. Σπανιότερα οφείλεται σε καθιζήσεις στύλων.

Ο δεύτερος και τρίτος τύπος βλάβης προκαλείται συνήθως από την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης.

Ο τέταρτος τύπος βλάβης είναι απόρροια της αστοχίας διατρήσεως που επιτείνεται από την καμπτική καταπόνηση λόγω σεισμού.

Μία σοβαρότερη μορφή βλάβης που οφείλεται σε καθιζήσεις υποστυλωμάτων συνοδεύεται συνήθως και από βλάβες των γειτονικών δοκών και ρηγματώσεις των τοιχοπληρώσεων. Η εικόνα που συχνά παρουσιάζεται μετά από έναν ισχυρό σεισμό με αρκετό πλήθος ρηγματώσεων σε τυχαίες θέσεις δεν είναι ανησυχητική. Συχνά οφείλεται σε προϋπάρχουσες τριχοειδείς ρηγματώσεις που αποκαλύφθηκαν αφού διευρύνθηκαν λόγω της κατακόρυφης σεισμικής έντασης.

Όμως χρειάζεται περισσότερη προσοχή αν παρόμοια εικόνα βλάβης οφείλεται σε μακροχρόνιες δράσεις δηλαδή σε μόνιμα και κινητά φορτία, και οι βλάβες εντοπίζονται σε περιοχές μεγίστων ροπών οπότε πιθανολογείται καμπτική ανεπάρκεια. Οι ρωγμές που πολλές φορές παρατηρούνται σε προβόλους με διεύθυνση παράλληλη προς τους κύριους οπλισμούς, προφανώς δεν είναι ανησυχητικές. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι οι πρόβολοι λόγω έλλειψης υπερστατικότητας, είναι τα πλέον κρίσιμα επιφανειακά στοιχεία [3]. Έτσι, χρειάζονται

ιδιαίτερη προσοχή οι τυχόν ρηγματώσεις με διεύθυνση κάθετη προς τον κύριο οπλισμό, που θα εμφανιστούν στο πάνω πέλμα, στην παρειά στήριξης του προβόλου με τη δοκό (Σχήμα 10).

Οι ρηγματώσεις αυτές συχνά οφείλονται στο μειωμένο στατικό ύψος που δημιουργείται αθέλητα μετά από την τοποθέτηση του οπλισμού και πριν από τη σκυροδέτηση. Μερικές φορές οι ρηγματώσεις αυτές επεκτείνονται μόνο στην επικάλυψη του σκυροδέματος που λόγω του μειωμένου στατικού ύψους είναι σημαντικού πάχους και έτσι γίνονται ορατές. Στη φάση αυτή δεν υπάρχει βλάβη και ο μηχανικός θα πρέπει να προσδιορίσει την υφιστάμενη αντοχή του προβόλου εκτιμώντας το πραγματικό στατικό ύψος και να λάβει μέτρα ενίσχυσης στην υποθετική περίπτωση που θα προκύψει ανεπάρκεια. Αν όμως το βάθος των ρωγμών είναι μεγαλύτερο από το πάχος της επικάλυψης τότε πιθανολογείται διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και απαιτούνται άμεσα μέτρα επέμβασης.



Σχήμα 10: Βλάβες σε πλάκες χώρου στάθμευσης. Η πλάκα ξεκόλλησε από το περιβάλλον πλαίσιο. Σεισμός του Northridge, 1994 (<https://eclass.teicrete.gr/modules/document/>).

2.3. Τεχνικές επισκευής και ενίσχυσης στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος

Γενικά επισκευή των δομικών στοιχείων, αφορά τη διαδικασία επέμβασης με την οποία αποκαθίστανται τα αρχικά χαρακτηριστικά ενός στοιχείου που έχει υποστεί βλάβη ή φθορά. Η επισκευή των δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα ανάλογα με το βαθμό βλάβης μπορεί να γίνει είτε με χρήση επισκευαστικών κονιαμάτων ή της τεχνικής των ρητινεδέσεων, όταν οι βλάβες είναι ελαφρές, είτε με την τεχνική της αποκατάστασης ίσης διατομής όταν πρόκειται για βαριές βλάβες.

Οι τεχνικές ενίσχυσης των δοκών στοχεύουν σε [3]:

- Αύξηση της καμπτικής αντοχής
- Αύξηση της διατμητικής αντοχής ή
- Και στα δύο.

Δύο είναι οι πλέον διαδεδομένοι τρόποι καμπτικής ενίσχυσης των δοκών. Ο πρώτος είναι η εφαρμογή επικολλητών μεταλλικών ελασμάτων ή επικολλητών φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή και ο δεύτερος είναι η προσθήκη νέων στρώσεων σκυροδέματος οπλισμένου ή μη. Η χρήση των επικολλητών φύλλων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή ως εξωτερικού οπλισμού στο εφελκόμενο πέλμα δοκών, είναι μία τεχνική με την οποία επιτυγχάνεται αύξηση της καμπτικής αντοχής και της καμπτικής ακαμψίας και μείωση των παραμορφώσεων και της αναμενόμενης ρηγμάτωσης των στοιχείων που ενισχύονται με αυτή τη μέθοδο. Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ταχύτητα της εφαρμογής και το χαμηλό κόστος, Η πρόωρη αστοχία των άκρων με απόσχιση στη γειτονική προς το έλασμα περιοχή του σκυροδέματος και η ευαισθησία διάβρωσής τους στη περίπτωση χρήσης χάλυβα είναι τα βασικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Η καμπτική ενίσχυση δοκών με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος, είναι μία τεχνική που εφαρμόζεται συνήθως για ενίσχυση των δοκών στο εφελκόμενο πέλμα και σπανιότερα για ενίσχυση στο θλιβόμενο. Η ενίσχυση στο εφελκόμενο πέλμα γίνεται πάντα με χρήση οπλισμών που καλύπτονται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ η ενίσχυση στο θλιβόμενο γίνεται με οπλισμούς ή χωρίς οπλισμούς χρησιμοποιώντας είτε εκτοξευόμενο είτε έγχυτο σκυρόδεμα. Η σύνδεση παλιού και νέου στοιχείου γίνεται είτε με εκτράχυνση της διεπιφάνειας, είτε συνηθέστερα με χρήση χαλύβδινων βλήτρων.

Είναι σαφές ότι όλες σχεδόν οι τεχνικές επεμβάσεων όταν αναφέρονται σε κόμβους παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες εφαρμογής σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος παρουσία πλακών και δοκών που συντρέχουν στον κόμβο από κάθε κατεύθυνση. Από τις τεχνικές επισκευής στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά τους τελευταίους σεισμούς οι κυριότερες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω [2]:

- Οι επεμβάσεις με χρήση ρητινενέσεων και ρητινοκονιαμάτων για στοιχεία με μικρές ή μέτριας έντασης βλάβες.
- Η τοποθέτηση μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα στις κρίσιμες περιοχές των στοιχείων που ενώνονται στον κόμβο.
- Χιαστί προεντεταμένα κολλάρα.
- Η τεχνική της καμπούρας.
- Επικόλληση και τοποθέτηση χαλύβδινων ελασμάτων.
- Περίσφιξη κόμβου.
- Τοπική ενίσχυση με μερική καθαίρεση και αποκατάσταση.

2.3.1. Ρητινενέσεις

Η τεχνική της επισκευής με τη χρήση ρητινών περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους [2].

Αρχικά γίνεται επιφανειακή σφράγιση των αρμών των ρωγμών με θιξοτροπικό εποξειδικό υλικό (παστά) ώστε να εμποδίζεται η διαρροή προς τα έξω του λεπτόρρευστου ενέματος που θα ακολουθήσει. Πρακτικά, τίθεται μια στρώση από παχύρρευστη εποξειδική

ρητίνη γύρω από όλη την περιοχή του συστήματος ρωγμών. Σε αυτή τη φάση τοποθετούνται και ειδικά ακροφύσια σε διάφορες θέσεις επί των αρμών των ρωγμών για να είναι δυνατή η εισαγωγή του ενέματος και η εξαγωγή του εγκλωβισμένου αέρα κατά τις ρητινενέσεις.

Έπειτα ακολουθούν ρητινενέσεις υπό πίεση με λεπτόρρευστες εποξειδικές ρητίνες ειδικού τύπου. Οι ρητίνες εισάγονται με τη χρήση των ακροφυσίων που τοποθετήθηκαν κατά τη φάση της επιφανειακής σφράγισης των ρωγμών. Οι ρητίνες είναι λεπτόρρευστες για να είναι δυνατή η εισαγωγή τους σε πολύ μικρού εύρους ρωγμών (μέχρι 0.1 mm). Η εισαγωγή γίνεται με ισχυρή πίεση ώστε η ρητίνη να γεμίσει όλο τον κενό χώρο των εσωτερικών ρωγμών της μάζας του σκυροδέματος, εκδιώκοντας ταυτόχρονα τον υπάρχοντα εγκλωβισμένο αέρα.

Η επισκευή με τη χρήση ρητινών έχει σε σχέση με τις άλλες τεχνικές το βασικό πλεονέκτημα ότι με αυτή διατηρούνται οι παλαιές διαστάσεις των στοιχείων και έτσι η εφαρμογή της είναι πιο εύκολη σε πραγματικές κατασκευές. Έπειτα από πειραματική έρευνα και σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμών κατά την αρχική φόρτιση με τη συμπεριφορά κατά τη φόρτιση μετά την επισκευή έχει παρατηρηθεί ότι [2]:

- Η τεχνική που εφαρμόστηκε για την επισκευή των δοκιμών δεν μεταβάλλει σημαντικά τον χαρακτήρα του τύπου αστοχίας του δοκιμίου ο οποίος εξαρτάται κυρίως από το διατμητικό οπλισμό της περιοχής του κόμβου.
- Τα επισκευασμένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές μέγιστου φορτίου και υψηλότερες τιμές δυσκαμψίας κατά τους κύκλους φόρτισης. Ακόμη τα επισκευασμένα δοκίμια φαίνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις αντέχουν περισσότερους πλήρεις κύκλους φόρτισης χωρίς σημαντική πτώση του μέγιστου φορτίου.

2.3.2. Μανδύες

Η τεχνική της κατασκευής μανδύων σε κυρίως υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητάς τους. Συνήθως εφαρμόζεται σε περιπτώσεις υποστυλωμάτων με σοβαρές βλάβες ή γενικότερα όταν διαπιστώνεται ιδιαίτερη ανεπάρκεια της αντοχής τους ή άλλων χαρακτηριστικών τους. Η τεχνική περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής του υποστυλώματος με νέο σκυρόδεμα και νέους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς περιμετρικά και μπορεί να εκτείνεται είτε σε όλο το μήκος του υποστυλώματος (ολικός μανδύας) είτε σε ένα μόνο τμήμα του (τοπικός μανδύας). Η τυπική μορφή ενός μανδύα σε υποστυλώμα πριν τη σκυροδέτηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 11. Ακόμη ο μανδύας μπορεί να περιβάλλει ολόκληρη τη διατομή (κλειστός μανδύας) ή τμήμα αυτής (ανοιχτός μανδύας) σε περιπτώσεις υποστυλωμάτων ευρισκόμενα στα όρια με άλλη οικοδομή.

Πρόκειται για τεχνική δύσκολη δοθέντος ότι προϋποθέτει τις πιο πολλές φορές μανδύες σε όλα τα δομικά στοιχεία που συντρέχουν στον κόμβο. Είναι αυτονόητο ότι απαιτούνται εκτράχυνση επιφανειών, διατρήσεως στις πλάκες προς διέλευση των συνδετήρων καθώς και προηγούμενη συγκόλληση με ρητίνες ή με μη συρρικνούμενα κονιάματα της βλαβείσας περιοχής του κόμβου.



Σχήμα 11: Ενίσχυση υφιστάμενης οικίας με μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος (<https://thedesignteam.eu/projects/enisxisi-ifistamenis-oikias>)

2.3.2.1. Είδη μανδυών

Τα είδη των μανδυών που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση υποστυλωμάτων είναι τα εξής [6]:

- Ø Μανδύες από έγχυτο σκυρόδεμα. Έγχυτο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται όταν ο μανδύας που πρόκειται να κατασκευαστεί έχει πάχος μεγαλύτερο από 8 cm. Για τη σκυροδέτηση του μανδύα απαιτείται η χρήση ξυλότυπου.
- Ø Μανδύες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η κατασκευή μανδύα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί τη συνηθέστερη πρακτική για την περίπτωση που το συνολικό πάχος του μανδύα δεν υπερβαίνει τα 10 cm. Αν και δεν απαιτείται ξυλότυπος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην εξασφάλιση της κατακόρυφης επιφάνειας του μανδύα. Για το σκοπό αυτό γίνεται συνήθως χρήση οδηγών. Το μεγαλύτερο πρόβλημα αυτών των μανδυών είναι ότι η συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη έναντι των άλλων.

- Ø Μανδύες από σκυροτσιμεντόπηγμα. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτού του είδους των μανδύων είναι η εύκολη σκυροδέτηση ακόμα και παρουσία πυκνού διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού. Η διαδικασία εφαρμογής του σκυροτσιμεντοπήγματος περιλαμβάνει την τοποθέτηση αδρανών σε καλούπια και στη συνέχεια την πλήρωση των μεταξύ τους κενών με υγροποιημένο τσιμέντο υπό πίεση. Η συστολή ξηράνσεως μειώνεται στο ελάχιστο. Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής δεν είναι διαδεδομένη στη χώρα μας.
- Ø Μανδύες από ειδικά σκυροδέματα ή τσιμεντοκονιάματα. Με τη χρησιμοποίηση ειδικών σκυροδεμάτων ή τσιμεντοκονιαμάτων είναι δυνατόν να υλοποιηθούν μανδύες εξαιρετικά μικρού πάχους. Το βασικό μειονέκτημα είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής τους.

2.3.2.2. Διαδικασία κατασκευής μανδύων

Η σειρά συνήθως που απαιτείται για την κατασκευή μανδύων (κλειστών) οπλισμένου σκυροδέματος είναι η παρακάτω [6]:

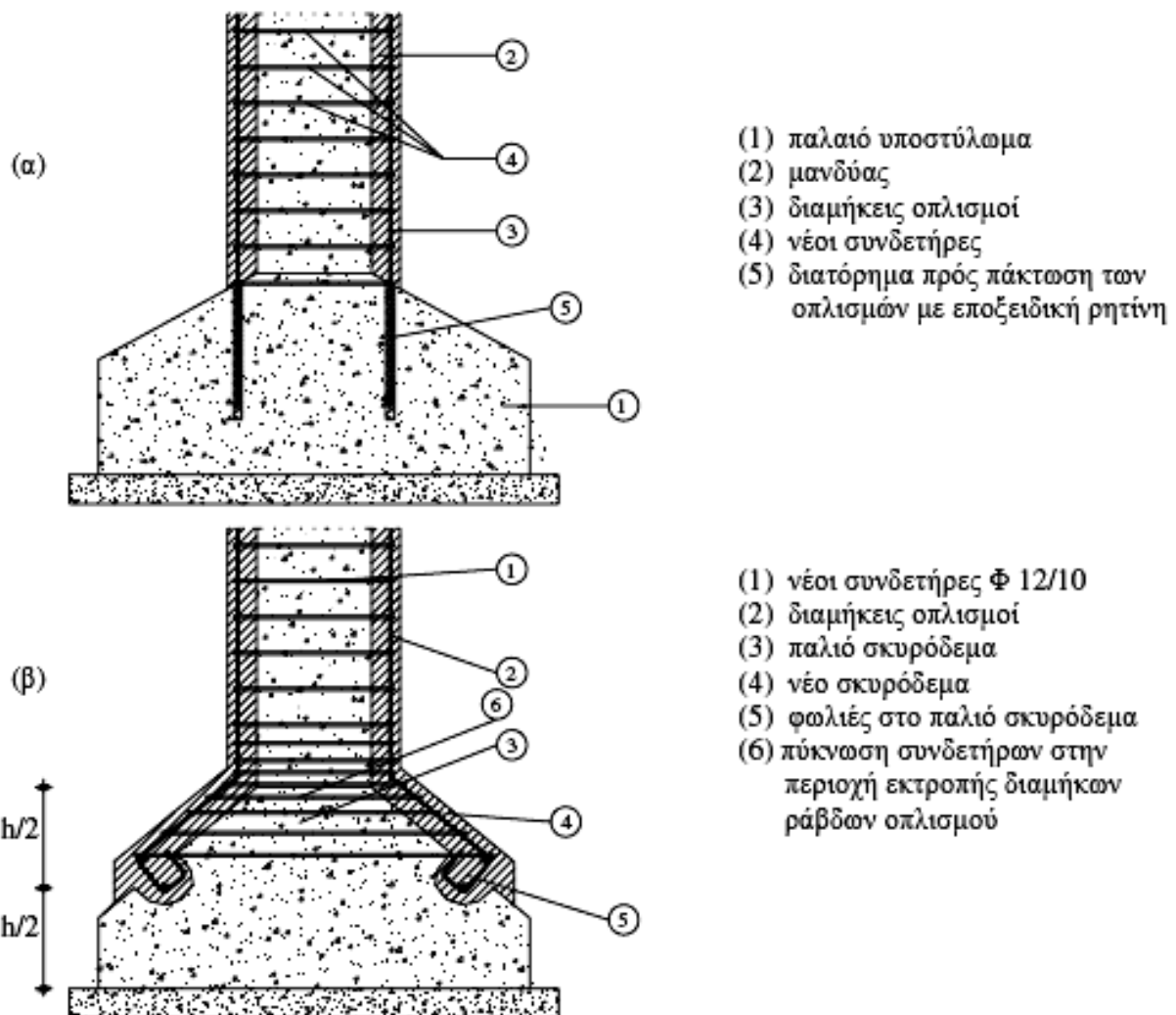
- Ø Στην αρχή αποφορτίζονται και υποστύλωνονται οι πλάκες και οι δοκοί που συντρέχουν στο προς ενίσχυση υποστύλωμα.
- Ø Έπειτα απομακρύνεται το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα και αποκαθίσταται η συνέχεια του υποστύλωματος επισκευάζοντας προϋπάρχουσες τοπικές βλάβες εάν υπάρχουν (π.χ. λυγισμένες ράβδοι οπλισμού).
- Ø Αποκαλύπτονται οι οπλισμοί σε θέσεις που έχουν προεπιλεγεί για συγκόλληση με νέους οπλισμούς (εφόσον προβλέπεται).
- Ø Διανοίγονται και προετοιμάζονται οι κατάλληλες οπές στις θέσεις αγκύρωσης των νέων ράβδων οπλισμού και στις θέσεις που τυχόν προβλέπονται βλήτρα.
- Ø Εκτραχύνεται καλά η επιφάνεια του σκυροδέματος με επιμέλεια σε βάθος 6 mm με κατάλληλο μηχανικό εξοπλισμό (π.χ. με «ματσακόνι» όχι απλώς με σφυρί και καλέμι), ή ακόμη καλύτερα με υδροαμμοβολή, έτσι ώστε να απομακρυνθεί η εξωτερική επιδερμική στρώση τσιμεντοπολτού και να αποκαλυφθούν τα αδρανή.
- Ø Καθαρίζεται επιμελώς η επιφάνεια του υποστύλωματος χρησιμοποιώντας αέρα υπό πίεση.
- Ø Αγκυρώνονται στα άκρα τους οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού με χημική πάκτωση με τη χρήση κόλλας (Σχήμα 12α).

Για κατασκευαστική ευκολία είναι δυνατόν να μην αγκυρωθούν απευθείας οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού, αλλά να προηγηθεί η αγκύρωση μικρότερων τμημάτων ράβδων οπλισμού επί των οποίων στην συνέχεια θα «ματιστούν» οι νέες ράβδοι. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί και με την αγκύρωση των ράβδων οπλισμού στα στοιχεία θεμελίωσης. Στο Σχήμα 12β παρουσιάζεται εξ' άλλου μία εναλλακτική διαδικασία που έχει προταθεί για την περίπτωση που η θεμελίωση είναι με πέδιλα.

Προβλέπεται η συνέχεια του μανδύα γύρω από τον κώνο του πεδύλου σε μήκος τουλάχιστον ίσο προς το μισό του ύψους του, με διάταξη πυκνών κλειστών συνδετήρων σ' αυτή τη περιοχή της τάξεως Φ12/100 mm, και απόληξη του μανδύα σε μία περιμετρική «φωλιά» που έχει δημιουργηθεί στο πέδιλο. Εάν ο διαμήκης οπλισμός του μανδύα είναι αρκετός (π.χ. περισσότερος από 4 ράβδοι) είναι προτιμότερο να γίνει μια μικτή εφαρμογή των δύο παραπάνω διαδικασιών. Στην περίπτωση που απαιτείται συγχρόνως και ενίσχυση των

στοιχείων θεμελίωσης, η τεχνική προσαρμόζεται έτσι ώστε το θέμα να αντιμετωπιστεί συνολικά [6].

- Ø Αγκυρώνονται τα μηχανικά ή χημικά βλήτρα (εφόσον και όπου προβλέπονται).
- Ø Τοποθετούνται και ηλεκτροσυγκολλούνται τα χαλύβδινα παρεμβλήματα σύνδεσης παλαιών και νέων οπλισμών (αναρτήρες), εφόσον προβλέπονται συγκολλήσεις.
- Ø Τοποθετούνται νέοι συνδετήρες.
- Ø Γίνεται ο τελικός καθαρισμός των επιφανειών με αέρα και νερό υπό πίεση.
- Ø Διαβρέχεται η επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος τουλάχιστον 6 ώρες πριν την σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος. Η διαβροχή πρέπει να γίνεται και στον ξυλότυπο (εφόσον υπάρχει) και στα αδρανή για την περίπτωση του σκυροτσιμεντοπήγματος.
- Ø Σκυροδετείται ο μανδύας και ακολουθούν τα μέτρα συντήρησης σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.



Σχήμα 12: Αγκύρωση διαμήκων οπλισμών στα πέδιλα των υποστυλωμάτων [6].

2.3.3. Χιαστί προεντεταμένα κολλάρα

Η τεχνική εφαρμόζεται για την ενίσχυση κόμβων. Βασική προϋπόθεση της τεχνικής αυτής είναι η πλήρωση των ρωγμών με ρητινενέσεις ή αφού αφαιρεθεί το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα και συμπληρωθεί με εποξειδικό κονίαμα ή με μη συρικνούμενο ο κόμβος ενισχύεται με εξωτερικούς χιαστί συνδετήρες (κόλλαρα) οι οποίοι προεντείνονται με αρμοκλείδες. Ακολουθεί επένδυση του κόμβου με πλέγμα και μανδύας από εκτοξευμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 13). Στην περίπτωση όπου στον κόμβο συντρέχουν τέσσερις δοκοί τότε είναι προφανές ότι η παραπάνω διαδικασία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί λόγω αδυναμίας διελεύσεως των χιαστί κολλάρων.



Σχήμα 13: Προσθήκη χιαστί κολλάρων από χαλύβδινα στοιχεία (Στέφανος Δρίτσος, Επεμβάσεις και ενισχύσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, 2009).

2.3.4. Τεχνική της καμπούρας

Πρόκειται επίσης για τεχνική που αφορά την ενίσχυση κόμβων σε κατασκευές Οπλισμένου σκυροδέματος. Η επέμβαση υλοποιείται με επέκταση της δοκού ή του

υποστυλώματος ή και των δυο. Ακολουθεί η κατασκευή από έγχυτο ή εκτοξευμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με τα προηγούμενα στον οποίο μπορεί να ενσωματωθεί η «καμπούρα». Σ' αυτή την περίπτωση απαιτείται [2]:

- Έγχυτο σκυρόδεμα ποιότητας τουλάχιστον B300 και πάχους $a = 20$ cm περίπου.
- Αποκάλυψη αγκυρώσεων παλαιών ράβδων οπλισμού και ηλεκτροσυγκόλληση νέων ράβδων που συσφίγγονται στην εξωτερική παρειά της "καμπούρας".
- Διάταξη πυκνών συνδετήρων (min $\Phi 8/5$).

Οι συσφίξεις των νέων ράβδων ακυρώσεως μένουν ακάλυπτες, εάν ελαιοβαφούν ή καλύπτονται με τον μανδύα του κόμβου.

2.3.5. Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή

Η ανεπάρκεια του εφελκόμενου οπλισμού σε ένα υφιστάμενο δομικό στοιχείο Ο.Σ. μπορεί να αντιμετωπιστεί με επικόλληση ελασμάτων από χάλυβα ή ινοπλισμένων πολυμερών (σε μορφή ελάσματος ή επιτόπου εμποτισμένου υφάσματος).

Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε πλάκες και δοκούς, σπανίως δε σε υποστυλώματα ή τοιχώματα. Τα ελάσματα ή τα υφάσματα επικολλώνται στο εφελκόμενο πέλμα με χρήση ρητίνης. Στην περίπτωση των χαλύβδινων ελασμάτων χρησιμοποιούνται και βλήτρα σύνδεσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ινοπλισμένα πολυμερή επιτρέπεται η χρήση ειδικών αγκυρίων-βλήτρων, υπό την προϋπόθεση ότι η αποτελεσματικότητά των είναι επαρκώς τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία και βεβαιώνεται με αξιόπιστες πειραματικές δοκιμές. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι μέσω αυτής της τεχνικής, εκτός από την αύξηση της καμπτικής αντίστασης του στοιχείου, επιφέρεται αύξηση της δυσκαμψίας και περιορισμός των παραμορφώσεων και της ρηγμάτωσης, καθώς και μείωση της πλαστιμότητας.

Πάντως η εφαρμογή της τεχνικής, προϋποθέτει ότι το στοιχείο, χωρίς τον οπλισμό ενίσχυσης, μπορεί να φέρει ασφαλώς το συνδυασμό των οιονεί-μονίμων φορτίων ($G+\psi_2Q$). Με αυτό τον τρόπο τηρείται ένα ελάχιστο προϋποθέσεων για να μην αστοχήσει το στοιχείο στην περίπτωση μιας απρόβλεπτης έντονης δράσης (π.χ. πυρκαγιάς), που θα μπορούσε να καταστρέψει την ενίσχυση.

Όταν εφαρμόζονται σε κόμβους, όπως και με τα χιαστί κόλλαρα, τα επικολλούμενα ελάσματα μπορούν να εφαρμοσθούν μόνο σε επίπεδους κόμβους. Προηγείται τοπική ενίσχυση και ακολουθεί η επικόλληση των ελασμάτων και στη συνέχεια και στη συνέχεια η σύσφιξη τους με προεντεταμένους κοχλίες [2]. Το πάχος των ελασμάτων στην περίπτωση αυτή προβλέπεται τουλάχιστον 4.0 mm, κάτι που δεν δημιουργεί πρόβλημα στην επικόλληση με τους προεντεταμένους κοχλίες. Η επιτυχία στη χρήση των μεταλλικών ελασμάτων οφείλεται στο χαμηλό κόστος των υλικών και μηχανημάτων καθώς και του εργατικού κόστους.

Η κυριότερη αδυναμία της τεχνικής βρίσκεται στην περιοχή αγκύρωσης των άκρων των φύλλων. Η πρόωρη αστοχία των άκρων με απόσχιση στη γειτονική προς το έλασμα περιοχή σκυροδέματος και η ευαισθησία διάβρωσής τους στην περίπτωση χρήσης χάλυβα είναι τα

βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου που οφείλονται στην υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή.

Η διαδικασία ανάλυσης και διαστασιολόγησης δομικών στοιχείων ενισχυμένων με επικολλητά ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή βασίζεται στις αρχές για τη μελέτη στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω δύο βασικά σημεία [3]:

- Ø Στην κατάσταση οριακής φέρουσας ικανότητας ο οπλισμός ενίσχυσης (σύνθετων υλικών) δεν «διαρρέει» όπως ο χάλυβας, αλλά παραμορφώνεται ελαστικά. Η παραμόρφωση αυτή εξαρτάται βασικά από την ικανότητα του σκυροδέματος (δηλαδή του 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.
- Ø Ο «δεσμός» σύνθετων υλικών-σκυροδέματος μπορεί να αστοχήσει πρόωρα, δηλαδή πριν εξαντληθεί η καμπτική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου.

Η ποσότητα του προστιθέμενου υλικού ενισχύσεως συνιστάται να επιλέγεται έτσι ώστε στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ο υφιστάμενος εφελκυσόμενος οπλισμός να αναπτύσσει παραμόρφωση τουλάχιστον ίση με την παραμόρφωση διαρροής τους, χωρίς αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος. Έτσι, αποφεύγεται η τοποθέτηση υπερβολικά μεγάλης ποσότητας υλικού ενίσχυσης, η οποία θα οδηγούσε σε πρόωρη ψαθυρή αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.



Σχήμα 14: Ενίσχυση δοκών και κόμβου με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα (http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/?page_id=1043).

2.3.6. Περίσφιξη και επιρροή της στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Η δράση των σύνθετων υλικών κατά την περίσφιξη 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 (περίσφιξης) κάθετα στον άξονα του μέλους, μέχρις ότου αστοχήσει. Οι τάσεις περίσφιξης έχουν ως αποτέλεσμα [15]:

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμορφωσιμότητας (δηλαδή της οριακής παραμόρφωσης) του σκυροδέματος.
- Αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας.
- Βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμηκών ράβδων στις περιοχές αυτές.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμηκών ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων.

2.3.6.1. Περιπτώσεις ανάγκης περίσφιξης

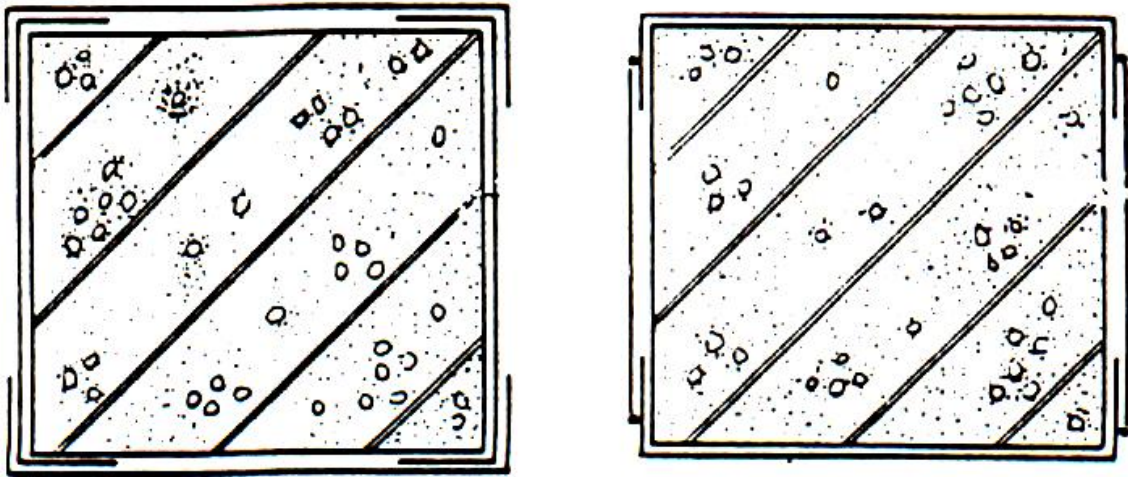
Η ενίσχυση των υποστυλωμάτων με εξωτερική περίσφιξη προσφέρεται στις παρακάτω περιπτώσεις :

- Όταν απαιτείται αύξηση της πλαστιμότητας του υποστυλώματος.
- Όταν απαιτείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.
- Όταν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας των κατακόρυφων οπλισμών του υποστυλώματος στην περιοχή υπερκάλυψής τους.
- Όταν απαιτείται αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος.
- Όταν απαιτείται η μεταφορά ενός τμήματος των κατακόρυφων φορτίων του υποστυλώματος, η τεχνική συνδυάζεται με την εφαρμογή εξωτερικής σιδηροκατασκευής.

2.3.6.2. Διαδικασίες επιβολής της περίσφιξης

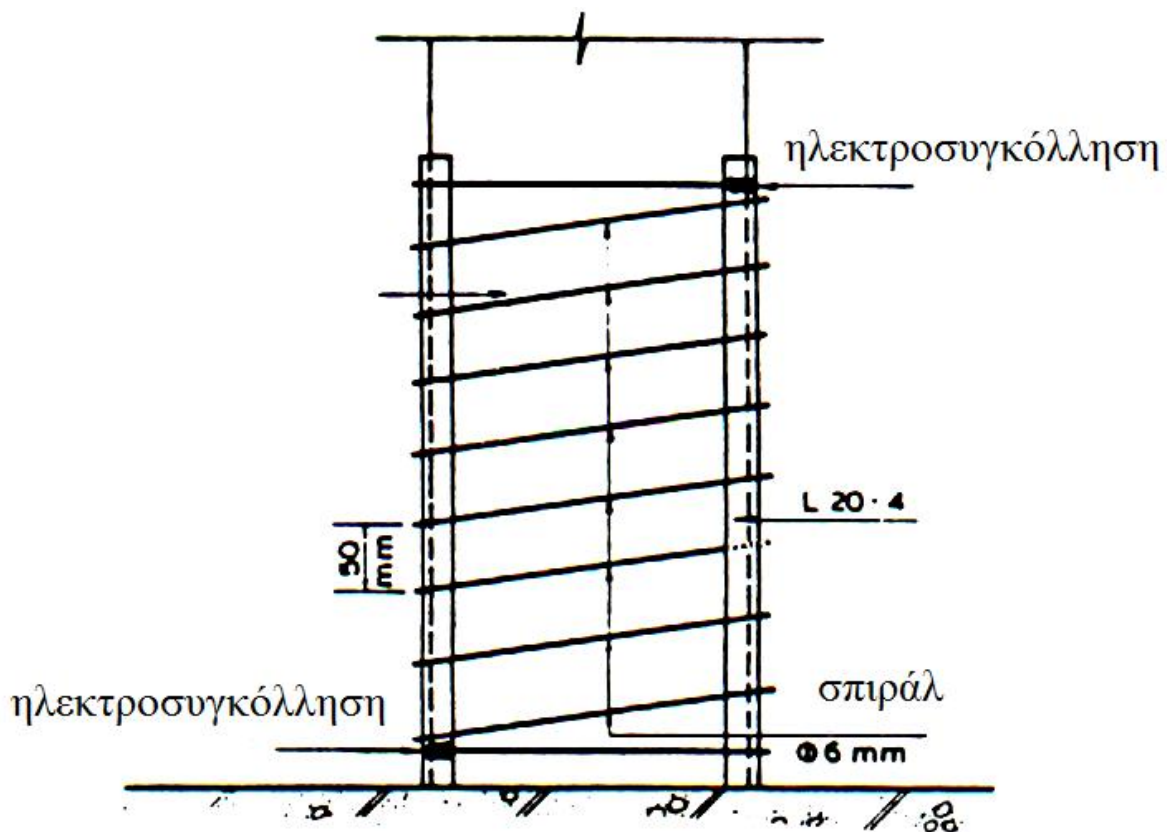
Η επιβολή εξωτερικής περίσφιξης σε υποστυλώματα μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους [3]:

- Με χρήση επικολλητών κολάρων που μπορεί να είναι μεταλλικά ελάσματα συνήθους πάχους 1-2 mm (Σχήμα 15) ή λωρίδες από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs).



Σχήμα 15: Περίσφιγξη με μεταλλικά επικολλητά ελάσματα [3].

- Με χρήση προεντεταμένων κολάρων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs), που μπορεί να έχουν τη μορφή ταινιών «πακεταρίσματος» [21].
- Με χρήση σπειροειδούς οπλισμού (Σχήμα 16) που μπορεί να είναι από μεταλλικό έλασμα ή από ινοπλισμένο πολυμερές (FRP).
- Με χρήση ολόσωμου μανδύα από ελάσματα χάλυβα ή ινοπλισμένο πολυμερές (FRP), επικολλητού επί των πλευρών του υποστυλώματος. Σήμερα, στην πράξη έχει αρχίσει να επεκτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής με χρήση φύλλων FRPs.



Σχήμα 16: Περίσφιγξη με σπειροειδή οπλισμό [3].

Στην περίπτωση των μεταλλικών μανδύων η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί τοποθετώντας τα χαλύβδινα φύλλα σε μικρή απόσταση από τις παρειές του υποστυλώματος και στην συνέχεια το κενό γεμίζεται με μη-συρρικνούμενο κονίαμα. Η τεχνική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν ο μεταλλικός μανδύας έχει ελλειπτική ή κυκλική μορφή.

- Με χρήση μεταλλικού κλωβού που δημιουργείται με κατακόρυφα γωνιακά ελάσματα και είτε οριζόντια μεταλλικά κολάρα είτε πλήρη χαλύβδινα φύλλα.

2.3.6.3. Υλικά Περίσφιγξης - Μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή

Οι μανδύες με ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs) αποτελούν ίσως τον πλέον εύχρηστο τρόπο επιβολής της περίσφιγξης. Αυτός είναι στην πραγματικότητα ο κύριος λόγος για τον οποίο η εφαρμογή αυτής της τεχνικής εξαπλώνεται ραγδαία στην πράξη.

Τα φύλλα εφαρμόζονται με τις ίνες τους σε οριζόντια διεύθυνση συμβάλλοντας έτσι ιδιαίτερα στον εγκιβωτισμό του στοιχείου και στην αύξηση της διατμητικής του αντοχής. Εάν αυτοί μόνο είναι οι λόγοι της ενίσχυσης, τα φύλλα μπορούν να αντικατασταθούν από οριζόντιες λωρίδες («κολάρα»). Αυτή η εναλλακτική τεχνική έχει μεν οικονομία υλικού, αλλά απαιτεί περισσότερα «εργατικά» και γι' αυτό η επιλογή θα πρέπει να εξαρτηθεί από την εκτίμηση του συνολικού κόστους.

Εάν συγχρόνως επιδιώκεται και η αύξηση της καμπτικής αντοχής του στοιχείου, θα πρέπει προφανώς να χρησιμοποιηθούν και φύλλα με κατακόρυφη διεύθυνση ινών. Όμως, σ' αυτή την περίπτωση η τεχνική θα πρέπει να συνδυαστεί με ανάλογη εφαρμογή ενίσχυσης του κόμβου (δοκών-υποστυλωμάτων) επειδή τα άκρα του υποστυλώματος βρίσκονται σε περιοχές με αυξημένη καμπτική ένταση.

Η εφαρμογή της τεχνικής είναι απλούστερη και περισσότερο αποδοτική στα κυκλικά υποστυλώματα. Στα ορθογωνικά υποστυλώματα απαιτείται προηγουμένως κατάλληλη εξομάλυνση των γωνιών, έτσι ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα τουλάχιστον 30 mm. Η αποδοτικότητα της τεχνικής μπορεί να αυξηθεί, εάν η εφαρμογή των φύλλων (ή των λωρίδων) γίνει με προένταση. Όμως, στην περίπτωση αυτή οι τεχνικές δυσκολίες του εγχειρήματος είναι αυξημένες και γι' αυτό η εφαρμογή της θα πρέπει να εξετάζεται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

2.3.7. Τεχνικές Περίσφιγξης - Τεχνική του μεταλλικού κλωβού

Η τεχνική του μεταλλικού κλωβού είναι μία διαδεδομένη διαδικασία επιβολής της περίσφιγξης η οποία περιγράφεται αναλυτικά στη βιβλιογραφία [3]. Τέσσερα μεταλλικά γωνιακά ελάσματα, προσαρμόζονται στις γωνίες του υποστυλώματος και οριζόντια μεταλλικά ελάσματα (ή ράβδοι από δομικό χάλυβα) υπό μορφή «κολάρων», συγκολλούνται πάνω στα γωνιακά. Πριν γίνει η συγκόλληση προηγείται σύσφιγξη των γωνιακών με ειδικά κλειδιά ή γίνεται προθέρμανση του οριζόντιου οπλισμού σε θερμοκρασία 200-400° C, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ενεργή περίσφιγξη με τη συστολή που επέρχεται όταν γίνει απόψυξη. Εναλλακτικά αντί για συγκόλληση μπορεί να χρησιμοποιηθούν «βίδες» ή «ντίζες».

Τα κενά που δημιουργούνται στην επαφή του μεταλλικού κλωβού και του σκυροδέματος, συμπληρώνονται με ένα μη-συρρικνούμενο κονίαμα ή εποξειδική κόλλα. Η τελική επιφάνεια μπορεί να δημιουργηθεί με μία ισχυρή τσιμεντοκονία οπλισμένη με ένα

ελαφρύ πλέγμα ενώ δεν είναι απαραίτητη η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στις περιπτώσεις που το ύψος του υποστυλώματος είναι σχετικά μικρό ($h/d \leq 3$) επιλέγεται συχνά η αντικατάσταση των κολάρων με χαλύβδινα φύλλα.

Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαδικασίες αποτελεί πλεονέκτημα της τεχνικής του μεταλλικού κλωβού η δυνατότητα μεταφοράς ενός τμήματος των κατακόρυφων φορτίων του υποστυλώματος. Σε συνδυασμό μάλιστα με την ταχύτητα με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η τεχνική αποτελεί κατάλληλη προσωρινή λύση άμεσης ανάληψης κατακόρυφων φορτίων σε στοιχεία που υπέστησαν βλάβες και αδυνατούν πλέον να μεταφέρουν τα αξονικά τους φορτία.

Εξάλλου στην περίπτωση τοπικής βλάβης του υποστυλώματος ο κλωβός μπορεί να εφαρμοστεί γύρω από τη βλαφθείσα περιοχή, όπως ακριβώς εφαρμόζεται ο «νάρθηκας» στην ορθοπεδική, στην «by pass» μεταφορά της έντασης.

Από τα μέχρι σήμερα περιορισμένα αναλυτικά και πειραματικά δεδομένα της έρευνας μπορούν να προταθούν οι παρακάτω περιορισμοί για την εφαρμογή της τεχνικής του μεταλλικού κλωβού [3]:

- Η διατομή των γωνιακών πρέπει να είναι τουλάχιστον 50x50x5 (mm).
- Η διατομή του οριζόντιου οπλισμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 25x4 όταν χρησιμοποιούνται ελάσματα ή κατ' ελάχιστον Φ10, όταν χρησιμοποιούνται ράβδοι δομικού χάλυβα.
- Οι αποστάσεις του οριζόντιου οπλισμού συνίσταται να είναι μικρότερες από το μισό της μικρότερης διάστασης της διατομής και από 150 mm. Συνήθως επιλέγεται 100 mm.
- Για την περίπτωση τοπικής περίσφιγξης, ο μεταλλικός κλωβός επεκτείνεται πάνω και κάτω από τη βλάβη σε απόσταση τουλάχιστον μιάμιση φορά στη μέση διάσταση της διατομής.
- Απαιτούνται πρόσθετα μέτρα πυροπροστασίας.

Η συνηθισμένη εφαρμογή της τεχνικής αφορά υποστυλώματα μικρής διατομής με επαρκή διαμήκη οπλισμό. Για παράδειγμα ως μέγιστη διάσταση διατομής θα μπορούσε να θεωρηθεί η διάσταση των 400 mm και ως ελάχιστος οπλισμός του υποστυλώματος τα 4Φ18. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερων διαστάσεων απαιτούνται ενδιάμεσες διαμπερείς χαλύβδινες ράβδοι δομικού χάλυβα σε αποστάσεις της τάξης των 300 mm, που διαπερνούν μέσω οπών το πάχος του υποστυλώματος και ηλεκτροσυγκολλούνται στις απέναντι μεταλλικές λάμες. Το κενό μεταξύ των ράβδων και των τοιχωμάτων των οπών συμπληρώνεται με εποξειδική ρητίνη.

Όταν η τεχνική εφαρμόζεται σε υποστυλώματα που η μία πλευρά τους βρίσκεται σε επαφή με γειτονικό όριο, οι λάμες ή ράβδοι, που θα χρησιμοποιηθούν στην «τυφλή» πλευρά, θα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα.

2.3.8. Τοπική ενίσχυση με καθαίρεση και αποκατάσταση

Εφαρμόζεται σε κόμβους με υψηλό βαθμό βλάβης, δηλαδή συντριβή του σκυροδέματος, διάρρηξη των συνδετήρων και λυρισμό των διαμηκών ράβδων [2]. Στην περίπτωση αυτή καθαιρείται τοπικά το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα στον κόμβο και σε τμήματα των

κρίσιμων περιοχών των στύλων των δοκών, τοποθετούνται με συγκόλληση νέες διαμήκεις ράβδοι οπλισμού, σε οποίους οπλισμούς έχει διαπιστωθεί λυγισμός, τοποθετούνται προσθετοί συνδετήρες και τελικώς αποκαθίσταται το καθαιρούμενο σκυρόδεμα με νέο. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι παραμένουν σταθερές και μετά την ενίσχυση οι διατομές που είχαν αρχικά τα δομικά στοιχεία. Εάν όμως το επισκευασμένο στοιχείο δεν έχει την επιθυμητή αντοχή, πλαστιμότητα και απορρόφηση ενέργειας, μπορούν να εφαρμοσθούν οι προαναφερθείσες τεχνικές ενισχύσεις ή συνδυασμός αυτών.

3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

3.1. Ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά

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 ενίσχυσή τους. Λόγω κυρίως της ανθεκτικότητάς 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 [18].

3.2. Εισαγωγή - Ορισμός

Για ένα σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με έχει σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του [14].

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %).

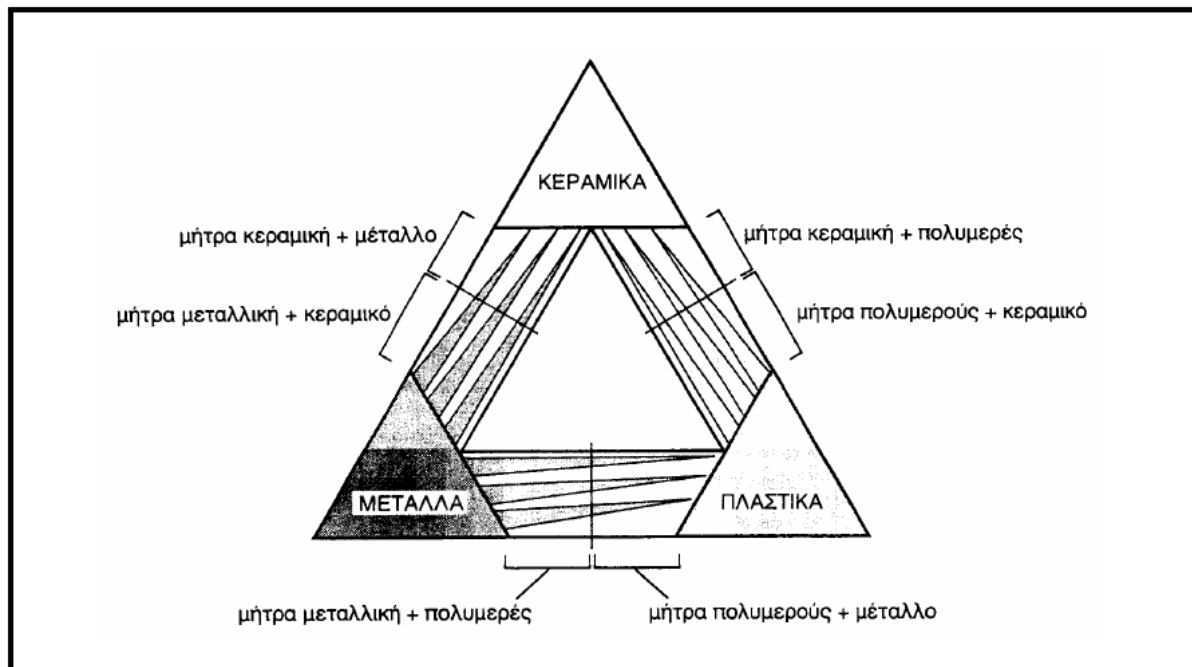
Ο όρος σύνθετο υλικό κατά τον Changxu Shi ο οποίος έδωσε ένα εμπειρισταωμένο ορισμό είναι ο ακόλουθος: «Τα σύνθετα υλικά είναι νέα υλικά, τα οποία προέρχονται από συνδυασμούς διαφορετικών τύπων υλικών, όπως τα οργανικά πολυμερή, ανόργανα μη μεταλλικά ή μεταλλικά και ούτω καθεξής, μέσω της τεχνολογίας ανάμιξης (compound technology). Το υλικό που προκύπτει όχι μόνο διατηρεί το κύριο χαρακτηριστικό των

αρχικών συστατικών του, αλλά αποκτά και ιδιότητες που δεν παρουσιάζουν τα αρχικά συστατικά μέσω των συνδυασμένων επιδράσεων, με αποτέλεσμα την δημιουργία προϊόντων ανώτερων, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από εκείνα που προκύπτουν από την απλή ανάμιξη γενικά υλικών μεταξύ τους» [24].

Επίσης, σύμφωνα με τον Agarwal (1990) [20], σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους [12].

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Σχήμα 17: Κατηγορίες σύνθετων υλικών [14].

3.3. Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών

Η ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των συνθέτων υλικών που παρουσιάζεται στην παρούσα παράγραφο αντλεί στοιχεία από τη βιβλιογραφία που μελετήθηκε [17].

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

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.

Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).

Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης.

Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία

αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

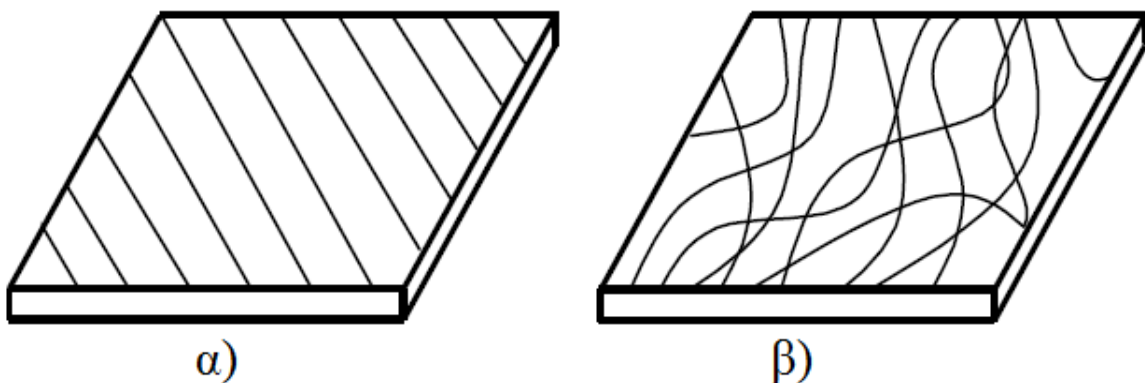
3.4. Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες [17]:

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

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε [17]:

- Μονοδιευθυντικά ή προσανατολισμένα (directional) σύνθετα, στα οποία οι ίνες είναι συνεχείς έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 18α).
- Πολυδιευθυντικά ή μη προσανατολισμένα (random) σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις (Σχήμα 18β).



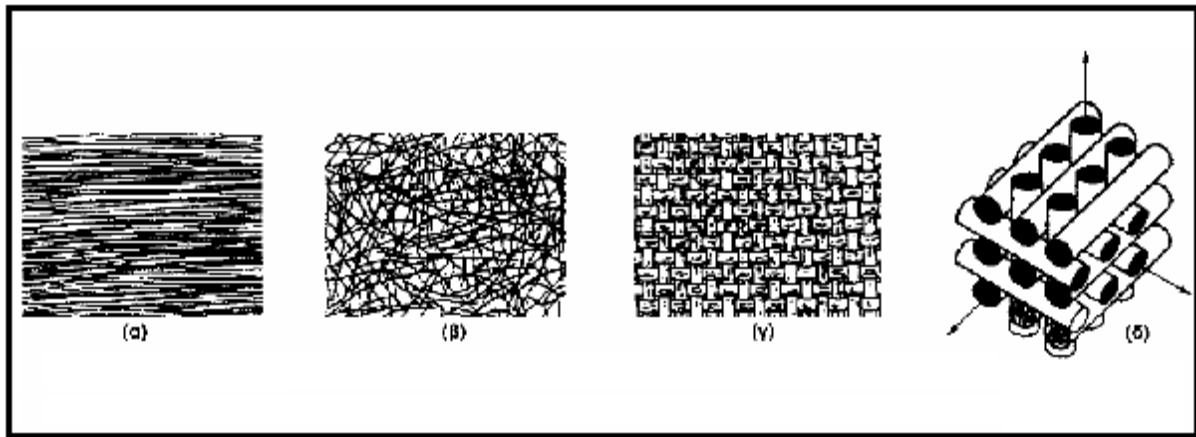
Σχήμα 18: Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών: (α) Μονοδιευθυντικό ή προσανατολισμένο, (β) Πολυδιευθυντικό ή μη προσανατολισμένο [18].

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, (Σχήμα 19) [17]:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως [17]:

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



Σχήμα 19: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη [17].

3.5. Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι εκτός από ότι διατηρούν τις ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν, επιπλέον εμφανίζουν και ιδιότητες που κανένα από τα αρχικά υλικά δεν διαθέτει. Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικότερα τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών ως κατασκευαστικών στοιχείων [14]:

- **Μηχανικές ιδιότητες**

Το κυριότερο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι οι βελτιωμένες μηχανικές τους ιδιότητες. Πολλοί τύποι ινών, που από τη φύση τους έχουν σημαντική αντοχή και δυσκαμψία, εντάσσονται στην κατηγορία των προηγμένων ινών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ίνες βορίου (boron) και γραφίτη (graphite) με τη μορφή πολύ λεπτών νημάτων (filaments) με το βόριο να υπερσχύει του γραφίτη στη διαστρωματική διατμητική αντοχή και στην αντοχή σε θλίψη ιδιαίτερα σε διεύθυνση κάθετη των ινών, ενώ επιτυγχάνει ισχυρότερο δεσμό στη διεπιφάνεια μεταξύ μήτρας και ίνας. Το λεπτό νήμα του βορίου έχει έως έξι φορές μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία από το αλουμίνιο και αποτελεί υλικό κατασκευής σύνθετων υλικών που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε αεροναυπηγικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές.

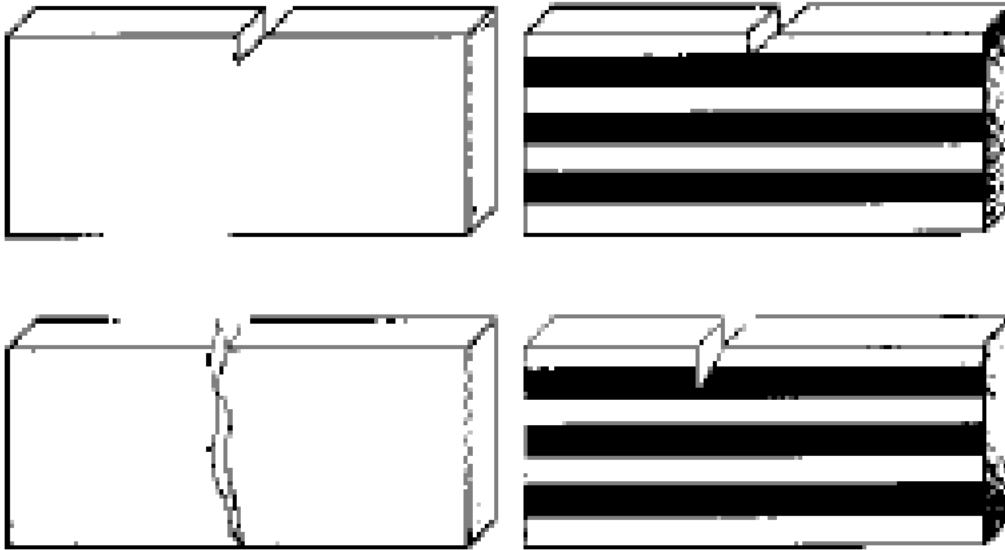
Άλλα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι το βηρύλλιο (beryllium), το οποίο έχει έξι φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία από το αλουμίνιο αλλά λόγω της μικρής αντοχής και της ψαθυρής συμπεριφοράς του χρησιμοποιείται μόνο σε κατασκευές όπου αναζητείται υψηλή δυσκαμψία. Αντίθετα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού μίας διεύθυνσεως έχουν τέσσερις φορές μεγαλύτερη αντοχή από το αλουμίνιο, αλλά μικρή δυσκαμψία.

- **Ανάληψη φορτίου μετά από αστοχία**

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι τα μεγάλα φορτία που είναι σε θέση να συνεχίσουν να αναλαμβάνουν, μετά από κάποια πιθανή αστοχία τους. Έχει παρατηρηθεί στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP), μετά τη διαρροή τους να εξακολουθούν να αναλαμβάνουν φορτία που φθάνουν μέχρι και το 85% της τάσης αστοχίας τους, ή ακόμα και έως 150% του ορίου διαρροής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αστοχία του υλικού συμβαίνει εσωτερική θραύση των ινών και στη συνέχεια η τάση μεταβιβάζεται σε πολλαπλές κατευθύνσεις μέσα στη μάζα του υλικού.

- **Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές ή ρωγμές**

Τα ινώδη σύνθετα υλικά εμφανίζουν μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγκοπών και περιορισμένη διάδοση των αρχικών ρωγμών, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής σε σχέση με αυτήν των μεταλλικών κατασκευών και βελτιώνοντας την αντοχή του υλικού σε κόπωση. Οποιαδήποτε επιφανειακή ατέλεια σε ένα ομογενές υλικό που δοκιμάζεται σε ένα εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου, μπορεί να γίνει η αιτία έναρξης μίας καταστροφικής ρωγμής. Αντίθετα, μία επιφανειακή ανωμαλία σε ένα σύνθετο διαφασικό, μπορεί να γίνει αιτία έναρξης μίας ρωγμής, που όμως δε θα διαδοθεί καταστροφικά (Σχήμα 20).



Σχήμα 20: Διάδοση μίας ρωγμής σε ένα ομογενές (αριστερά) και διαφασικό σύνθετο υλικό (δεξιά) [14].

Ακόμη στα σύνθετα υλικά, σε περίπτωση διάτρησης λόγω ισχυρής κρούσης, η συγκέντρωση των τάσεων στα ινώδη υλικά είναι σχετικά μικρή και στην περιοχή της διάτρησης δεν παρουσιάζονται φαινόμενα διάδοσης ρωγμών.

- **Μείωση του αριθμού των τμημάτων της κατασκευής**

Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης ινωδών σύνθετων υλικών, είναι η μείωση του αριθμού των τμημάτων μίας κατασκευής. Αυτό συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος παραγωγής και συντήρησης και παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία, πολύ σημαντικό στοιχείο σε κρίσιμες εφαρμογές όπως η αεροναυπηγική.

- **Αντίσταση σε διάβρωση**

Όλες οι μεταλλικές κατασκευές με τη χρήση υποφέρουν από μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό διάβρωσης. Αντίθετα, στα ενισχυμένα σύνθετα πλαστικά δεν παρατηρούνται φαινόμενα ηλεκτροχημικής διάβρωσης, με εξαίρεση την υποβάθμισή τους λόγω προσβολής σε ηλιακή ακτινοβολία, που μπορεί να ελεγχθεί όμως με κατάλληλη προστασία του υλικού.

- **Απόσβεση ταλαντώσεων**

Τα σύνθετα υλικά και ειδικά τα τύπου sandwich, επιτυγχάνουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας, με αποτέλεσμα να αποσβαίνουν σύντομα μηχανικές ταλαντώσεις. Για τον ίδιο λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά.

- **Μείωση του βάρους της κατασκευής**

Λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων των ινώδων σύνθετων υλικών, μπορούν να κατασκευαστούν υλικά με πολύ μικρότερο βάρος σε σχέση με τη χρήση παραδοσιακών υλικών, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του βάρους μίας κατασκευής. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής.

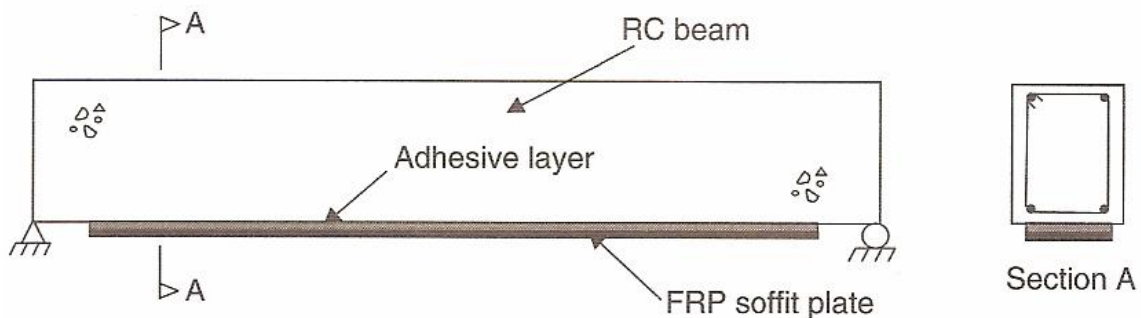
- **Χαμηλό κόστος κατασκευής**

Το κόστος μίας κατασκευής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το κόστος υλικού, η μέθοδος κατασκευής, η διαδικασία κατασκευής, η εμπειρία κτλ. Επιπλέον πρέπει να ληφθούν υπόψη τα απόβλητα που παράγονται δηλαδή το υλικό που αφαιρείται κατά την κατεργασία για τη διαμόρφωση του τελικού προϊόντος. Οι δοκοί και γενικότερα πολλά στοιχεία πλαισίων, διαμορφώνονται με μεγάλες οπές για να επιτυγχάνουν μείωση βάρους. Κατά την παραγωγή από συμβατικά υλικά, τα απόβλητα που παράγονται μπορούν να φτάσουν μέχρι και το 60% κατά βάρος, ενώ είναι σημαντικά μειωμένα στην περίπτωση χρήσης σύνθετων υλικών. Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω, τα ινώδη σύνθετα υλικά έχουν αποδειχθεί σε πολλές περιπτώσεις φθηνότερα των παραδοσιακών, αφού απαιτούνται συνολικά μικρότερα ποσά ενέργειας για την παραγωγή τους.

4. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΚΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

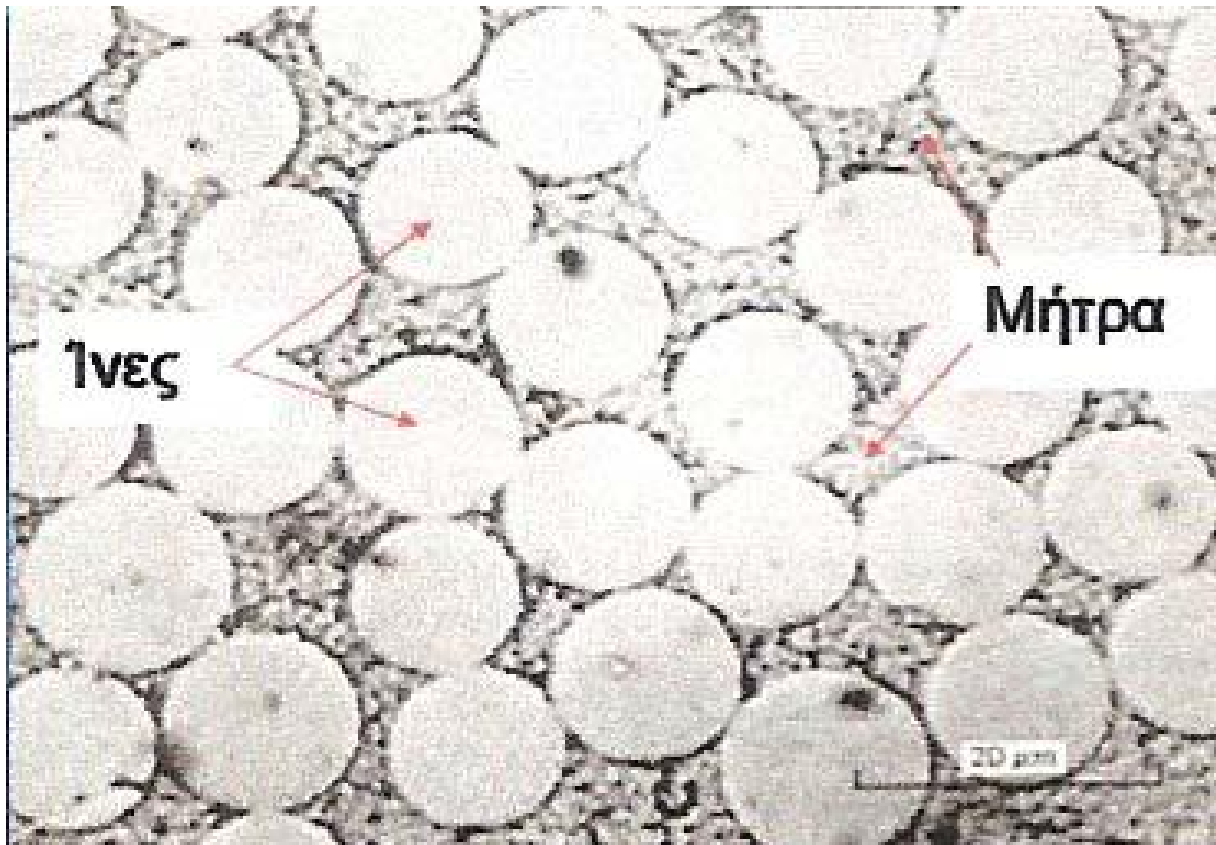
Η χειροτέρευση της κατάστασης των ήδη υπαρχουσών κατασκευών από διάφορους παράγοντες (σεισμός, πυρκαγιά, κακοτεχνίες κα) έχει οδηγήσει στην ανάγκη επισκευής και ενίσχυσης αυτών. Η ανάπτυξη μεθόδων ενίσχυσης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι λοιπόν αναγκαία αφού η αντικατάστασή τους από νέες κατασκευές καθίσταται απαγορευτική, ή τουλάχιστον στις περισσότερες περιπτώσεις δύσκολη, λόγω του μεγάλου κόστους μιας τέτοιας ενέργειας. Η χρήση των εξωτερικών ενισχύσεων είναι μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα αυτό και συνίσταται στην επικόλληση φύλλων χάλυβα την επιφάνεια του σκυροδέματος. Μια βελτίωση της μεθόδου αυτής είναι η αντικατάσταση των χαλύβδινων ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων, που για την καμπτική ενίσχυση μιας δοκού, για παράδειγμα, τοποθετούνται στο εφελκόμενο πέλαμα της (Σχήμα 21). Εναλλαγή της μεθόδου είναι η τοποθέτηση των φύλλων αυτών σε «αυλάκια» (εγκοπές) στη δοκό.



Σχήμα 21: Ενισχυμένη δοκός με έλασμα FRP [8].

4.2. Γενικά χαρακτηριστικά ελασμάτων που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος

Για την ενίσχυση σε κάμψη δοκών χρησιμοποιούνται χαλύβδινα ελάσματα πάχους συνήθως 1-1,5 mm με όριο διαρροής που κυμαίνεται από 240 έως 400 MPa. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή σύνδεση χρησιμοποιώντας ειδική κόλλα που συνήθως είναι εποξειδική. Το πάχος των ελασμάτων πρέπει να είναι μικρό για να αποφεύγεται η πρόωγη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελασματος. Γενικά συνίσταται να μην ξεπερνά τα 4mm και επίσης να είναι μικρότερο του 2% του πλάτους του ελασματος. Όσον αφορά τα ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να είναι προκατασκευασμένα ή μπορεί να κατασκευάζονται επί τόπου του έργου. Οι ιδιότητες τους προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών τους υλικών, δηλαδή των ινών (ίνες άνθρακα, αραμιδίου ή γυαλιού) και της μήτρας, ρητίνη, συνήθως εποξειδική. Τα σύνθετα αυτά υλικά διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων «λωρίδων» πάχους της τάξης του 1 mm ή εύκαμπτων «υφασμάτων» πάχους της τάξης του 0.1-0.4 mm με ίνες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις [8].



Σχήμα 22: Διακριτά Συστατικά Υλικά Ίνοπλισμένων Πολυμερών, Ίνες και Μήτρα [8]

4.3. Χαλύβδινα ελάσματα.

4.3.1. Υλικό

Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα που δεν ξεπερνάει το 2%. Λαμβάνεται από τον κοινό χυτοσίδηρο με αφαίρεση σημαντικού ποσοστού άνθρακα και άλλων προσμίξεων, με μία από τις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω.

Η βασική γνώση της δομής και της σύνθεσης του χάλυβα είναι χρήσιμη για την κατανόηση των ιδιοτήτων του. Ανάλογα με την θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε άνθρακα, τα κράματα σιδήρου-άνθρακα βρίσκονται σε μορφή ωστενίτη, φερρίτη, σεμενίτη και περλίτη.

Ο ωστενίτης, ή σίδηρος- γ κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα και σχηματίζεται μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο φερρίτης, ή σίδηρος- α , που είναι ουσιαστικά καθαρός σίδηρος, κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα, και χαρακτηρίζεται από μεγάλη πλαστιμότητα αλλά μικρή αντοχή (π. χ. 50 MPa). Ο σεμενίτης είναι πολύ σκληρός και έχει μεγάλη αντοχή, αλλά είναι ψαθυρός. Ο περλίτης, που είναι μίγμα φερρίτη και σεμενίτη σε αναλογία περίπου 7 1 αντίστοιχα, χαρακτηρίζεται από ενδιάμεση αντοχή και πλαστιμότητα. Ο ρόλος του άνθρακα στο χάλυβα είναι καθοριστικής σημασίας. Αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας, αλλά μείωση της πλαστιμότητας, της δυσθραυστότητας και της συγκολλησιμότητας. Ανάλογα με το ποσοστό άνθρακα, ο χάλυβας διακρίνεται γενικά σε: (α) χάλυβα μικρής περιεκτικότητας άνθρακα (ή πολύ μαλακό), με C έως 0 15%, (β) μαλακό ή

κοινό χάλυβα, που έχει την ευρύτερη χρήση στη δόμηση, με C μεταξύ 0.15-0.30%, (γ) χάλυβα μέτριας περιεκτικότητας σε άνθρακα (ή σκληρό), με C μεταξύ 0.30-0.60%, και (δ) χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (ή πολύ σκληρό), με C μεταξύ 0.6-2%. Εκτός όμως από άνθρακα, ο χάλυβας ενδέχεται να περιέχει και άλλες προσμίξεις [8].

Οι βασικότερες μέθοδοι παραγωγής χάλυβα είναι: (α) οι μέθοδοι Bessemer και Thomas, (β) η μέθοδος βασικής καμίνου οξυγόνου, (γ) η μέθοδος καμίνου ανοικτής εστίας και (δ) η μέθοδος ηλεκτρικής καμίνου [8].

Η μέθοδος Bessemer εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1855, είναι η παλαιότερη από όλες, και σήμερα έχει μάλλον ιστορική μόνο σημασία. Σύμφωνα με αυτή, λιωμένος κοινός χυτοσίδηρος οδηγείται σε μετατροπέα (μεγάλο κυλινδρικό περίπου δοχείο από ελάσματα χάλυβα, με εσωτερική επένδυση από πυρίμαχες πλίνθους, χωρητικότητας αρκετών τόννων), από τον πυθμένα του οποίου διοχετεύεται αέρας υπό πίεση, μέσω οπών. Το οξυγόνο του αέρα προκαλεί οξείδωση των προσμίξεων του χυτοσίδηρου (π.χ. O, Si, Mn, P), οι οποίες απομακρύνονται παγιδευμένες στα προϊόντα οξείδωσης ή στα παραγόμενα αέρια. Επειδή με τη μέθοδο αυτή ο έλεγχος της περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι δύσκολος, αρχικά γίνεται τέλεια αφαίρεση του άνθρακα και κατόπιν προστίθεται χυτοσίδηρος ή παλαιός χάλυβας γνωστής περιεκτικότητας σε C. Οι πυρίμαχες πλίνθοι του μετατροπέα Bessemer είναι όξινου χαρακτήρα, κατάλληλοι για χυτοσίδηρο φτωχό σε φωσφόρο. Κατά τη μέθοδο Thomas, που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1878, οι πυρίμαχες πλίνθοι είναι βασικού χαρακτήρα (πλούσιοι σε οξειδία CaO και MgO), και είναι κατάλληλοι για χυτοσίδηρο πλούσιο σε φωσφόρο. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων συνίσταται μόνο στο υλικό της πυρίμαχης επένδυσης. Ο συνολικός χρόνος παραγωγής χάλυβα σύμφωνα με τις μεθόδους αυτές είναι μεταξύ 1/2 και 1 ώρας.

Η μέθοδος βασικής καμίνου οξυγόνου αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου Bessemer και είναι η πλέον συνηθισμένη μέθοδος παραγωγής χάλυβα σήμερα. Το βασικό νέο στοιχείο της μεθόδου είναι η εισαγωγή καθαρού οξυγόνου από το στόμιο του μετατροπέα (Dow ling et al. 1992), ο οποίος έχει χωρητικότητα που ξεπερνά τους 300 τόνους. Η διαδικασία παραγωγής χάλυβα ολοκληρώνεται σε λιγότερο από 45 λεπτά.

Η κάμιнос ανοικτής εστίας (ή κάμιнос Siemens-Martin) επινοήθηκε το 1867 από τον Martin, και κατασκευάστηκε από τον Siemens. Είναι αβαθής με μεγάλη επιφάνεια επένδυσης, που μπορεί να είναι βασική ή όξινη, και λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 1500-1700°C. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την καύση μπορούν να προκαλέσουν τήξη κραμάτων σιδήρου, όπως π.χ. ο χάλυβας. Έτσι, με ανάμιξη ρευστού ή στερεού χυτοσίδηρου γνωστής περιεκτικότητας σε C με άχρηστα κομμάτια χάλυβα, προερχόμενα από την σιδηροβιομηχανία, είναι δυνατή η παραγωγή χάλυβα με καθορισμένη εκ των προτέρων αναλογία σε C. Η χωρητικότητα των καμίνων ανοικτής εστίας μπορεί να φθάσει και τους 400-600 τόνους, ο χρόνος όμως παραγωγής είναι γύρω στις 5-8 ώρες. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ομοιογένειας στο χάλυβα (λόγω της παρατεταμένης καμίνευσης) και το ότι η περιεκτικότητα σε άνθρακα ελέγχεται εύκολα, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το μεγαλύτερο κόστος παραγωγής.

Τέλος, κατά τη μέθοδο της ηλεκτρικής καμίνου οι υψηλές θερμοκρασίες (που φθάνουν τους 2000 °C) επιτυγχάνονται συνήθως με τη βοήθεια ηλεκτρικού τόξου, μέσω ηλεκτροδίων

γραφίτη, ή (σπανίως) με ρεύμα εξ επαγωγής. Η χωρητικότητα τους φθάνει τους 300 τόνους, και ο χρόνος καύσης είναι γύρω στις 3 ώρες (αλλά εξαρτάται σημαντικά από την ισχύ της καμίνου). Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για τη βελτίωση ορισμένων χαλύβων ή για την παραγωγή ειδικών χαλύβων (π. χ. νικελιούχος χάλυβας), σήμερα όμως η χρήση τους επεκτείνεται και στην παραγωγή κοινού χάλυβα.

4.3.2. Τύποι χαλύβων οπλισμού

Οι χάλυβες οπλισμού καλύπτονται από τον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος (Ε.Κ.Ω.Σ.-2000), όπως αυτός συμπληρώνεται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (Κ.Τ.Χ) και από τα πρότυπα ΕΛΟΤ-971 και ΕΛΟΤ -959.

Διακρίνονται οι εξής κατηγορίες [8]:

(α) Σύμφωνα με τη μέθοδο παραγωγής:

- Χάλυβες θερμής εξελάσεως (φυσικοί χάλυβες).
- Χάλυβες ψυχρής κατεργασίας (με συστροφή ή έλξη ή ψυχρή διέγκυση ή εξέλαση).
- Ειδικούς χάλυβες (π.χ. σκληρυμένους με βαφή).

(β) Σύμφωνα με τη μορφή της επιφάνειας σε λείες ράβδους ή ράβδους με νευρώσεις για καλύτερη πρόσφυση στο σκυρόδεμα.

(γ) Σύμφωνα με τη συγκολλησιμότητα σε χάλυβες συγκολλησίμους (συμβολισμός (s) π. χ. S500s), και σε χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις.

(δ) Σύμφωνα με τη ολκιμότητα (ο δείκτης πλαστιμότητας του υλικού, μ_e , ισούται με το λόγο της παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση προς τη παραμόρφωση διαρροής), σε χάλυβες υψηλής πλαστιμότητας (H) και σε χάλυβες συνήθους πλαστιμότητας (N).

(ε) Σύμφωνα με την αντοχή σε διάβρωση σε κοινούς χάλυβες (κράματα σιδήρου-άνθρακα) και μικρές περιεκτικότητες σε άλλα στοιχεία και ανοξειδωτους χάλυβες (με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 12%).

Στην Ελλάδα παράγονται και κυκλοφορούν στο εμπόριο, έκτος από τις απλές ράβδους, και πλέγματα (τα καλούμενα «δομικά πλέγματα»), που είναι εσχάρες συγκολλημένων ράβδων, προκατασκευασμένων κλωβών συνδετήρων και σπανιότερα προκατασκευασμένων ηλεκτροσυγκολλητών δικτυωμάτων.

Σε ότι αφορά την ονομασία των χαλύβων, οι χάλυβες ονομάζονται σύμφωνα με το χαρακτηριστικό όριο διαρροής και τη διάμετρο τους [8].

Χάλυβας S220, (κοινός ή μαλακός, παλαιάς κατηγορίας StI) με χαρακτηριστικό όριο διαρροής 220 MPa, ενώ στο εμπόριο κυκλοφορούν διάμετροι Φ6 - Φ14 (αυξανόμενες κατά 2 mm).

Νευροχάλυβας S400, (παλαιάς κατηγορίας StIII) με χαρακτηριστικό όριο διαρροής 400 MPa. Στο εμπόριο κυκλοφορούν διάμετροι Φ6 – Φ32 (αυξανόμενες κατά 2 mm) και μήκους 12 ή 14 m.

Νευροχάλυβας S500. Αντίστοιχος του παλαιού χάλυβα StIV ή StIVs. Είναι παρόμοιος με τον χάλυβα της παραπάνω κατηγορίας ως προς τα διαθέσιμα μήκη τις διαμέτρου, και ως προς τις νευρώσεις, και διαφέρει μόνο στη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής που είναι 500 MPa και μερικά άλλα χαρακτηριστικά. Σήμερα παράγεται και χρησιμοποιείται ευρέως ο χάλυβας S500s, ο οποίος είναι συγκολλησίμος και είναι τύπου Tempcore. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ένα μειονέκτημα του χάλυβα τύπου Tempcore, ότι δηλαδή σε περίπτωση διάβρωσης καταστρέφεται πρώτα το ισχυρότερο τμήμα της διατομής των ράβδων.

Δομικά πλέγματα S500. Αντιστοιχεί στο παλαιό χάλυβα StIVb και έχει χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής 500 MPa. Η επιφάνεια του είναι λεία ή με νευρώσεις και κυκλοφορεί σε μορφή εσχάρας ράβδων διαμέτρου Φ4 - Φ12 (αυξανόμενες κατά 0.5 mm), σε διαστάσεις 2.15x5.00 m, με τετράγωνα ή ορθογωνικά ανοίγματα.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χάλυβες με νευρώσεις, πρέπει να δείχνουν τη χώρα προέλευσης τους, την ποιότητα τους και το εργοστάσιο παραγωγής τους. Όμως ακόμα δεν υπάρχει διεθνής προδιαγραφή για κάτι τέτοιο παρά μόνο για τη χώρα προέλευσης και το εργοστάσιο παραγωγής, έτσι προς το παρόν ο κάθε παραγωγός εφαρμόζει τη δικιά του σήμανση ως προς τη ποιότητα και τη συγκολλησιμότητα.

4.3.3. Νέα πρότυπα του ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.

Το Φεβρουάριο του 2005 εκδόθηκαν τα νέα Πρότυπα ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 για τους συγκολλησίμους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, τα οποία αντικατέστησαν τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 [1].

Τα νέα Πρότυπα είναι τα εξής:

- ΕΛΟΤ EN 10080 (ΕΛΟΤ 1421-1): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησίμοι χάλυβες – Μέρος 1: Γενικές απαιτήσεις.
- ΕΛΟΤ 1421-2: Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησίμοι χάλυβες – Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A
- ΕΛΟΤ 1421-3: Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησίμοι χάλυβες – Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C

ΕΛΟΤ EN 10080:

Στο Πρότυπο αυτό καθορίζονται οι γενικές απαιτήσεις και οι ορισμοί για τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησίμων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, που παραδίδονται ως τελικό προϊόν με τις ακόλουθες μορφές:

- ράβδων, ρόλων και ευθυγραμμισμένων προϊόντων,
- φύλλων ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- ηλεκτροσυγκολλημένων δικτυωμάτων.

Χαρακτηριστικό του Προτύπου αυτού είναι ότι δεν ορίζει συγκεκριμένες τεχνικές κατηγορίες ποιότητας.

ΕΛΟΤ 1421-2:

Στο Πρότυπο αυτό καθορίζονται οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησίμων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος της τεχνικής κατηγορίας B500A.

Οι χάλυβες αυτοί θα διατίθενται στη μορφή:

- ρόλων για την παραγωγή ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- φύλλων ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- ηλεκτροσυγκολλημένων δικτυωμάτων.

Οι χάλυβες κατηγορίας B500A έχουν περιορισμένες εφαρμογές και θα διατίθενται σε διαμέτρους έως 8mm.

ΕΛΟΤ 1421-3:

Στο Πρότυπο αυτό καθορίζονται οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησιμων χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος της τεχνικής κατηγορίας B500C, που παραδίδονται ως τελικό προϊόν με τις ακόλουθες μορφές:

- ράβδων, ρόλων και ευθυγραμμισμένων προϊόντων,
- φύλλων ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- ηλεκτροσυγκολλημένων δικτυωμάτων.

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C είναι υψηλής ολκιμότητας (προδιαγράφονται αυστηρότερα όρια για τον λόγο εφελκυστικής αντοχής (f_t/f_y) και για την ανηγμένη παραμόρφωση –συνολική επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο ($\epsilon_{u,k}$)).

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ παλαιών και νέων Προτύπων. Τα νέα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 αφορούν αποκλειστικά τους συγκολλησιμους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Καταργείται και τυπικά η χρήση των μη συγκολλησιμων χάλυβων.

Για τους χάλυβες αυτούς καθιερώνονται [1]:

- Νέες τεχνικές κατηγορίες ποιότητας B500A (χαμηλής ολκιμότητας) και B500C (υψηλής ολκιμότητας).
- Έλεγχοι και κριτήρια αξιολόγησης ανάλογα με τη μορφή που διατίθενται (ράβδοι, ρόλοι, ευθυγραμμισμένα προϊόντα, πλέγματα, δικτυώματα).
- Αυστηρότερα όρια για τις ιδιότητες σε εφελκυσμό και μέτρηση νέων μεγεθών (όπως ο λόγος $f_{y,act}/f_{y,nom}$ και το $\epsilon_{u,k}$).
- Νέοι έλεγχοι και μετρήσεις όπως:
 - έλεγχος της γεωμετρίας των νευρώσεων (αντοχή συνάφειας),
 - ο δοκιμή κόπωσης,
 - ο αντοχή σε διάτμηση για τις σταυρωτές σημειακές συγκολλήσεις πλεγμάτων και δικτυωμάτων.
- Διαφορετικός τρόπος εκτέλεσης δοκιμών, αλλά και μέτρησης χαρακτηριστικών:
 - η καταλληλότητα σε κάμψη θα ελέγχεται με τη δοκιμή αναδίπλωσης ανεξαρτήτως διαμέτρου,
 - η ανηγμένη παραμόρφωση θα μετριέται στο μέγιστο φορτίο και όχι μετά τη θραύση,
 - οι τάσεις θα υπολογίζονται με την ονομαστική διατομή και όχι με την πραγματική,
 - στη χημική σύσταση θα μετριέται και ο χαλκός.
- Συγκεκριμένο σύστημα σήμανσης για την αναγνώριση της προέλευσης (χώρα κι μονάδα παραγωγής) και της τεχνικής κατηγορία.

- Κριτήρια συμμόρφωσης για τους παραγωγούς (αρχικός, εσωτερικός και μακροχρόνιος έλεγχος).
- Έλεγχοι σε περιπτώσεις αμφισβητήσεων.

4.3.4. Χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα

Η χρήση χαλύβδινων ελασμάτων που επικολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μια πολύ πρακτική τεχνική ενίσχυσης, που στοχεύει στη συμπλήρωση του ελλείμματος του προϋπάρχοντος οπλισμού, με νέους οπλισμούς.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών και πλακών ή της διατμητικής αντοχής δοκών. Τα χαλύβδινα ελάσματα επικολλώνται, χρησιμοποιώντας κάποια κατάλληλη εποξειδική ρητίνη σε επίπεδο παράλληλο προς αυτό του προϋπάρχοντος ανεπαρκούς οπλισμού. Έτσι είτε τοποθετούνται στο εφελκυστικό πέλμα των στοιχείων (ενίσχυση σε κάμψη) είτε τοποθετούνται στις παρειές των δοκών (ενίσχυση σε διάτμηση). Επίσης μεταλλικά ελάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με τη μορφή κλειστών μανδύων για την ενίσχυση υποστυλωμάτων με τη τεχνική της περίσφιγξης.

Τα τελευταία 30 χρόνια η τεχνική εφαρμόστηκε ευρύτατα σε περιπτώσεις ενίσχυσης του εφελκόμενου πέλματος καταστρωμάτων γεφυρών. Οι πρώτες εφαρμογές έγιναν στη Γαλλία και στη Ν.Αφρική στα μέσα της δεκαετίας του 1960.

Συνήθως χρησιμοποιούνται λεπτά χαλύβδινα ελάσματα πάχους 1-1,5 mm με όριο διαρροής που κυμαίνεται από 240 έως 400 MPa. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή σύνδεση χρησιμοποιώντας ειδική κόλλα που συνήθως είναι εποξειδική. Συνίσταται η χρησιμοποίηση κόλλας με πλάσσιμη συμπεριφορά για καλύτερη κατανομή των τάσεων στην περιοχή αγκύρωσης. Πρόσθετα στοιχεία αγκύρωσης μέσω βλήτρων ή μικροσυνδέσμων (καρφιών) χρησιμοποιούνται συχνά για μεγαλύτερη εξασφάλιση της σύνδεσης.

Το πάχος των ελασμάτων ενίσχυσης πρέπει να είναι μικρό για να αποφεύγεται η πρόωγη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος, ιδιαίτερα στην ακραία περιοχή αγκύρωσης του. Γενικά προτείνεται να μην ξεπερνά τα 4 mm και επίσης να είναι μικρότερο από 2% του πλάτους του ελάσματος [3]. Εξάλλου η χρήση ελασμάτων με μικρό πάχος επιτρέπει την καλύτερη σύνδεση με το στοιχείο αφού έτσι ακολουθείται κάθε αλλαγή της επιπεδότητας του πέλματος, χωρίς να εισάγονται πρόσθετες τοπικές τάσεις στο έλασμα. Αυτός είναι ο λόγος που σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ελάσματα σε περισσότερες στρώσεις, αντί για ελάσματα μεγάλου πάχους.

Μια τυπική διαδικασία εφαρμογής της τεχνικής είναι η εξής [3]:

- Η επιφάνεια του σκυροδέματος που θα έρθει σε επαφή με το συγκολλητικό μέσο λειαίνεται με επιμέλεια και καθαρίζεται καλά από τυχόν σκόνες.
- Η επιφάνεια του σκυροδέματος διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται καλά.
- Γίνεται αμμοβολή στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η οξειδωση του χάλυβα και ακολουθεί καθαρισμός με απολυμαντικό μέσο.

- Η επιφάνεια του σκυροδέματος εμποτίζεται με αραιό διάλυμα εποξειδικής ρητίνης εάν κριθεί ότι είναι ιδιαίτερα πορώδης ή υπάρχουν μικρορηγματώσεις.
- Η επιφάνεια αναμονής επαλείφεται με εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2 mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του ελάσματος. Η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερο πάχος, που είναι της τάξης των 10 mm, στην κεντρική περιοχή επαφής, έτσι ώστε κατά την τοποθέτηση του ελάσματος η κόλλα να προχωράει προς τα έξω όταν συμπιεστεί.
- Το έλασμα τοποθετείται στην επιφάνεια αναμονής με προσοχή έτσι ώστε να μην εγκλωβιστεί αέρας και συμπιέζεται για χρονικό διάστημα περίπου 24 ωρών με κατάλληλη διάταξη.
- Αν προβλέπεται η τοποθέτηση περισσότερων του ενός μεταλλικών ελασμάτων, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, προετοιμάζοντας με ανάλογο τρόπο την εξωτερική επιφάνεια του προηγούμενου ελάσματος.
- Τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα “πεταχτό” τσιμεντοκονίαμα για προστασία των ελασμάτων από διάβρωση και αντίσταση σε προσβολή από υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά).

Η ευκολία εφαρμογής της τεχνικής σε συνδυασμό με την ελάχιστη όχληση που προκαλείται στη χρήση του δομήματος και το χαμηλό κόστος αποτελούν τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου.

Κύρια μειονεκτήματα της τεχνικής είναι η ευκολία διάβρωσης του χάλυβα που συχνά διαπιστώνεται εντονότερη στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων. Απαιτείται ως εκ τούτου συνεχής συντήρηση που τελικά αυξάνει το κόστος. Εξάλλου η προφανής δυσκολία άμεσης διαπίστωσης της διάβρωσης του χάλυβα και η αδυναμία λήψης μέτρων προστασίας στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων, αυξάνει τους κινδύνους για μια απροειδοποίητη αστοχία της διεπιφάνειας και τελικά ένα ανεπιθύμητο τρόπο αστοχίας των στοιχείων. Επιπλέον στα αρνητικά της τεχνικής θα πρέπει να προστεθούν (α) η δυσκολία εφαρμογής της τεχνικής λόγω του μεγάλου βάρους του χάλυβα και (β) η ανάγκη κατασκευής ενώσεων των ελασμάτων στις περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλα μήκη (π.χ. γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων) [3].

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω μειονεκτήματα έχει αρχίσει να εφαρμόζεται ως εναλλακτική λύση η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) που επικολλώνται με ανάλογο τρόπο στην εξωτερική επιφάνεια των στοιχείων.

4.4. Ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή

Η χρήση ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), Fiber Reinforced Polymers (FRPs), αποτελεί σήμερα την πλέον σύγχρονη τεχνική στον τομέα της ενίσχυσης των κατασκευών. Ουσιαστικά, είναι η εξέλιξη της τεχνικής των χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων αντιμετωπίζοντας επιτυχώς τις αδυναμίες της συγκεκριμένης τεχνικής. Τα ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν πολύ μικρό βάρος και εξαιρετικά υψηλή αντοχή, διατίθενται σε μεγάλα μήκη και δεν είναι ευαίσθητα σε διάβρωση. Εξάλλου η εφαρμογή της τεχνικής είναι απλούστατη και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση της εργασίας ελάχιστος, υπερéχοντας ακόμα και στα αντίστοιχα θετικά χαρακτηριστικά της τεχνικής των

χαλύβδινων επικολητών ελασμάτων. Έτσι η εφαρμογή της τεχνικής έχει επεκταθεί και σε περιπτώσεις όπου η τεχνική των επικολητών ελασμάτων είναι περιορισμένη. Ως τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να αναφερθούν οι ενισχύσεις υποστυλωμάτων με μανδύα και οι ενισχύσεις κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων. Ως κύριο μειονέκτημα της τεχνικής θα πρέπει να αναφερθεί το ιδιαίτερα υψηλό κόστος του υλικού που όμως μειώνεται σταδιακά λόγω της αύξησης της ζήτησης και κατά συνέπεια αύξηση της παραγωγής αυτού του είδους των υλικών. Πάντως επειδή τα παραπάνω υλικά είναι καινούρια, αντιμετωπίζονται ακόμα με σχετική επιφύλαξη και απαιτείται περισσότερη έρευνα για να αντιμετωπιστούν κρίσιμα προβλήματα της πράξης [3].

Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι στην πραγματικότητα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με «θερμοσκληρυνόμενη» ρητίνη, της οποίας τα χαρακτηριστικά δεν είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες κάτω των 80° C. Οι συνήθεις τύποι ινών είναι από γυαλί ή αραμίδιο (που συχνά αναφέρεται ως κέβλαρ) ή από άνθρακα με πολύ μικρή διάμετρο, της τάξης των 5-25 μm. Παρακάτω (Πίνακας 1) δίνονται τα τυπικά χαρακτηριστικά των ινών, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του χάλυβα.

Πίνακας 1: Τυπικές ιδιότητες ινών [3].

Ίνες	Πυκνότητα (kg/m ³ x10 ³)	Μέτρο Ελαστ. (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Παραμορφ. Αστοχίας (%)
<u>Άνθρακα</u>					
Υψηλού Μέτρου Ελαστ.	1,90	350-500	0,35	2.500-3.100	0,50-0,90
Πολύ Υψηλού Μέτρου Ελ.	1,90	500-700	0,35	2.100-2.400	0,20-0,40
Υψηλής Αντοχής	1,80	215-235	0,35	3.500-4.800	1,40-2,00
Πολύ Υψηλής Αντοχής	1,80	215-235	0,35	3.500-6.000	1,50-2,30
<u>Γυαλιού</u>					
Τύπου E ή Z	2,55	70-75	0,25	1.900-3.000	3,00-4,50
Τύπου S	2,45	85-90	0,25	3.500-4.800	4,50-5,50
<u>Αραμίδιου</u>					
Κέβλαρ 29	1,45	70-80	0,32	3.500-4.100	4,30-5,00
Κέβλαρ 49	1,45	115-130	0,32	3.500-4.000	2,50-3,50
Χάλυβας	7,86	200	0,28	400-1700	12-25

Η διαδικασία επικόλλησης των ινοπλισμένων φύλλων πολυμερών συνήθως συνιστάται από τους προμηθευτές. Πάντως μια τυπική διαδικασία εφαρμογής της τεχνικής μπορεί να είναι η εξής [3]:

- Απομακρύνεται η επιδερμική στρώση σκυροδέματος στην επιφάνεια που θα γίνει η επικόλληση έτσι ώστε να αποκαλυφθούν τα αδρανή σε βάθος περίπου 5 mm, χρησιμοποιώντας ειδικό μηχανικό εξοπλισμό, ή υδροβολή.
- Εφόσον το σύνθετο υλικό καλύπτει και γωνίες του στοιχείου σκυροδέματος, αυτές εξομαλύνονται και λειαίνονται για να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30 mm.

- Η επιφάνεια σκυροδέματος καθαρίζεται καλά, διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται. Η υγρασία της τελικής επιφάνειας του σκυροδέματος δεν επιτρέπεται να είναι περισσότερο από 4%.
- Η επιφάνεια του σκυροδέματος εμποτίζεται με αραιό διάλυμα εποξειδικής ρητίνης εάν κριθεί ότι είναι ιδιαίτερα πορώδης ή υπάρχουν μικρορηγματώσεις. Στη συνέχεια η επιφάνεια επαλείφεται με παχύρρευστο συγκολλητικό υλικό που συνήθως είναι εποξειδικός στόκος.
- Σημειώνεται ότι συχνά επιλέγεται η διαδικασία λείανσης της επιφάνειας χωρίς να προηγηθεί η εξομαλυντική στρώση του εποξειδικού στόκου.
- Μετά τη σκλήρυνση του συγκολλητικού υλικού, η επιφάνεια λειαίνεται με επιμέλεια έτσι ώστε να μην υπάρχει ανωμαλία σε ύψος μεγαλύτερο από 1 mm.
- Η επιφάνεια αναμονής επαλείφεται με εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2 mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του ελάσματος. Η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερο πάχος, που είναι της τάξης των 10 mm, στην κεντρική περιοχή επαφής, έτσι ώστε κατά την τοποθέτηση του ελάσματος η κόλλα να προχωράει προς τα έξω όταν συμπιεστεί. Συχνά, τα χαρακτηριστικά της κόλλας προδιαγράφονται από τον προμηθευτή του σύνθετου υλικού.
- Το φύλλο του σύνθετου υλικού τοποθετείται στην επιφάνεια αναμονής εφαρμόζοντας ομοιόμορφη πίεση, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην εγκλωβιστεί αέρας. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα σκληρό ρολό.
- Μετά πάροδο χρόνου μισής έως μιας ώρας, αφαιρείται το προστατευτικό κάλυμμα του ελάσματος και οι ίνες επαλείφονται με μία δεύτερη στρώση της ίδιας ρητίνης.
- Αν προβλέπεται η τοποθέτηση περισσότερων του ενός φύλλου, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, προετοιμάζοντας με ανάλογο τρόπο την εξωτερική επιφάνεια του προηγούμενου ελάσματος.
- Τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα “πεταχτό” τσιμεντοκονίαμα για προστασία των φύλλων του σύνθετου υλικού από υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά) και άλλες περιβαλλοντικές προσβολές.

Η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών είναι 3 έως και 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του κοινού χάλυβα S500. Εξάλλου μπορεί να θεωρηθεί ότι οι εξισώσεις που δόθηκαν παραπάνω για το μέτρο ελαστικότητας ισχύουν προσεγγιστικά και για την εφελκυστική αντοχή, αντικαθιστώντας τα Μέτρα Ελαστικότητας με τις αντίστοιχες εφελκυστικές αντοχές. Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι όταν τα υλικά βρίσκονται σε μόνιμη τάση, η εφελκυστική τους αντοχή μειώνεται σημαντικά [3].

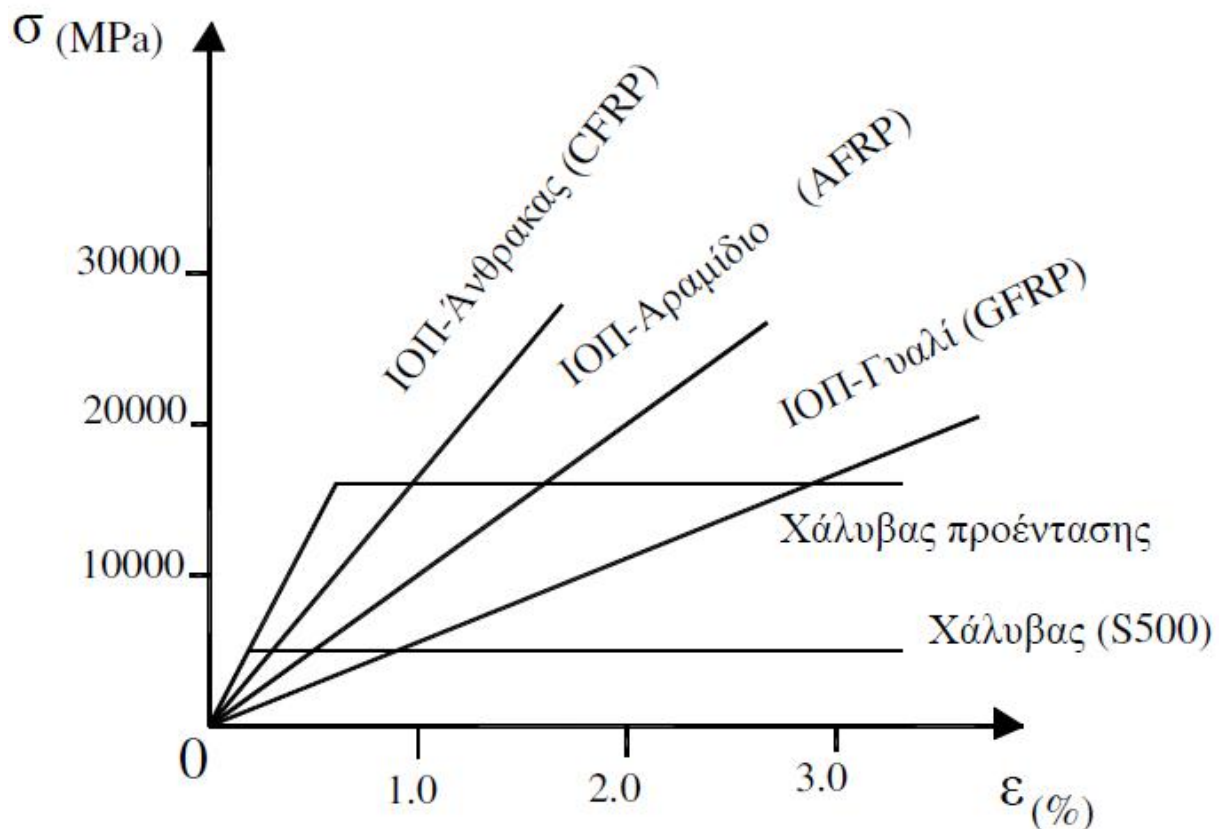
Για υλικά με ίνες άνθρακες ή αραμιδίου, η μείωση της αντοχής τους μπορεί να είναι μέχρι και 30% ή 40% αντίστοιχα, ενώ για υλικά με ίνες γυαλιού η τελική τιμή της αντοχής μπορεί να είναι μόλις το 20% της αρχικής τους τιμής.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές που λαμβάνονται για το μέτρο ελαστικότητας και τη παραμόρφωση αστοχίας των σύνθετων υλικών και του χάλυβα.

Πίνακας 2: Τυπικές τιμές μέτρου ελαστικότητας και παραμόρφωσης αστοχίας σύνθετων υλικών και χάλυβα [3].

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
Σύνθετο Υλικό με ίνες γυαλιού (GFRP)	50-85	3,00-5,50
Σύνθετο Υλικό με ίνες αραμίδιου (AFRP)	60-120	2,50-5,00
Σύνθετο Υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP)	170-600	0,20-2,30
Χάλυβας	200	12-25

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων για σύνθετα υλικά μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη για χάλυβα.



Σχήμα 23: Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό [3].

Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί, τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται πλήρως ελαστικά, μέχρι την αστοχία τους. Η παντελής έλλειψη πλαστικής συμπεριφοράς, που συνεπάγεται και αδυναμία απορρόφησης ενέργειας από το υλικό, αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών. Όμως στις εφαρμογές τους σε ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, το παραπάνω μειονέκτημα είναι λιγότερο έντονο, επειδή το ενισχυμένο στοιχείο διατηρεί ένα βαθμό πλαστιμότητας. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση εφαρμογής τους υπό τη μορφή κλειστού μανδύα σε υποστυλώματα, η αύξηση της πλαστιμότητας αποτελεί την κύρια επιδίωξη εφαρμογής της

τεχνικής. Μία τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδώσει κάποιο βαθμό πλαστιμότητας στο υλικό είναι η σύνθεση του υλικού με ίνες διαφορετικού τύπου. Οι ίνες αστοχώντας σε διαφορετικά μεγέθη παραμόρφωσης δημιουργούν τελικά μία ψευδο-πλάστιμη συμπεριφορά [3].

Ως αρνητικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών θα πρέπει επίσης να αναφερθούν τα παρακάτω [3]:

- (α) Η χαμηλή αντίστασή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως γνωστόν η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 250° C.
- (β) Η αμφισβητούμενη ανθεκτικότητά τους σε διάρκεια. Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι ευαίσθητα σε περιβαλλοντικές δράσεις όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η δράση χημικών. Σε γενικές γραμμές η παραπάνω ευαισθησία συναρτάται με την ευαισθησία της ρητίνης και εξαρτάται από τον τύπο των ινών του υλικού. Έτσι, για παράδειγμα, η υπεριώδης ακτινοβολία επιδρά δυσμενώς, κυρίως στα υλικά με ίνες αραμιδίου. Σε αλκαλικό ή όξινο περιβάλλον τα υλικά με ίνες άνθρακα, θεωρούνται περισσότερο ανθεκτικά, ενώ τα υλικά με ίνες γυαλιού είναι τα λιγότερο ανθεκτικά και τα υλικά με ίνες αραμιδίου βρίσκονται ενδιάμεσα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) παρουσιάζεται μια ποιοτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των σύνθετων υλικών. Για λόγους σύγκρισης, τα υλικά έχουν βαθμολογηθεί σε μία κλίμακα με άριστα το 10 [3].

Πίνακας 3: Ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών [3].

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Εφελκυστική αντοχή	9	9	9
Μέτρο Ελαστικότητας	9	6	3
Παραμόρφωση αστοχίας	6	9	9
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις	9	6	3
Συμπεριφορά σε κόπωση	6	4	2
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	6	4	2
Πυκνότητα	4	6	2
Κόστος	6	6	9

4.5. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών και χαλύβδινων ελασμάτων

Όπως όλα τα προβλήματα που υπάρχουν στις κατασκευές, έτσι και το πρόβλημα καμπτικής ενίσχυσης των δοκών έχει όπως προαναφέρθηκε περισσότερες από μία λύσεις. Η τελική απόφαση για το ποια λύση είναι η καταλληλότερη εξαρτάται όχι μόνο από τον οικονομικό παράγοντα αλλά και από τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εναλλακτικών λύσεων. Απαραίτητη είναι λοιπόν μια τέτοια σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων ενίσχυσης, η οποία γίνεται παρακάτω.

4.5.1. Πλεονεκτήματα ινοπλισμένων πολυμερών έναντι χαλύβδινων ελασμάτων [9].

Αντοχή: Η τελική αντοχή των FRP μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με την αναλογία ινών που έχουν, αλλά για θέματα ενίσχυσης η τελική αντοχή μπορεί να είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από την τελική αντοχή του χάλυβα.

Βάρος: Η πυκνότητα των FRP είναι μόνο 20% της πυκνότητας του χάλυβα. Έτσι, μπορεί να έχουν λιγότερο από 10% του βάρους του χάλυβα της ίδιας τελικής αντοχής, γεγονός που διευκολύνει τη μεταφορά τους και φυσικά την τοποθέτησή τους, μειώνοντας το χρόνο που απαιτείται για αυτήν.

Μήκος: Τα χαλύβδινα ελάσματα έχουν περιορισμένο μήκος (σπάνια ξεπερνούν τα 6-8 m) και πιθανόν να χρειάζεται ένωση αυτών, ενώ τα ελάσματα από σύνθετα υλικά έχουν απεριόριστο μήκος.

Διάβρωση: Στα χαλύβδινα ελάσματα υπάρχει η πιθανότητα διάβρωσης. Το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται στα ελάσματα από σύνθετα υλικά.

Συντήρηση της ενίσχυσης: Τα χαλύβδινα ελάσματα απαιτούν συντήρηση στο βάψιμο, γεγονός το οποίο προκαλεί αναστάτωση στους χρήστες της κατασκευής καθώς και επιπλέον έξοδα. Τα ελάσματα από σύνθετα υλικά δεν απαιτούν τέτοια συντήρηση, μειώνοντας έτσι το κόστος ζωής της μεθόδου.

Επισκευή κατεστραμμένης ενίσχυσης: η επισκευή ενός ελάσματος FRP μπορεί να γίνει ευκολότερα από αυτήν ενός χαλύβδινου ελάσματος. Ένα χαλύβδινο έλασμα μπορεί να υποστεί κάποια εκτεταμένη καταστροφή από κρούση κι έτσι να είναι απαραίτητη η πλήρης απομάκρυνση και αντικατάσταση του. Με τα FRP είναι πιθανότερο η βλάβη να είναι τοπική αφού είναι λεπτότερα και πιο εύκαμπτα.

4.5.2. Μειονεκτήματα ινοπλισμένων πολυμερών έναντι χαλύβδινων ελασμάτων [9].

Κόστος: τα FRP είναι ακριβότερα από τα χαλύβδινα ελάσματα. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των δύο υλικών τείνει να μειωθεί καθώς το μέγεθος της παραγωγής και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών μεγαλώνουν.

Συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες: τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν χαμηλή αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 250°C.

Ανθεκτικότητα σε διάρκεια: τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν αμφισβητούμενη ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Είναι ευαίσθητα σε περιβαλλοντικές δράσεις όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η δράση χημικών. Σε γενικές γραμμές η παραπάνω ευαισθησία εξαρτάται από τον τύπο των ινών του υλικού. Τα υλικά με ίνες άνθρακα θεωρούνται περισσότερο ανθεκτικά, ενώ τα υλικά με ίνες γυαλιού είναι τα λιγότερο ανθεκτικά και τα υλικά με ίνες αραμιδίου βρίσκονται ενδιάμεσα.

Πλαστιμότητα: τα ινοπλισμένα πλαστικά έχουν έλλειψη πλαστιμότητας, η οποία μπορεί έως ένα βαθμό να αναπληρωθεί από τη χρήση διαφορετικού τύπου ινών στο ίδιο στοιχείο, οι οποίες, αστοχώντας σε διαφορετικές παραμορφώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μια ψευδοπλαστική συμπεριφορά.

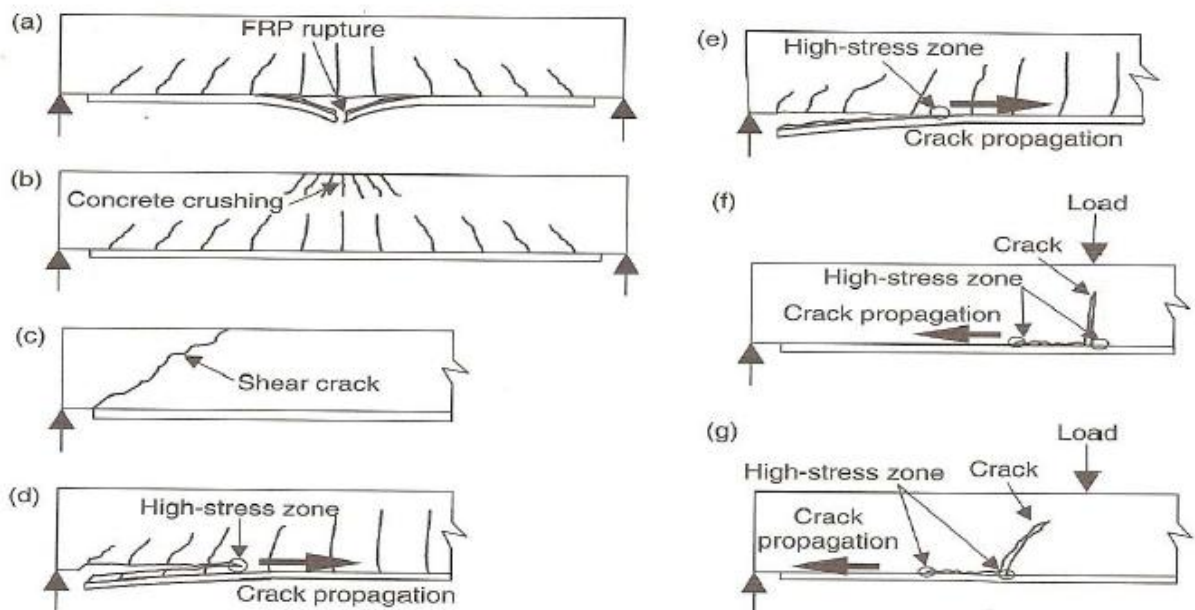
4.6. Μηχανισμοί αστοχίας και τυπική συμπεριφορά ενισχυμένης με FRP σε κάμψη δοκού.

4.6.1. Ταξινόμηση των τρόπων αστοχίας.

Μια σχηματική παράσταση των τυπικών τρόπων αστοχίας φαίνεται στο Σχήμα 24. Οι τρόποι αστοχίας είναι ταξινομημένοι σε επτά (7) κύριες κατηγορίες στο σχήμα οι οποίες ορίζονται ως εξής [9]:

- 1) Καμπτική αστοχία με θραύση του φύλλου FRP.
- 2) Καμπτική αστοχία με θραύση του θλιβόμενου σκυροδέματος.
- 3) Διατμητική αστοχία.
- 4) Αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος.
- 5) Αποκόλληση του άκρου του ελάσματος FRP στη διεπιφάνεια συγκολλητικής στρώσης - σκυροδέματος.
- 6) Ενδιάμεση καμπτική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης.
- 7) Ενδιάμεση καμπτοδιατμητική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται και στο ακόλουθο **Σχήμα 24**. Συλλογικά, οι τρόποι αστοχίας 4 και 5 αναφέρονται ως αστοχίες με αποκόλληση της απόληξης του στοιχείου ενίσχυσης, ενώ οι τρόποι αστοχίας 6 και 7 αναφέρονται ως ενδιάμεσες ρωγμές- πρόκληση αποκόλλησης στη διεπιφάνεια δοκού-φύλλου.



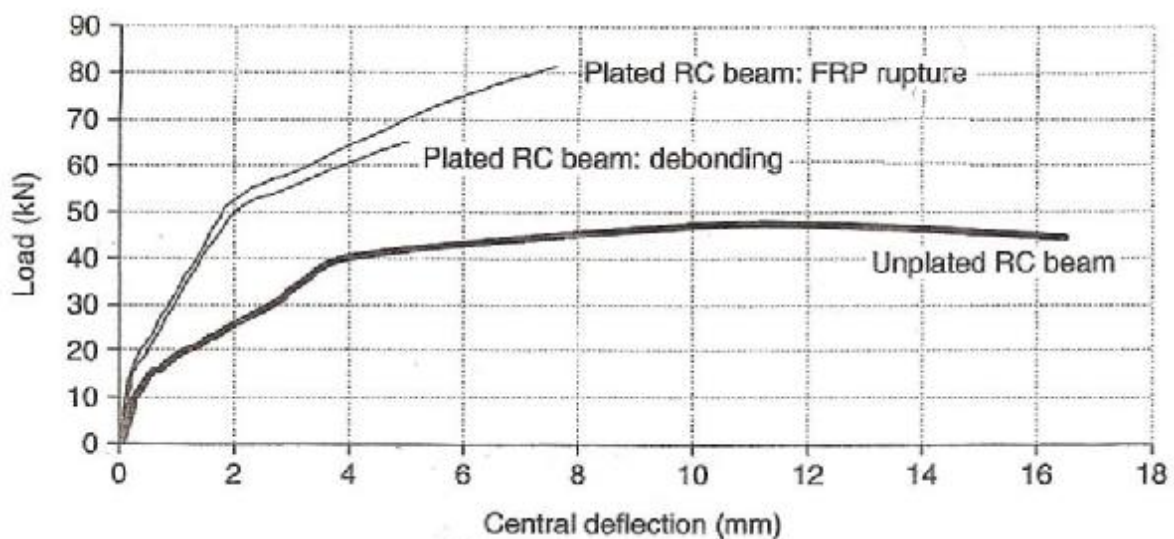
Σχήμα 24: Τρόποι Αστοχίας Ενισχυμένης με FRP Δοκού Ο.Σ. [9]

Όλοι οι παραπάνω τρόποι αστοχίας, με εξαίρεση την ενδιάμεση ρωγμή και πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης με μια μεγάλης διάρκειας διαδικασία προώθησης της αποκόλλησης, συμβαίνουν με ψαθυρό τρόπο. Συγκεκριμένα, η αποκόλληση του ελάσματος στο άκρο συμβαίνει δίνοντας μικρή ή καμία ένδειξη αστοχίας. Εάν ένας τρόπος αστοχίας είναι κρίσιμος εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως η ποσότητα του εσωτερικού οπλισμού κάμψης και διάτμησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υλικών των FRP και το συγκολλητικό στρώμα [9].

4.6.2. Καμπτική αστοχία

Αν το έλασμα FRP έχει αγκυρωθεί κατάλληλα στα άκρα του, η δοκός θα φτάσει την τελική καμπτική της αντοχή όταν είτε αστοχήσει το έλασμα σε εφελκυστική θραύση (Σχήμα 24a) είτε αστοχήσει το θλιβόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 24b). Η θραύση του FRP γενικά συμβαίνει μετά τη διαρροή των διαμηκών χαλύβδινων ράβδων, παρόλο που η διαρροή του χάλυβα μπορεί να μην έχει συμβεί αν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες αρκετά μακριά από το εφελκυσμένο πέγμα της δοκού.

Στο Σχήμα 25 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης στο μέσο του ανοίγματος μιας απλά εδραζόμενης δοκού ενισχυμένης με ινοπλισμένα πολυμερή [23]. Για αυτήν τη συγκεκριμένη δοκό, το έλασμα κατέληγε πολύ κοντά στη στήριξη και δε συνέβη πρόωρη αποκόλληση. Αντί αυτού, η δοκός αστόχησε από θραύση του ίδιου του υλικού ενίσχυσης. Συγκριτικά με την αντίστοιχη απόκριση μιας μη ενισχυμένης δοκού (Σχήμα 25, Unplated RC beam), η ενισχυμένη δοκός είχε 76% κέρδος σε αντοχή, αλλά έδειξε πολύ μειωμένη ολκιμότητα. Η αύξηση της αντοχής και η μείωση της ολκιμότητας είναι δύο κύριες συνέπειες της ενίσχυσης μιας δοκού με FRP. Οι δοκοί που αστοχούν λόγω θραύσης του σκυροδέματος όταν χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα FRP δείχνουν επίσης πολύ μειωμένη ολκιμότητα.



Σχήμα 25: Καμπύλη Φορτίου-Παραμόρφωσης Ενισχυμένης και μη Ενισχυμένης Δοκού [23].

4.6.3. Διατμητική αστοχία

Η ενισχυμένη δοκός μπορεί να αστοχήσει ψαθυρά σε διάτμηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 24c. Ενώ οι κανονικές δοκοί σχεδιάζονται για να αστοχήσουν σε κάμψη και όχι σε διάτμηση, που είναι ψαθυρός τρόπος αστοχίας, η διατμητική αστοχία μπορεί να γίνει κρίσιμη στην καμπτική ενίσχυση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το έλασμα FRP συνεισφέρει λίγο στη διατμητική αντίσταση. Τότε, πρέπει ταυτόχρονα να γίνει ενίσχυση σε διάτμηση της δοκού για να εξασφαλισθεί ότι η καμπτική αστοχία θα προηγηθεί της διατμητικής. Αυτό είναι το επιθυμητό γιατί μπορεί η καμπτική αστοχία της ενισχυμένης δοκού να είναι ψαθυρή αλλά είναι περισσότερο όλκιμη από τη διατμητική [23], [9].

4.6.4. Αποκόλληση του άκρου του ελάσματος του FRP

Πρόωρη αστοχία μπορεί να συμβεί πριν η δοκός φτάσει την τελική καμπτική αντοχή της λόγω αποκόλλησης. Ο πιο συχνά αναφερόμενος τρόπος αποκόλλησης σε πειραματικές μελέτες είναι η αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος (Σχήμα 24d) που ξεκινά από το άκρο του φύλλου ή κοντά σε αυτό. Λιγότερο συχνή είναι η αποκόλληση του ελάσματος FRP από το πέλμα της δοκού, η οποία επίσης ξεκινά στο άκρο του ελάσματος ή κοντά σε αυτό (Σχήμα 24e). Σε πραγματικές δοκούς, οι δυο περιπτώσεις μπορεί να συνυπάρχουν.. Η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης εμφανίζει μικρή ολκιμότητα (Σχήμα 25), που είναι χαρακτηριστικό για αυτού του είδους τις αστοχίες. [23], [9]

4.6.4.1. Αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος

Η αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος είναι ο πιο συχνά αναφερόμενος τρόπος αστοχίας. Γενικά θεωρείται πως ξεκινά με τον σχηματισμό μιας ρωγμής στο άκρο του ελάσματος ή κοντά σε αυτό, εξαιτίας των ιδιαιτέρως μεγάλων τιμών των διεπιφανειακών τάσεων στην περιοχή λόγω της απότομης απόληξης του στοιχείου. Η ρωγμή αυτή διαδίδεται στο επίπεδο της εφελκυστικής ενίσχυσης και εξελίσσεται οριζόντια στο επίπεδο των εσωτερικών χαλύβδινων ράβδων, καταλήγοντας σε αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος.

Πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι όσο η απόληξη του φύλλου ενίσχυσης κινείται πλησιέστερα στη στήριξη, η ρωγμή εκεί γίνεται πιο επικλινή, η αστοχία πιο ψαθυρή και το φορτίο αστοχίας αυξάνεται. Αυτές οι αλλαγές είναι συνέπειες του ότι η διατμητική δύναμη γίνεται σημαντικότερη από τη ροπή κάμψης στην απόληξη του στοιχείου [23], [9].

4.6.4.2. Αποκόλληση του άκρου του ελάσματος FRP στη διεπιφάνεια συγκολλητικής στρώσης-σκυροδέματος

Οι ερευνητές συναινούν ότι αστοχίες αυτού του είδους ξεκινούν από υψηλές διεπιφανειακές διατμητικές και ορθές τάσεις κοντά στο άκρο του FRP που ξεπερνούν την αντοχή του πιο αδύναμου υλικού, γενικά του σκυροδέματος.. Στην αποκόλληση, πάνω στο φύλλο FRP, παραμένει μια λεπτή στρώση σκυροδέματος κολλημένη, γεγονός που δείχνει ότι η αστοχία γενικά συμβαίνει στο σκυρόδεμα στη διεπιφάνεια σκυροδέματος - συγκολλητικής στρώσης. Ο κίνδυνος εμφάνισης αυτής της μορφής αστοχίας αυξάνεται με τη χρήση κατώτερης ποιότητας συγκολλητικών ουσιών και την ύπαρξη ανώμαλης επιφάνειας σκυροδέματος [23], [9].

4.7. Ενδιάμεση ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης

Η αποκόλληση μπορεί να ξεκινήσει από μια καμπτική ή μια καμπτοδιατμητική ρωγμή μακριά από το άκρο του φύλλου FRP και μετά να διαδοθεί προς ένα από τα άκρα. Τέτοιες μορφές αστοχίας παρατηρούνται σπανιότερα [23], [9].

4.7.1. Ενδιάμεση καμπτική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης

Ο μηχανισμός αυτού του είδους αστοχίας περιγράφεται ως εξής: όταν μια μεγάλη ρωγμή σχηματίζεται στο σκυρόδεμα, οι εφελκυστικές τάσεις μπορεί να ελευθερωθούν από το ρηγματωμένο σκυρόδεμα και να μεταφερθούν στο φύλλο του FRP. Σαν αποτέλεσμα,

δημιουργούνται δίπλα στη ρωγμή υψηλές τοπικές τάσεις στη διεπιφάνεια FRP - σκυροδέματος. Καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται, οι εφελκυστικές τάσεις στο φύλλο και οι τάσεις στη διεπιφάνεια επίσης αυξάνονται. Όταν αυτές οι τάσεις φτάσουν κρίσιμες τιμές, ξεκινά η αποκόλληση στη ρωγμή και διαδίδεται προς ένα από τα άκρα, γενικά το κοντινότερο [23], [9].

4.7.2. Ενδιάμεση καμπτοδιατμητική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης

Για αποκόλληση που προκαλείται από καμπτική ρωγμή, η διαπλάτυνση της ρωγμής είναι η κινητήρια δύναμη για τη διάδοση της αποκόλλησης. Ωστόσο, σε μια ενδιάμεση καμπτοδιατμητική ρωγμή που προκαλεί αποκόλληση, η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ των δυο επιφανειών της ρωγμής δημιουργεί τάσεις αποκόλλησης στη διεπιφάνεια FRP-σκυροδέματος. Παρόλα αυτά θεωρείται ότι η διαπλάτυνση της ρωγμής είναι σημαντικότερη, με την σχετική κίνηση της ρωγμής να είναι δευτερεύουσα [23], [9].

4.8. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία

Εκτός από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η αστοχία του υλικού μπορεί να επηρεαστεί και από άλλους παράγοντες.

4.8.1. Προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος

Η επιφάνεια σκυροδέματος πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένη ακολουθώντας την κατάλληλη διαδικασία για να αποφευχθεί η αστοχία στη διεπιφάνεια συγκολλητικού υλικού-σκυροδέματος. Για να επιτευχθεί αυτό είναι να ομαλοποιηθούν οι ανώμαλες επιφάνειες σκυροδέματος. Όταν ένα λεπτό φύλλο FRP επικολληθεί σε μια ανώμαλη επιφάνεια, υπόκειται σε εφελκυσμό, κατάσταση που οδηγεί στην ανάπτυξη τάσεων αποκόλλησης που μπορεί να οδηγήσουν τελικά στην αποκόλληση στην διεπιφάνεια FRP – σκυροδέματος [23], [9].

4.8.2. Συγκολλητικά υλικά

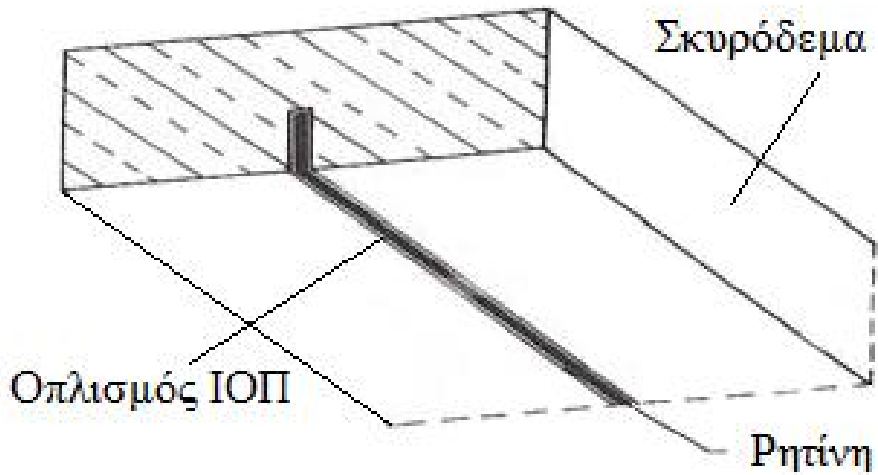
Ισχυρά συγκολλητικά υλικά έχουν μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν του σκυροδέματος, οπότε η αστοχία συγκολλητικού στρώματος είναι σπάνια. Παρόλα αυτά αν τα υλικά αυτά είναι κατώτερης ποιότητας ή δεν εφαρμοστούν σωστά, η αστοχία είναι πιθανή στη διεπιφάνεια κόλλας - σκυροδέματος και στη διεπιφάνεια FRP – κόλλας [23], [9].

4.9. Καμπτική ενίσχυση δοκού με χαλύβδινα ελάσματα και ινοπλισμένα πολυμερή τοποθετημένα σε αυλάκια (εγκοπές).

Μία εναλλακτική μέθοδος τοποθέτησης των χαλύβδινων ελασμάτων ή των ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή, για την καμπτική ενίσχυση μιας δοκού είναι μέσα σε «αυλάκια», εγκοπές, στη δοκό, στο εφελκυστικό πέλμα της (Σχήμα 26). Με αυτόν τον τρόπο ο οπλισμός ενίσχυσης είναι εσώκλειστος στο σκυρόδεμα, γεγονός που προσδίδει στη μέθοδο κάποια πλεονεκτήματα έναντι της κλασικής μεθόδου επικόλλησης των ελασμάτων στις δοκούς [9].

Όταν λοιπόν ο πρόσθετος οπλισμός τοποθετείται σε εγκοπές υπάρχει καλύτερη συνάφεια μεταξύ αυτού και του σκυροδέματος. Επίσης, έτσι προστατεύεται ο οπλισμός καλύτερα από τη διάβρωση και από τη δράση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν και μειονεκτήματα στη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου. Στα αρνητικά της μεθόδου θα μπορούσε να αναφερθεί το αυξημένο κόστος και τα αυξημένα εργατικά, καθώς μια τέτοια εργασία είναι σαφώς πιο απαιτητική από την επικόλληση των ελασμάτων. Τέλος, κατά τη διαδικασία αυτή υπάρχει το πρόβλημα περιορισμού λόγω του πάχους της επικάλυψης.



Σχήμα 26: Οπλισμός σε «αυλάκια» [9].

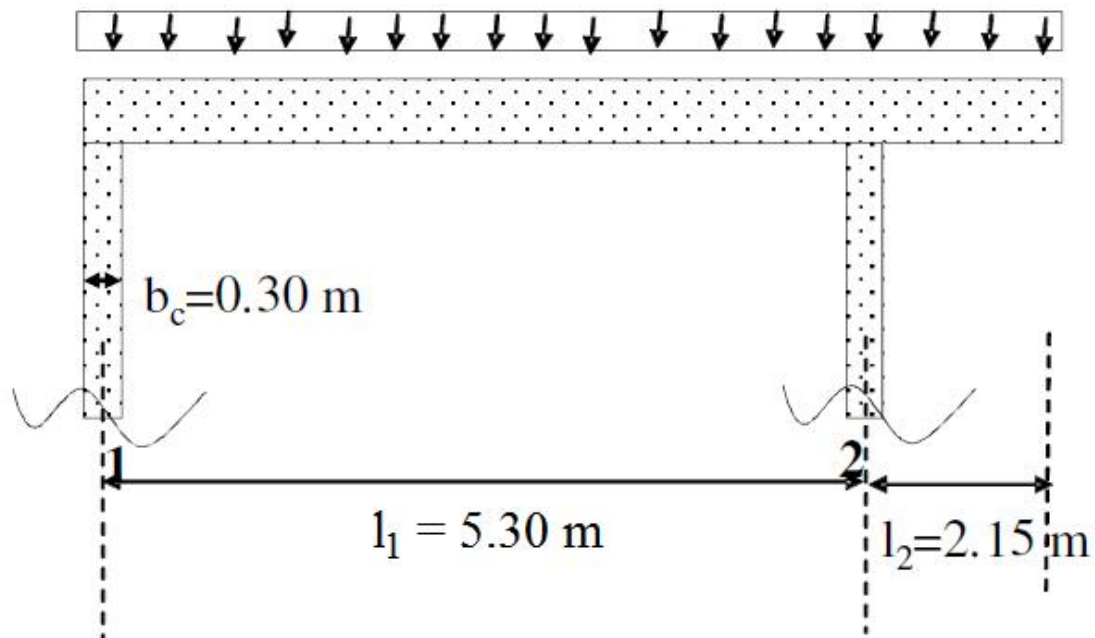
5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

5.1. Παράδειγμα εφαρμογής: Καμπτική ενίσχυση δοκού με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία σχεδιασμού και ο τρόπος λειτουργίας μιας επέμβασης με εξωτερικό, επικολλητό οπλισμό, στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής τέτοιας ενίσχυσης δοκού με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα [4].

5.1.1. Παρουσίαση προβλήματος

Η παρουσίαση του προβλήματος σχηματικά δίνεται στο Σχήμα 27.



Σχήμα 27: Παρουσίαση προβλήματος επίλυσης καμπτικής ενίσχυσης δοκού με επικολλητά ελάσματα [4].

Οι εξισώσεις που διέπουν το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι εξής:

$$V_2^r = q_d \mathcal{X}_2 \quad (5.1)$$

όπου V_2^r είναι η τέμνουσα δύναμη στο δεξί άκρο, q_d είναι το καταναμημένο φορτίο που ασκείται στη δοκό και l_2 είναι το μήκος του ελεύθερου (δεξί) άκρου της δοκού.

$$M_2 = - (q_d \mathcal{X}_2) \frac{l_2}{2} = - \frac{q_d \mathcal{X}_2^2}{2} \quad (5.2)$$

όπου M_2 είναι η καμπτική ροπή στο δεξί άκρο.

$$V_1 = V_1^{\text{amj}} + \frac{M_2 - M_1}{l_1} = \frac{1}{2} q_d l_1 - \frac{q_d l_2^2}{4} \quad (5.3)$$

όπου V_1 είναι η τέμνουσα δύναμη στο αριστερό άκρο, V_1^{amj} είναι η τέμνουσα δύναμη της αμφιέριστης δοκού, M_1 είναι η καμπτική ροπή στο αριστερό άκρο και l_1 είναι το μήκος της δοκού μεταξύ των στηρίξεων 1 και 2.

$$V_2' = V_2^{\text{amj}} + \frac{M_2 - M_1}{l_1} = -\frac{q_d l_1}{2} - \frac{q_d l_2^2}{4} \quad (5.4)$$

όπου V_2' είναι η τέμνουσα δύναμη στο δεξιό άκρο από τα αριστερά και V_2^{amj} είναι η τέμνουσα δύναμη της αμφιέριστης δοκού.

$$\max M_1^{\text{an}} = \frac{V_1^2}{2q_d} + M_1 \quad (5.5)$$

όπου $\max M_1^{\text{an}}$ είναι η μέγιστη ροπή ανατροπής.

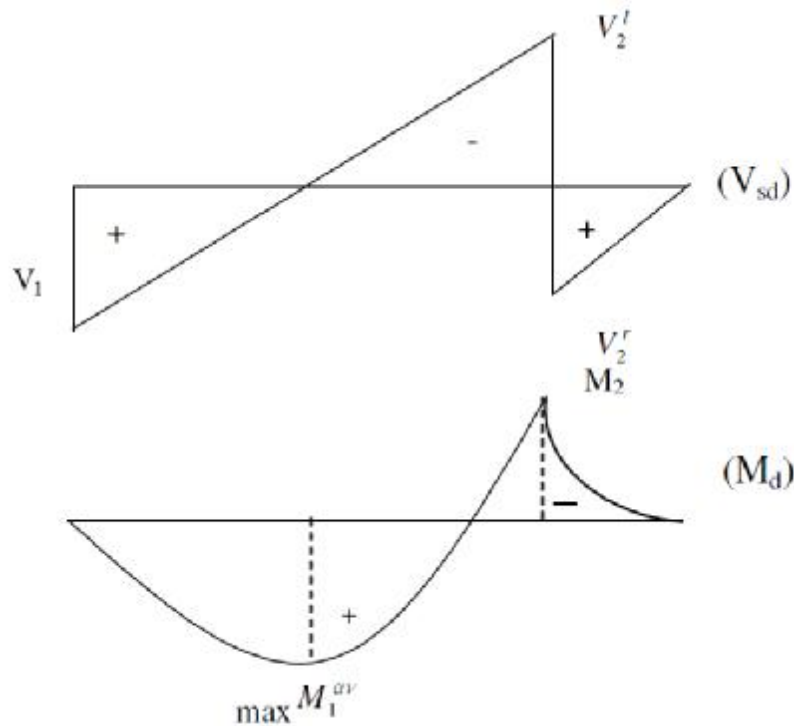
Για το Τμήμα 1-2 ισχύουν οι εξής εξισώσεις για την τέμνουσα δύναμη και την καμπτική ροπή:

$$V(x) = -q_d x + \frac{q_d l_1}{2} - \frac{q_d l_2^2}{2l_1} \quad (5.6)$$

$$M(x) = \frac{-q_d x^2}{2} + \frac{q_d l_1}{2} x - \frac{q_d l_2^2}{2l_1} x \quad (5.7)$$

όπου x είναι η απόσταση από το άκρο 1.

Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τέμνουσων δυνάμεων και καμπτικών ροπών.



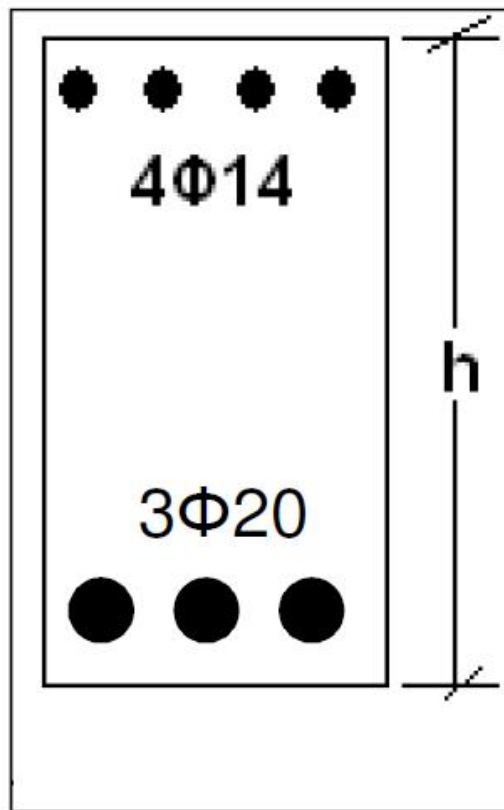
Σχήμα 28: Διαγράμματα τέμνουσων δυνάμεων (πάνω) και καμπτικών ροπών (κάτω) [4].

Σαν ζητούμενο της άσκησης είναι ο έλεγχος στη στήριξη για φόρτιση $1.35G + 1.50Q$ με δεδομένα $b = 250 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$, $d_1 = 20 \text{ mm}$ (Σχήμα 29).

Το κατανεμημένο φορτίο q_d που ασκείται στη δοκό είναι ίσο με 33 kN/m .

Ποιότητες υλικών: σκυρόδεμα C16/20 και χάλυβας S220.

Επίσης θεωρείται ότι η δοκός έχει επαρκή διατμητική αντοχή.



Σχήμα 29: Τομή δοκού και παρουσίαση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της [4].

5.1.2. Προσδιορισμός ανάγκης ενίσχυσης της κατασκευής

Απαιτείται:

$$q_d = 33 \text{ kN/m} \text{ @ } M_d = - \frac{33 \cdot 2^2}{2} = - 66 \text{ kNm} \text{ @ } M_d = - 66 \text{ kNm}$$

Έπειτα υπολογίζεται η ροπή των εξωτερικών δυνάμεων M_{sd} . Η ροπή αυτή χρησιμοποιείται ουσιαστικά ως ροπή σχεδιασμού. Με βάση την τιμή της ροπής των εξωτερικών δυνάμεων M_{sd} υπολογίζεται η ανηγμένη τιμή της ροπής σχεδιασμού μ_{sd} ως εξής:

$$M_{sd} = m_{sd} b d^2 f_{cd} \text{ @ } m_{sd} = \frac{M_{sd}}{b d^2 f_{cd}} \quad (5.8)$$

όπου b το πλάτος της διατομής, d το στατικό ύψος και f_{cd} η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 16 \text{ MPa}/1.5 = 10.66 \text{ MPa}$

Το στατικό ύψος d είναι ίσο με: $d = h - d_1 = 500 - 20 = 480 \text{ mm}$

Από την τιμή της ανηγμένης τιμής της ροπής σχεδιασμού μ_{sd} εντοπίζεται η τιμή του ανηγμένου ποσοστού οπλισμού ω_1 . Ο οπλισμός προκύπτει από τη σχέση:

$$A_s = \omega_1 b d \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad \text{ή} \quad \omega_1 = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}} \quad (5.9)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{g_s} = \frac{220 \text{ MPa}}{1.15} = 191.3 \text{ MPa}$$

$$4\text{F } 14 \text{ @ } A_s = 615.44 \text{ mm}^2$$

Άρα η σχέση (5.9) γίνεται:

$$\omega_1 = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}} = \frac{615.44 \cdot 191.3}{250 \cdot 480 \cdot 10.66} = 0.092 \text{ @ } \omega_{sd} = 0.09 < \omega_{sd, \text{lim}} = 0.308$$

Επομένως η σχέση (5.8) γίνεται:

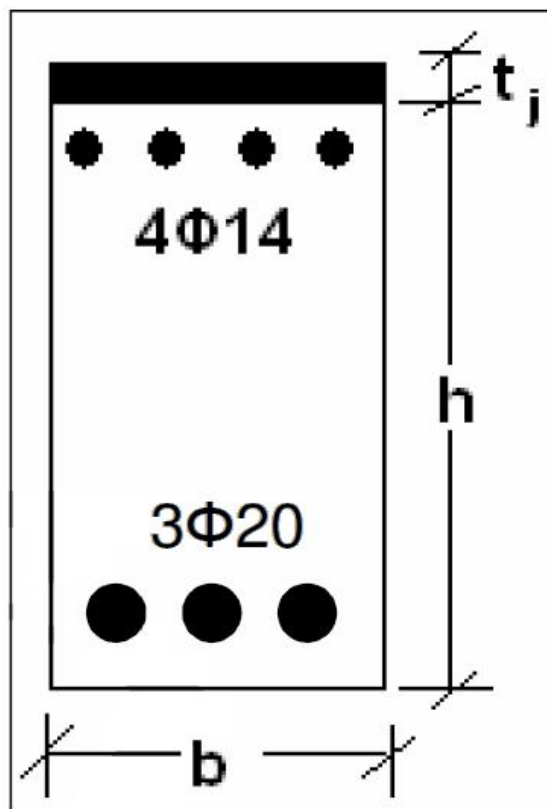
$$M_{sd} = \omega_{sd} b d^2 f_{cd} \quad \text{ή} \quad M_{sd} = 0.09 \cdot 0.25 \cdot 480^2 \cdot \frac{16}{1.5} = 55296 \text{ Nm} = 55.296 \text{ kNm}$$

Επίσης για την πρόσθετη ροπή ΔM_{do} που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_d την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική) ισχύει ότι:

$$\Delta M_{do} = M_d - M_{sd} = 66 - 55.296 = 10.7 \text{ kNm @} \quad \text{Άρα χρειάζεται ενίσχυση της κατασκευής.}$$

5.1.3. Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα

Έστω χάλυβας S 235, με πάχος: $t_j = 1 \text{ mm}$ και $E = 200 \text{ GPa}$



Σχήμα 30: Τομή δοκού μετά την προσθήκη του επικολλητού φύλλου χάλυβα [4].

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλαιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στην συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση του Κανονισμού Επεμβάσεων 2012 (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.2):

$$A_j = \frac{DM_{do}}{zs_{jd}} \quad (5.10)$$

όπου z είναι ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9 d_j$) και d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από την στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,crit}$ και σ_{jd} , μπορεί να εκτιμώνται, για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Άρα η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{zs_{jd}} = \frac{DM_{do}}{0,9d_j s_{jd}}$$

Όπου έχει υπολογιστεί $DM_{do} = 10.7 \text{ kNm}$

Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ. η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μια κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

- **Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης.**

$$s_{j,crit} = f_{jk} \quad (5.11)$$

$$s_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} f_{jk} \quad (5.12)$$

όπου f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης.

- **Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του.**

$$s_{jd} = \frac{s_{j,crit}}{\gamma_{Rd}} \quad (5.13)$$

όπου γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος και $\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση.

5.1.3.1. Έλεγχος αστοχίας ίδιου υλικού

Χάλυβας S 235 $\Rightarrow f_{jk} = 235 \text{ MPa}$

Από ΚΑΝ.ΕΠΕ για το συντελεστή ασφαλείας γ_m ισχύει ότι $\gamma_m \geq$ από τιμή που χρησιμοποιείται στις μεταλλικές κατασκευές. Λαμβάνεται $\gamma_m = 1.2$

Η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$s_{jd} = \frac{1}{g_m} f_{jk} = \frac{235}{1.2} = 195.8 \text{ MPa}$$

5.1.3.2. Έλεγχος πρόωρης αποκόλλησης υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας σύνδεσης κατά μήκος ή της αγκύρωσης των άκρων

Από ΚΑΝ.ΕΠΕ, ο συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος γ_{Rd} μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.2. Επίσης, για τη συγκεκριμένη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω προσεγγιστική σχέση (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.3):

$$s_{j,crit} = b \frac{t_b^{apok}}{t_j} L_e \quad (5.14)$$

όπου $b = b_w b_L$, διορθωτικός συντελεστής

$t_b^{apok} @ f_{ctm}, f_{ctm}$ η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη από το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από την σχέση ΚΑΝ.ΕΠΕ (Σ6.11), θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0.5 mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}} \text{ (MPa, mm) (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.3)}$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi k t_{j1}$, όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$b_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_j}{b_w}}{1 + \frac{b_j}{b_w}}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης.}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης.

b_w το πλάτος του εφελκυσμένου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$b_L = \sin \frac{\alpha \pi l}{\epsilon} \frac{\delta}{\delta} @ (2 - l)$, συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης, όπου

$l = \frac{L_{av}}{L_e} < 1.0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης.

$\beta_L = 1.0$ όταν $\lambda \geq 1.0$

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Μετά από αντικατάσταση στις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$t_b^{apok} @ f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 0.3 \cdot 16^{2/3} = 1.905 \text{ MPa}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm}}{2 \cdot 1.905 \text{ MPa}}} \quad \text{p} \quad L_e = 229 \text{ mm}$$

$$b = b_w b_L = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_j}{b_w}}{1 + \frac{b_j}{b_w}}} \cdot 1 = \sqrt{\frac{2 - \frac{b}{b}}{1 + \frac{b}{b}}} = \sqrt{\frac{2 - 1}{1 + 1}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$s_{j,crit} = b \frac{t_b^{apok}}{t_j} L_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1.905 \text{ MPa}}{1 \text{ mm}} 229 \text{ mm} = 308.5 \text{ MPa}$$

$$\text{Αρα η εξίσωση (5.13) γίνεται: } s_{jd} = \frac{s_{j,crit}}{g_{Rd}} = \frac{308.5 \text{ MPa}}{1.2} = 257 \text{ MPa}$$

Αρα μετά τους ελέγχους, η ελάχιστη τιμή είναι $s_{jd} = 195.8 \text{ MPa} \rightarrow f_{yd} = 195.8 \text{ MPa}$

Αντικαθιστούμε στην αρχική εξίσωση:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}} = \frac{10700}{0.9 \cdot 0.5005 \cdot 195.8} = 121.3 \text{ mm}^2$$

όπου $d_j = 500.5 \text{ mm}$: Στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής, μετρούμενο από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

$$\text{Όμως } A_j = b \cdot t_j \quad \text{p} \quad t_j = \frac{A_j}{b} \quad \text{p} \quad t_j = \frac{121.3 \text{ mm}^2}{250 \text{ mm}} \quad \text{p} \quad t_j = 0.485 \text{ mm}$$

Η διαφορά αρχικής επιλογής ($t_j = 1 \text{ mm}$) και τελικού αποτελέσματος ($t_j = 0.485 \text{ mm}$) είναι πολύ μεγαλύτερη από 10%. Αρα το αποτέλεσμα δεν γίνεται δεκτό και πρέπει να επαναληφθεί η διαδικασία των υπολογισμών μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

Αρχικά θεωρούμε $t_j = 0.50 \text{ mm}$ και επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς μέχρις ότου η διαφορά αρχικής επιλογής και τελικού αποτελέσματος να είναι μικρότερη από 10%.

Στη συνέχεια για λόγους ενδεικτικής παρουσίασης του τρόπου ελέγχου πιθανής πρόωρης διατμητικής αστοχίας στην περιοχή απόληξης, θεωρείται $t_j = 0.50 \text{ mm}$.

5.1.4. Ειδικός έλεγχος πρόωρης διατμητικής αστοχίας του αρχικού στοιχείου στην περιοχή απόληξης του ελάσματος

Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ., η διαδικασία ελέγχου τεκμηριώνεται με χρήση αξιόπιστων τιμών της βιβλιογραφίας. Προσεγγιστικά, πάντως, μπορεί να εφαρμόζεται το ακόλουθο κριτήριο:

$$M_{Sd}^{apol} \leq \frac{2}{3} M_{Rd}^{apol} \quad \text{και} \quad V_{Sd}^{apol} \leq V_{Rd,c}^{apol}$$

όπου

V_{Sd}^{apol} και $V_{Rd,c}^{apol}$ είναι οι τιμές της τέμνουσας σχεδιασμού και της τέμνουσας που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα (βλ. §6.2.2 του ΕΚ 2) στην θέση όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

M_{Sd}^{apol} είναι η τιμή της καμπτικής ροπής σχεδιασμού (που προκαλεί εφελκυσμό στο πέλμα όπου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης) στη θέση που απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

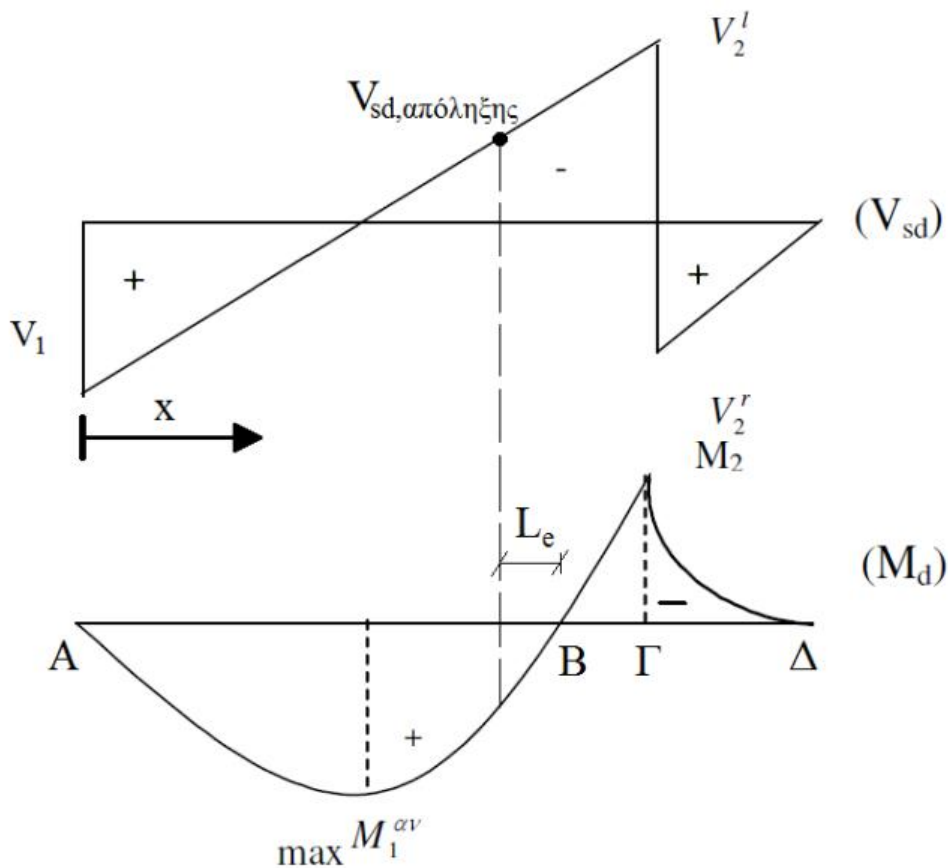
M_{Rd}^{apol} είναι η αντίστοιχη ροπή αντοχής στην ίδια θέση.

Αν το παραπάνω κριτήριο δεν ικανοποιείται απαιτείται πρόσθετος εξωτερικός οπλισμός ο οποίος θα αναλάβει τέμνουσα:

$$V_{sdj} = \frac{A_j s_{jd}}{A_{so} f_{ydo} + A_j s_{jd}} V_{sd}^{apol} \quad (5.15)$$

όπου A_{so} , f_{ydo} είναι το εμβαδόν της διατομής και το όριο διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού που υπάρχει στο αρχικό στοιχείο, A_j είναι το εμβαδόν της διατομής του απαιτούμενου εξωτερικού οπλισμού καμπτικής ενίσχυσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέγεται η τοποθέτηση του ελάσματος, έτσι ώστε να καλύπτει όλη την περιοχή που εφελκείται το πάνω πέλιμα (περιοχή ΒΔ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 31.



Σχήμα 31: Διαγράμματα τέμνουσων δυνάμεων (πάνω) και καμπτικών ροπών (κάτω) στα οποία παρουσιάζονται η θέση της τέμνουσας σχεδιασμού στην θέση όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης και το ενεργό μήκος αγκύρωσης [4].

Προσδιορίζεται η θέση του σημείου Β, δηλαδή το σημείο που μηδενίζεται η ροπή:

$$M(x) = \frac{-q_d x^2}{2} + \frac{\alpha_d l_1}{\xi} \frac{q_d l_1^2}{2} - \frac{q_d l_1^2}{2l_1} \frac{\ddot{\phi}}{\phi}$$

Για $M = 0$ έχουμε:

$$M(x) = 0 \Rightarrow \frac{-q_d x^2}{2} + \frac{\alpha q_d l_1}{\xi} - \frac{q_d l_2^2}{2l_1} \ddot{\phi} x = 0 \Rightarrow \frac{-q_d x}{2} + \frac{\alpha q_d l_1}{\xi} - \frac{q_d l_2^2}{2l_1} \ddot{\phi} \Rightarrow \frac{q_d x}{2} = \frac{q_d l_1}{2} - \frac{q_d l_2^2}{2l_1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x \frac{q_d}{2} = \frac{q_d}{2} \frac{\alpha}{\xi} l_1 - \frac{l_2^2}{l_1} \ddot{\phi} \Rightarrow x = l_1 - \frac{l_2^2}{l_1} \Rightarrow x = 5.3 - \frac{2.15^2}{5.3} \Rightarrow x = 4.43 \text{ m}$$

Θεωρώντας ότι το έλασμα επεκτείνεται κατά μήκος του ενεργού μήκους αγκύρωσης L_e προκύπτει για τη θέση της απόληξης του ελάσματος ότι:

$$x_{\text{ap} \delta l \text{ h} x \text{ h} V} = x_{(M=0)} - L_e \Rightarrow x_{\text{ap} \delta l \text{ h} x \text{ h} V} = 4430 - 229 \Rightarrow x_{\text{ap} \delta l \text{ h} x \text{ h} V} = 4201 \text{ mm}$$

Άρα η απόληξη του ελάσματος βρίσκεται στο σημείο $x = 4.210 \text{ m}$

Έπειτα υπολογίζεται η τιμή της καμπτικής ροπής σχεδιασμού $M_{Sd}^{ap \delta l}$ (η οποία προκαλεί εφελκυσμό στο πέλμα όπου επικολλάται το υλικό) στη θέση που απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

$$M_{Sd}^{ap \delta l} = M(x = 4.201 \text{ m}) = \frac{-33' \cdot 4.201^2}{2} + \frac{\alpha 33' \cdot 5.3}{\xi} - \frac{33' \cdot 2.15^2}{2' \cdot 5.3} \ddot{\phi} \cdot 4.201 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_{Sd}^{ap \delta l} = -291.2 + (87.45 - 14.39) \cdot 4.201 \Rightarrow M_{Sd}^{ap \delta l} = 15.72 \text{ kNm}$$

Για την αντίστοιχη ροπή αντοχής στην ίδια θέση, $M_{Rd}^{ap \delta l}$, ισχύει ότι:

$$\frac{2}{3} M_{Rd}^{ap \delta l} = \frac{2}{3} \cdot 55.3 = 37 \text{ kNm}$$

$$\text{Άρα } M_{Sd}^{ap \delta l} < \frac{2}{3} M_{Rd}^{ap \delta l}$$

$$V(x) = -q_d x + \frac{q_d l_1}{2} - \frac{q_d l_2^2}{2l_1}$$

$$\max V = |V_2^l| = V(x = 5.30) = \left| -33' \cdot 5.30 + \frac{33' \cdot 5.30}{2} - \frac{33' \cdot 2.15^2}{2' \cdot 5.30} \right| = 101.84 \text{ kNm}$$

Τέλος, υπολογίζονται είναι οι τιμές της τέμνουσας σχεδιασμού $V_{Sd}^{ap \delta l}$ και της τέμνουσας που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα $V_{Rd,c}^{ap \delta l}$ στην θέση όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

$$V_{Sd}^{ap \delta l} = V(x = 4.201) = -33' \cdot 4.201 + \frac{33' \cdot 5.30}{2} - \frac{33' \cdot 2.15^2}{2' \cdot 5.30} = -65.57 \text{ kNm}$$

$$V_{Rd,c}^{ap \delta l} = V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \times \min(2, 1.2 + 40r_l) \times \max(1, 1.6 - d)] \times b \times d$$

Έστω $A_s : 3\Phi 20 \rightarrow \rho_l = 0.0078 < 0.02$, $\tau_{Rd} = 220 \text{ MPa}$, C16/20 και $d = 480 \text{ mm}$

Άρα η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$V_{Rd,c}^{ap \delta l} = V_{Rd1} = [220 \times \min(2, 1.2 + 40' \cdot 0.0078) \times \max(1, 1.6 - 0.481)] \times 0.25 \times 0.48 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{Rd,c}^{ap \delta l} = [220 \times 1.512 \times 1.119] \times 0.25 \times 0.48 \Rightarrow V_{Rd,c}^{ap \delta l} = 44.77 \text{ kN}$$

$$\text{Άρα } V_{Sd}^{ap \delta l} > V_{Rd,c}^{ap \delta l}$$

Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ., αφού το παραπάνω κριτήριο δεν ικανοποιείται, απαιτείται πρόσθετος εξωτερικός εξοπλισμός διάτμησης που θα αναλάβει τέμνουσα (εξίσωση 5.15).

Επίσης, σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ., το πλήθος των στρώσεων δεν είναι σκόπιμο να ξεπερνά το 3 για ελάσματα και το 5 για εύκαμπτα υφάσματα, εκτός αν διατίθεται σχετική τεκμηρίωση που επιτρέπει τη χρήση περισσότερων στρώσεων. Επίσης, το πάχος των ελασμάτων δεν είναι σκόπιμο να ξεπερνά τα 4 mm ή 2% του πλάτους του ελάσματος.

Η απόσταση του υλικού ενίσχυσης από τις ακμές της διατομής σκυροδέματος συνιστάται να μην υπερβαίνει το πάχος της επικάλυψης της πλησιέστερης προς την ακμή παράλληλης ράβδου του υφιστάμενου οπλισμού.

Στις περιπτώσεις χρήσης περισσότερων παραλλήλων λωρίδων (συνήθως στην περίπτωση πλακών), η μεταξύ τους απόσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3πλάσιο του πάχους του στοιχείου και του $0,10 l_o$, όπου l_o είναι η απόσταση των σημείων μηδενισμού της ροπής κάμψης κατά μήκος του στοιχείου.

Στις περιπτώσεις ενίσχυσης στο μέσο ανοίγματος, το υλικό ενίσχυσης πρέπει να επεκτείνεται και να αγκυρώνεται κοντά στις στηρίξεις. Στην περίπτωση ενίσχυσης στην περιοχή της στήριξης δοκών ή πλακών, το υλικό ενίσχυσης επεκτείνεται και αγκυρώνεται στις θλιβόμενες περιοχές σε μήκος περίπου του 1 m, εντός αυτών.

Άρα η εξίσωση (5.13) γίνεται:

$$V_{Sdj} = \frac{A_j s_{jd}}{A_{so} f_{ydo} + A_j s_{jd}} V_{Sd}^{apol} = \frac{250 \cdot 0.5 \cdot 195.83}{615.44 \cdot 191.3 + 250 \cdot 0.5 \cdot 195.83} 65.57 = 11.26 \text{ kN}$$

$$\text{όπου } f_{ydo} = \frac{220}{1.15} = 191.3 \text{ MPa}$$

Έστω για τον εξωτερικό εξοπλισμό διάτμησης S 235, $b = 25 \text{ mm}$ και $t = 1 \text{ mm}$ τότε για τον υπολογισμό της απόστασης των λωρίδων ισχύει ότι:

$$V_{Sdj} = V_{wd} = 0.9 \cdot d \cdot f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} \cdot \frac{A_{sw}}{s} = \frac{11.26}{0.9 \cdot 0.5005 \cdot 195.83} \cdot \frac{A_{sw}}{s}$$

$$\frac{2 \cdot 25 \cdot 1}{s} = 0.128 \cdot \frac{A_{sw}}{s} \quad \frac{A_{sw}}{s} = 390 \text{ mm}$$

Απαιτείται έλεγχος για τη μέγιστη απόσταση λωρίδων:

$$V_{Rd2} = 0.5 \max \left\{ \frac{f_{ck}}{200}, 0.7 \right\} \cdot \frac{16000}{200 \cdot 1.5} \cdot b_w \cdot z = 0.5 \max \left\{ \frac{f_{ck}}{200}, 0.7 \right\} \cdot \frac{16000}{200 \cdot 1.5} \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.48 \cdot \frac{A_{sw}}{s}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = 0.5 \cdot 0.62 \cdot \frac{16000}{1.5} \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.48 \cdot \frac{A_{sw}}{s} \quad V_{Rd2} = 414.7 \text{ KN}$$

$$\frac{2}{3} V_{Rd2} = 276.47 > V_{Sd} = 95.7 > \frac{V_{Rd2}}{5} = 82.15 \text{ @ } s_{\max} \leq \min(0.6d, 300 \text{ mm})$$

$$s_{\max} \leq \min(0.6 \cdot 480, 300 \text{ mm}) \quad s_{\max} \leq \min(288, 300 \text{ mm}) \quad s_{\max} = 280 \text{ mm}$$

Επομένως, η απαιτούμενη απόσταση λωρίδων $s = 390 \text{ mm}$ είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη απόσταση λωρίδων, $s_{\max} = 280 \text{ mm}$.

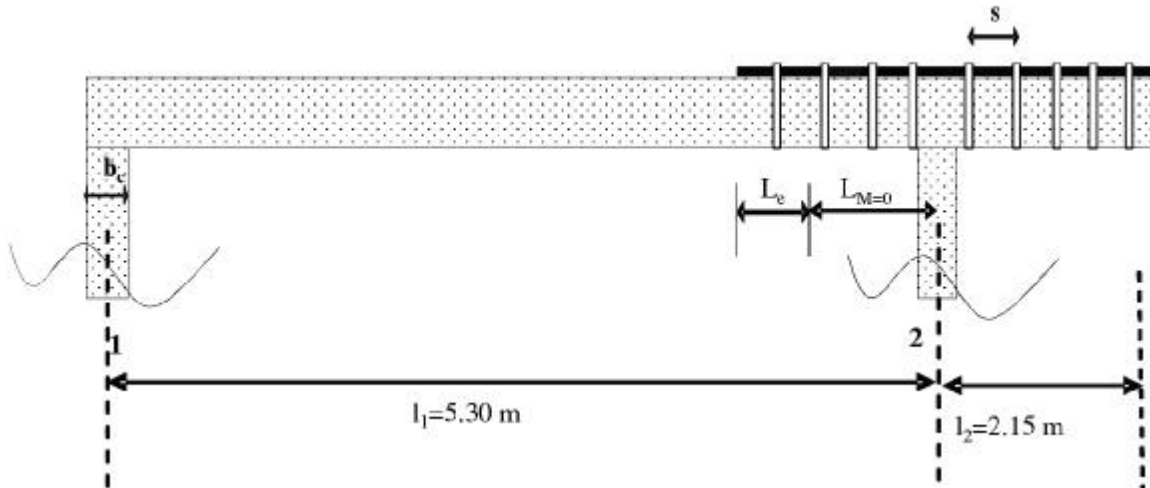
Έτσι τώρα επιλέγεται νέο έλασμα μικρότερου πλάτους και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί. Έστω για το νέο έλασμα, $b = 15 \text{ mm}$, και $t = 1 \text{ mm}$ οπότε για τον υπολογισμό της απόστασης των λωρίδων ισχύει ότι:

$$V_{Sdj} = V_{wd} = 0.9 \cdot d' \cdot f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw}}{s} \quad \text{or} \quad s = 0.9 \cdot d' \cdot f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw}}{V_{wd}}$$

$$\text{or} \quad s = 0.9 \cdot 0.5005 \cdot 195.83 \cdot \frac{2 \cdot 15 \cdot 1}{11.26} \quad \text{or} \quad s = 235 \text{ mm} < s_{\max} \quad \text{O.K.}$$

Τώρα, η απαιτούμενη απόσταση λωρίδων $s = 235 \text{ mm}$ είναι μικρότερη από τη μέγιστη απόσταση λωρίδων, $s_{\max} = 280 \text{ mm}$.

Επομένως τοποθετούνται εξωτερικά μεταλλικά ελάσματα $b = 15 \text{ mm}$ με $t = 1 \text{ mm}$ σε απόσταση $s = 235 \text{ mm}$ (Σχήμα 32).



Σχήμα 32: Τοποθέτηση εξωτερικών μεταλλικών ελασμάτων μετά τους υπολογισμούς [4].

5.2. Παράδειγμα εφαρμογής: Καμπτική ενίσχυση πλάκας προβόλου με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα και σύνθετα υλικά

Στο δεύτερο παράδειγμα εξετάζεται η ενίσχυση μιας πλάκας προβόλου με επικολλητά ελάσματα από:

- (α) χάλυβα
- (β) σύνθετα υλικά

5.2.1. Παρουσίαση προβλήματος

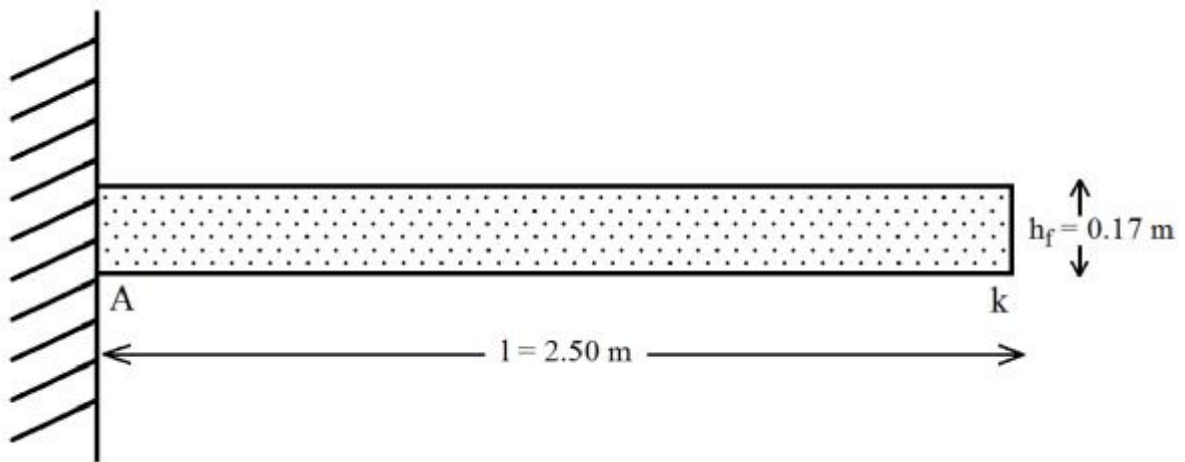
Σε μία υφιστάμενη κατασκευή από Οπλισμένο Σκυρόδεμα υπάρχει πλάκα πρόβολος συνολικού μήκους $l = 2.50$ m. Το πάχος της πλάκας είναι $h_f = 0.17$ m και είναι οπλισμένη με ράβδους Φ8/200 (mm) στο άνω πέλμα (Σχήμα 33).

Εκτός από το ίδιο βάρος του σκυροδέματος (ειδικό βάρος 25 kN/m³), η πλάκα φέρει επιστρώσεις βάρους 1.5 kN/m². Τα κινητά φορτία είναι 5 kN/m². Θεωρούμε επικάλυψη οπλισμού της πλάκας προβόλου $d_1 = 2$ cm

Ποιότητες υλικών: σκυρόδεμα C16 και χάλυβας S400.

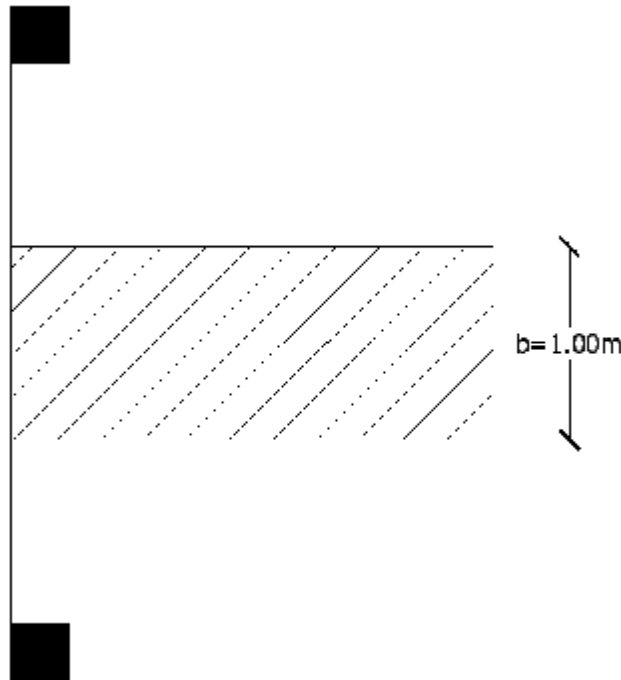
- Να γίνει έλεγχος επάρκειας της πλάκας για τα δεδομένα φορτία.
- Εάν η πλάκα δεν επαρκεί να σχεδιαστεί λύση επέμβασης με λάμες: (α) από χάλυβα (β) από σύνθετα υλικά.

Να γίνουν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί και σκαριφήματα της επέμβασης.



Σχήμα 33: Πλάκα πρόβολος συνολικού μήκους $l = 2.50$ m και πάχους $h_f = 0.17$ m.

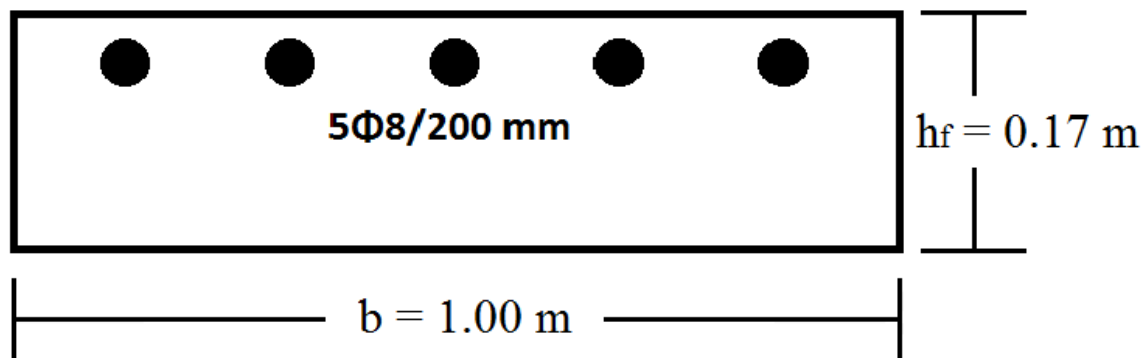
Για τον στατικό υπολογισμό και τη διαστασιολόγηση της πλάκας προβόλου θεωρείται λωρίδα πλάτους 1.00 m, οπότε ουσιαστικά λαμβάνεται μια ορθογωνική διατομή με ύψος ίσο με το πάχος της πλάκας (h_f) και πλάτος ίσο με $b = 1.00$ m και στη συνέχεια η διαδικασία είναι όμοια με αυτήν που εφαρμόζεται στις ορθογωνικές δοκούς και ο οπλισμός που υπολογίζεται αντιστοιχεί σε αυτόν που θα τοποθετηθεί στη λωρίδα 1 m.



Σχήμα 34: Κάτοψη πλάκας προβόλου, λωρίδα πλάτους 1.00 m.

5.2.2. Έλεγχος επάρκειας της κατασκευής για τα δεδομένα φορτία

Η τομή της πλάκας και η παρουσίαση των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών γίνεται στο Σχήμα 35. Αφού το πλάτος της είναι 1.00 m και είναι οπλισμένη με ράβδους $\Phi 8/200$ mm στο άνω πέλμα, τότε θα περιλαμβάνει 5 ράβδους ανά 1 m.



Σχήμα 35: Τομή πλάκας και παρουσίαση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της.

Μόνιμα φορτία G:

Ίδιο βάρος πλάκας:

Το ίδιο βάρος της πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα (slabe self weight) υπολογίζεται ως εξής:

$$g_{IB} = \text{πάχος πλάκας} \times \text{ειδικό βάρος Ο.Σ.} \times \text{πλάτος πλάκας} = 0.17 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m} = 4.25 \text{ kN/m}$$

Φορτίο επικάλυψης:

Επιστρώσεις βάρους $g_{επ.} = 1.5 \text{ kN/m}^2$

$$g_e = 1.5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 1.5 \text{ kN/m}$$

$$g = g_{IB} + g_e = 5.75 \text{ kN/m}^2$$

Κινητά φορτία Q:

$$\text{Κινητό φορτίο } q = 5 \text{ kN/m}^2 \times 1 \text{ m} = 5 \text{ kN/m}$$

Άρα το φορτίο σχεδιασμού θα είναι:

$$p = 1.35g + 1.50q = 1.35 \cdot 5.75 \text{ kN/m} + 1.50 \cdot 5 \text{ kN/m} = 7.7625 \text{ kN/m} + 7.5 \text{ kN/m} \quad \text{B}$$

$$\text{B } p = 15.2625 \text{ kN/m}$$

Στατική επίλυση:

Η τέμνουσα σχεδιασμού στο πακτωμένο άκρο θα είναι ίση με:

$$V_A = -p \cdot l = -15.2625 \text{ kN/m} \cdot 2.5 \text{ m} \quad \text{B } V_A = -38.15625 \text{ kN}$$

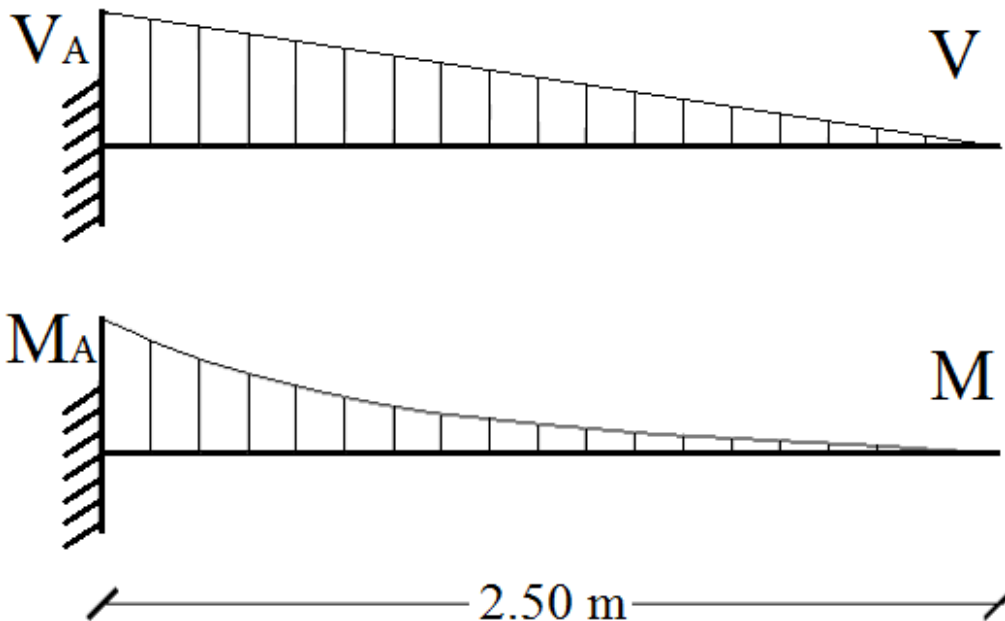
$$V(x) = -p \cdot x$$

Η ροπή σχεδιασμού στο πακτωμένο άκρο θα είναι ίση με:

$$M_A = -\frac{p \cdot l^2}{2} = -\frac{15.2625 \cdot 2.5^2}{2} \quad \text{B } M_A = -47.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M(x) = -\frac{p \cdot x^2}{2}$$

Οπότε για τις περιπτώσεις αυτές τα διαγράμματα ροπών φαίνονται στο Σχήμα 36.



Σχήμα 36: Διαγράμματα τέμνουσων δυνάμεων (πάνω) και καμπτικών ροπών (κάτω).

Σαν ροπή σχεδιασμού θα χρησιμοποιηθεί η απόλυτη τιμή της ροπής παρειάς, η οποία είναι ίση με $0.9 \times M_A$:

$$M_d = |M_{\text{par}}| = |0.9 \cdot M_A| = 42,93 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Έπειτα υπολογίζεται η ροπή των εξωτερικών δυνάμεων M_{sd} . Η ροπή αυτή χρησιμοποιείται ουσιαστικά ως ροπή σχεδιασμού. Με βάση την τιμή της ροπής των εξωτερικών δυνάμεων M_{sd} υπολογίζεται η ανηγμένη τιμή της ροπής σχεδιασμού μ_{sd} από την εξίσωση (5.8), $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 16 \text{ MPa}/1.5 = 10.66 \text{ MPa}$

Το στατικό ύψος d είναι ίσο με: $d = h_f - d_1 = 170 - 20 = 150 \text{ mm}$

Από την τιμή της ανηγμένης τιμής της ροπής σχεδιασμού μ_{sd} εντοπίζεται η τιμή του ανηγμένου ποσοστού οπλισμού ω_1 . Ο οπλισμός προκύπτει από τη σχέση (5.9):

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{g_s} = \frac{400 \text{ MPa}}{1.15} = 347.8 \text{ MPa}$$

$$5F8 \text{ @ } A_s = 5 \frac{\rho \cdot 8^2}{4} = 251.33 \text{ mm}^2$$

Άρα η σχέση (5.9) γίνεται:

$$\omega_1 = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}} = \frac{251.33 \cdot 347.8}{1000 \cdot 150 \cdot 10.66} = 0.055 \text{ @ } m_{sd} = 0.053 < m_{sd, \text{lim}} = 0.31 \text{ για χάλυβα S500.}$$

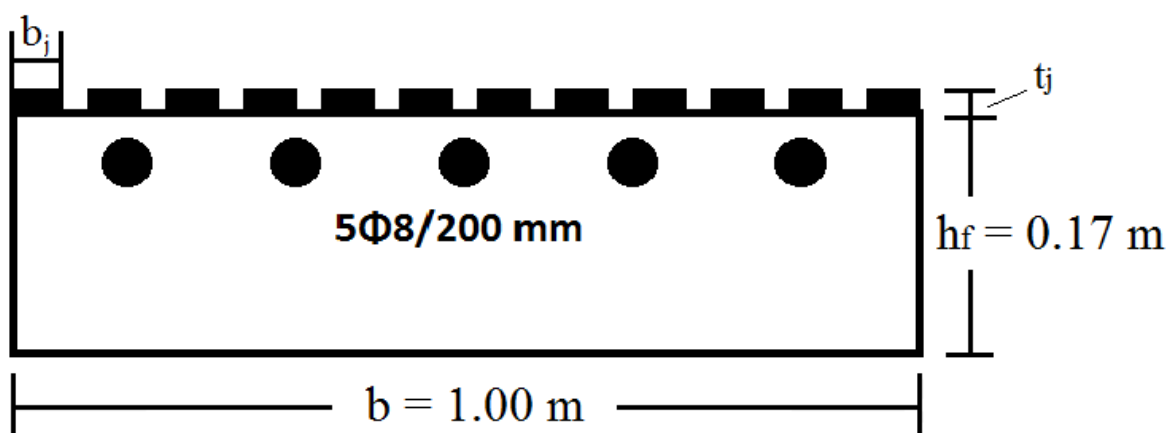
Επομένως η σχέση (5.8) γίνεται:

$$M_{sd} = m_{sd} b d^2 f_{cd} \Rightarrow M_{sd} = 0.053 \cdot 1.00 \cdot 150^2 \cdot \frac{16}{1.5} = 12720 \text{ Nm} = 12.72 \text{ kNm}$$

Επίσης για την πρόσθετη ροπή ΔM_{do} που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_d την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική) ισχύει ότι:

$$\Delta M_{do} = M_d - M_{sd} = 42.93 - 12.72 = 30.21 \text{ kNm @ Άρα χρειάζεται ενίσχυση της κατασκευής.}$$

5.2.3. Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα



Σχήμα 37: Τομή δοκού μετά την προσθήκη των χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων.

Για την ενίσχυση αρχικά επιλέγεται η χρήση επικολλητών ελασμάτων από χάλυβα πλάτους $b_j = 50$ mm τοποθετημένα ανά $b_l = 25$ mm απόσταση μεταξύ τους

Άρα το συνολικό πλάτος των ελασμάτων στην πλάκα πρόβολο πλάτους 1 m, θα είναι 675 mm. $1000 - 13 \cdot 25 \text{ mm} = 1000 - 325 = 675$ mm.

Τα χάλυβδινα επικολλητά ελάσματα είναι λεπτά χάλυβδινα ελάσματα από ανοξείδωτο χάλυβα με σύνθητες πάχος 1-1.5 mm, τα οποία επικολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια της προς ενίσχυση δοκού, και στοχεύουν στην αύξηση της ροπής αντοχής της. Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ. το πάχος των ελασμάτων δεν ξεπερνά κατά κύριο λόγο τα 4 mm και είναι μικρότερο του 2% του πλάτους του ελάσματος. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή στρώση με τη χρήση εποξειδικής κόλλας. Η αύξηση του πάχους πέραν των 4 mm οδηγεί σε πρόωρη αστοχία τη δοκό, στη διεπιφάνεια επικόλλησης και ιδιαίτερα στην ακραία περιοχή αγκύρωσής τους [11].

Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω, αφού επιλέχθηκαν ελάσματα πλάτους 50 mm, τότε το πάχος τους δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 1 mm γιατί τότε θα είναι μεγαλύτερα από 2% του πλάτους του ελάσματος.

Έστω χάλυβας S 235, με πάχος: $t_j = 1$ mm και $E = 200$ GPa

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλαιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στην συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του Κανονισμού Επεμβάσεων 2012 (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.2) [7]. Οι τιμές των $\sigma_{j,crit}$ και σ_{jd} , μπορεί να εκτιμώνται, για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Άρα η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{z s_{jd}} = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}}$$

Όπου έχει υπολογιστεί $DM_{do} = 30.21$ kNm

Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ. η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μια κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

- Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης.
- Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του.

Αν το υλικό ενίσχυσης είναι χάλυβας, ως αστοχία θεωρείται η διαρροή του, ενώ αν είναι ινοπλισμένο πολυμερές θεωρείται η θραύση του. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται $f_{jk} = f_{sy}$ και η τιμή του συντελεστή ασφαλείας υλικού $\gamma_m = \gamma_s$ προσδιορίζεται με βάση τα προβλεπόμενα στην § 4.5.3.2α. Στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται $\gamma_m = \gamma_{IOII} = 1.2$ εφαρμοζόμενων αναλόγως και των προβλέψεων της § 4.5.3.2β. Εξ άλλου, αν

χρησιμοποιούνται περισσότερες, από μία στρώσεις ΙΟΠ, η τιμή της αντοχής του υλικού θεωρείται $f'_{jk} = \psi \cdot f_{jk}$ όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων (βλ. § 6.2.3).

5.2.3.1. Έλεγχος αστοχίας ίδιου υλικού

· Έστω υλικό ενίσχυσης Χάλυβας S 235 $\rightarrow f_{jk} = 235$ MPa και $E_j = 200$ GPa

Από ΚΑΝ.ΕΠΕ για το συντελεστή ασφαλείας γ_m ισχύει ότι $\gamma_m \geq$ από τιμή που χρησιμοποιείται στις μεταλλικές κατασκευές. Λαμβάνεται $\gamma_m = 1.2$

Η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$s_{jd} = \frac{1}{g_m} f_{jk} = \frac{235}{1.2} = 195.8 \text{ MPa}$$

5.2.3.2. Έλεγχος πρόωρης αποκόλλησης υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας σύνδεσης κατά μήκος ή της αγκύρωσης των άκρων

Από ΚΑΝ.ΕΠΕ, ο συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος γ_{Rd} μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.2. Επίσης, για τη συγκεκριμένη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω προσεγγιστική σχέση (5.14) (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.3) ή οποία έχει περιγραφεί στο προηγούμενο παράδειγμα.

Μετά από αντικατάσταση στις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$t_b^{\text{apok}} @ f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 0.3 \cdot 16^{2/3} = 1.905 \text{ MPa}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm}}{2 \cdot 1.905 \text{ MPa}}} \quad \text{P} \quad L_e = 229 \text{ mm}$$

$$b = b_w b_L = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_j}{b_w}}{1 + \frac{b_j}{b_w}}} \cdot 1 = \sqrt{\frac{2 - \frac{b}{b}}{1 + \frac{b}{b}}} = \sqrt{\frac{2 - 1}{1 + 1}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$s_{j,crit} = b \frac{t_b^{\text{apok}}}{t_j} L_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1.905 \text{ MPa}}{1 \text{ mm}} 229 \text{ mm} = 308.5 \text{ MPa}$$

$$\text{Άρα η εξίσωση (5.13) γίνεται: } s_{jd} = \frac{s_{j,crit}}{g_{Rd}} = \frac{308.5 \text{ MPa}}{1.2} = 257 \text{ MPa}$$

Άρα μετά τους ελέγχους, η ελάχιστη τιμή είναι $s_{jd} = 195.8 \text{ MPa} \rightarrow f_{yd} = 195.8 \text{ MPa}$

Αντικαθιστούμε στην αρχική εξίσωση:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}} = \frac{30210}{0.9 \cdot 0.1705 \cdot 195.8} = 1005.47 \text{ mm}^2$$

όπου $d_j = 170.5$ mm: Στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής, μετρούμενο από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

$$\text{Όμως } A_j = b \cdot t_j \quad \text{P} \quad t_j = \frac{A_j}{b} \quad \text{P} \quad t_j = \frac{1005.47 \text{ mm}^2}{675 \text{ mm}} \quad \text{P} \quad t_j \gg 1.489 \text{ mm}$$

Η διαφορά αρχικής επιλογής ($t_j = 1 \text{ mm}$) και τελικού αποτελέσματος ($t_j = 1.489 \text{ mm}$) είναι μεγαλύτερη από 10%. Άρα το αποτέλεσμα δεν γίνεται δεκτό και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία των υπολογισμών.

Επιλέγεται εκ νέου η χρήση επικολλητών ελασμάτων από χάλυβα πλάτους $b_j = 100 \text{ mm}$ τοποθετημένα ανά $b_l = 50 \text{ mm}$ απόσταση μεταξύ τους

Άρα το συνολικό πλάτος των ελασμάτων στην πλάκα πρόβολο πλάτους 1 m , θα είναι 700 mm . $1000 - 6 \cdot 50 \text{ mm} = 1000 - 300 = 700 \text{ mm}$.

Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω, αφού επιλέχθηκαν ελάσματα πλάτους 100 mm , τότε το πάχος τους δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 2 mm γιατί τότε θα είναι μεγαλύτερα από 2% του πλάτους του ελάσματος.

Έστω χάλυβας S 235, με πάχος: $t_j = 1.5 \text{ mm}$ και $E = 200 \text{ GPa}$

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλαιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στην συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του Κανονισμού Επεμβάσεων 2012 (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.2). Οι τιμές των $\sigma_{j,crit}$ και σ_{jd} , μπορεί να εκτιμώνται, για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Άρα η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{z s_{jd}} = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}}$$

Όπου έχει υπολογιστεί $DM_{do} = 30.21 \text{ kNm}$

5.2.3.3. Έλεγχος αστοχίας ίδιου υλικού

· Έστω υλικό ενίσχυσης Χάλυβας S 235 $\rightarrow f_{jk} = 235 \text{ MPa}$ και $E_j = 200 \text{ GPa}$

Από ΚΑΝ.ΕΠΕ για το συντελεστή ασφαλείας γ_m ισχύει ότι $\gamma_m \geq$ από τιμή που χρησιμοποιείται στις μεταλλικές κατασκευές. Λαμβάνεται $\gamma_m = 1.2$

Η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$s_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} f_{jk} = \frac{235}{1.2} = 195.8 \text{ MPa}$$

5.2.3.4. Έλεγχος πρόωρης αποκόλλησης υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας σύνδεσης κατά μήκος ή της αγκύρωσης των άκρων

Από ΚΑΝ.ΕΠΕ, ο συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος γ_{Rd} μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.2. Επίσης, για τη συγκεκριμένη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω προσεγγιστική σχέση (5.14) (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.3) ή οποία έχει περιγραφεί στο προηγούμενο παράδειγμα.

Μετά από αντικατάσταση στις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$t_b^{\text{apok}} @ f_{cm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 0.3 \cdot 16^{2/3} = 1.905 \text{ MPa}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{cm}}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 1.5 \text{ mm}}{2 \cdot 1.905 \text{ MPa}}} \quad \text{P} \quad L_e = 280 \text{ mm}$$

$$b = b_w b_L = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_j}{b_w}}{1 + \frac{b_j}{b_w}}} \cdot 1 = \sqrt{\frac{2 - \frac{b}{b}}{1 + \frac{b}{b}}} = \sqrt{\frac{2 - 1}{1 + 1}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$s_{j,crit} = b \frac{t_b^{\text{apok}}}{t_j} L_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1.905 \text{ MPa}}{1.5 \text{ mm}} 280 \text{ mm} = 251.44 \text{ MPa}$$

$$\text{Άρα η εξίσωση (5.13) γίνεται: } s_{jd} = \frac{s_{j,crit}}{g_{Rd}} = \frac{251.44 \text{ MPa}}{1.2} = 209.54 \text{ MPa}$$

Άρα μετά τους ελέγχους, η ελάχιστη τιμή είναι $s_{jd} = 195.8 \text{ MPa} \rightarrow f_{yd} = 195.8 \text{ MPa}$

Αντικαθιστούμε στην αρχική εξίσωση:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}} = \frac{30210}{0.9 \cdot 0.1705 \cdot 195.8} = 1005.47 \text{ mm}^2$$

όπου $d_j = 170.5 \text{ mm}$: Στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής, μετρούμενο από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

$$\text{Όμως } A_j = b \cdot t_j \quad \text{P} \quad t_j = \frac{A_j}{b} \quad \text{P} \quad t_j = \frac{1005.47 \text{ mm}^2}{700 \text{ mm}} \quad \text{P} \quad t_j \approx 1.44 \text{ mm}$$

Η διαφορά αρχικής επιλογής ($t_j = 1.5 \text{ mm}$) και τελικού αποτελέσματος ($t_j = 1.44 \text{ mm}$) είναι 4% άρα μικρότερη από 10%. Άρα το αποτέλεσμα γίνεται δεκτό και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία των υπολογισμών.

5.2.3.5. Ειδικός έλεγχος πρόωρης διατμητικής αστοχίας του αρχικού στοιχείου στην περιοχή απόληξης του ελάσματος

Λόγω της διακοπής του ελάσματος σε κάποιο σημείο, αναπτύσσεται τέμνουσα δύναμη στο άκρο του ελάσματος και πρέπει να εξετάζεται αν επαρκεί η αντοχή του σκυροδέματος για να την παραλάβει ή χρειάζεται επιπλέον διατμητικό εξωτερικό οπλισμό.

Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ., η διαδικασία ελέγχου τεκμηριώνεται με χρήση αξιόπιστων τιμών της βιβλιογραφίας. Προσεγγιστικά, πάντως, μπορεί να εφαρμόζεται το ακόλουθο κριτήριο:

$$M_{Sd}^{\text{apol}} \leq \frac{2}{3} M_{Rd}^{\text{apol}} \quad \text{και} \quad V_{Sd}^{\text{apol}} \leq V_{Rd,c}^{\text{apol}}$$

όπου

V_{Sd}^{apol} και $V_{Rd,c}^{\text{apol}}$ είναι οι τιμές της τέμνουσας σχεδιασμού και της τέμνουσας που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα (βλ. §6.2.2 του ΕΚ 2) στην θέση όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

M_{Sd}^{apol} είναι η τιμή της καμπτικής ροπής σχεδιασμού (που προκαλεί εφελκυσμό στο πέλμα όπου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης) στη θέση που απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

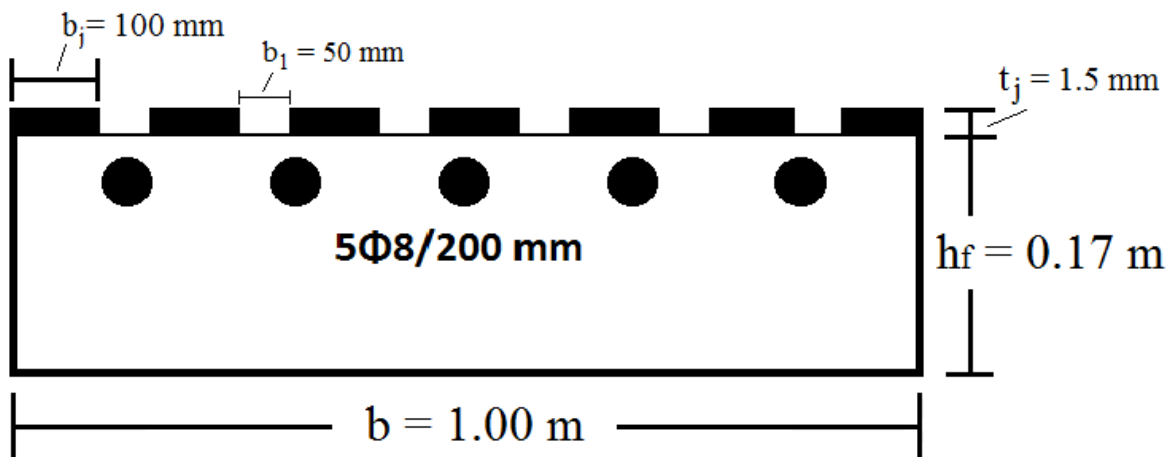
M_{Rd}^{apol} είναι η αντίστοιχη ροπή αντοχής στην ίδια θέση.

Αν το παραπάνω κριτήριο δεν ικανοποιείται απαιτείται πρόσθετος εξωτερικός οπλισμός ο οποίος θα αναλάβει τέμνουσα:

$$V_{sdj} = \frac{A_j \times \mathcal{S}_{jd}}{A_{so} \times y_{ydo} + A_j \times \mathcal{S}_{jd}} V_{sd,apol}$$

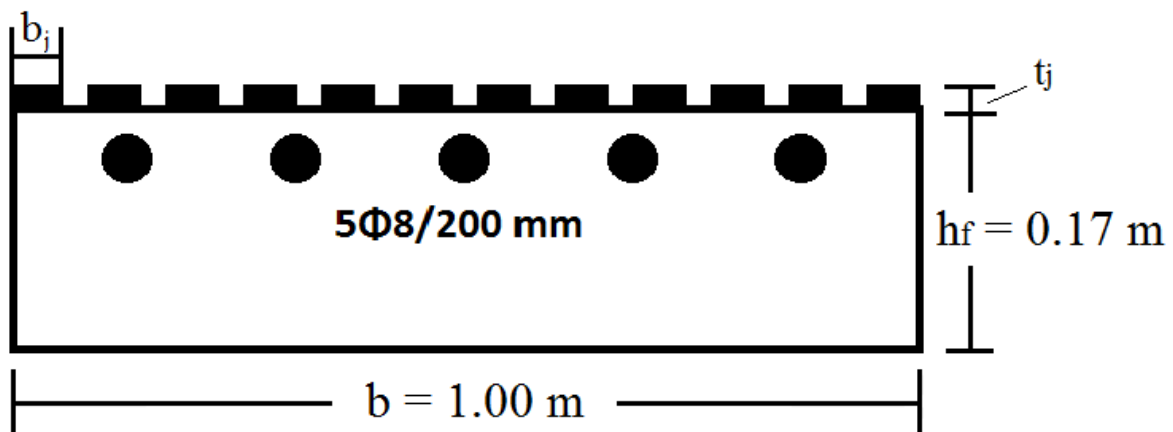
Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή είναι πλάκα πρόβολος, θεωρείται ότι υπάρχει επαρκές μήκος πίσω από τη στήριξη για την αγκύρωση του ελάσματος. Οπότε δε χρειάζεται διατμητικός έλεγχος.

Άρα επιλέγονται χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα πλάτους $b_j = 100$ mm τοποθετημένα ανά $b_1 = 50$ mm απόσταση μεταξύ τους (Σχήμα 38).



Σχήμα 38: Τομή δοκού μετά την προσθήκη των χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων πλάτους 100 mm τοποθετημένα σε απόσταση 50 mm μεταξύ τους.

5.2.4. Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά ελάσματα από σύνθετα υλικά



Σχήμα 39: Τομή δοκού μετά την προσθήκη των επικολλητών ελασμάτων από σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή).

Το πάχος t_j των ελασμάτων των σύνθετων υλικών κυμαίνεται από 0.1-0.4 mm σε αντίθεση με του χάλυβα που όπως είπαμε κυμαίνεται από 1-4 mm. Άρα, μπορούμε να

διαπιστώσουμε ότι για να καλύψει την ίδια ανάγκη ενίσχυσης ο άνθρακας, πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές στρώσεις, κάτι που οδηγεί σε μείωση αντοχής άρα ακόμη περισσότερες στρώσεις ($\psi = k^{-1/4}$ για $k \geq 4$ (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §6.2.3). Για το λόγο αυτό, αργότερα θα φανεί ότι τα σύνθετα υλικά είναι αποδοτικά μόνο για μικρή αύξηση αντοχής [11].

· Έστω υλικό ενίσχυσης ΙΟΠ G με $\varepsilon_{ju} = 2.8\%$ και $E_j = 70 \text{ GPa}$, πάχος: $t_j = 0.2 \text{ mm}$.

Επιλέγεται η χρήση επικολλητών ελασμάτων από σύνθετα υλικά πλάτους $b_j = 50 \text{ mm}$ τοποθετημένα ανά $b_l = 25 \text{ mm}$ απόσταση μεταξύ τους.

Άρα το συνολικό πλάτος των ελασμάτων στην πλάκα πρόβολο πλάτους 1 m , θα είναι 675 mm . $1000 - 13 \cdot 25 \text{ mm} = 1000 - 325 = 675 \text{ mm}$.

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλαιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στην συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του Κανονισμού Επεμβάσεων 2012 (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σ8.2). Οι τιμές των $\sigma_{j,crit}$ και σ_{jd} , μπορεί να εκτιμώνται, για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Άρα η εξίσωση (5.10), όπως και στην περίπτωση των επικολλητών ελασμάτων από χάλυβα, γίνεται:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{z s_{jd}} = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}}$$

Όπου έχει υπολογιστεί $DM_{do} = 30.21 \text{ kNm}$

Σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ. η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μια κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

- Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης.
- Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αν το υλικό ενίσχυσης είναι χάλυβας, ως αστοχία θεωρείται η διαρροή του, ενώ αν είναι ινοπλισμένο πολυμερές θεωρείται η θραύση του. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται $f_{jk} = f_{sy}$ και η τιμή του συντελεστή ασφαλείας υλικού $\gamma_m = \gamma_s$ προσδιορίζεται με βάση τα προβλεπόμενα στην § 4.5.3.2α. Στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται $\gamma_m = \gamma_{IOΠ} = 1.2$ εφαρμοζομένων αναλόγως και των προβλέψεων της § 4.5.3.2β. Εξ άλλου, αν χρησιμοποιούνται περισσότερες, από μία στρώσεις ΙΟΠ, η τιμή της αντοχής του υλικού θεωρείται $f'_{jk} = \psi \cdot f_{jk}$ όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. § 6.2.3).

5.2.4.1. Έλεγχος αστοχίας ίδιου υλικού

Άρα για την περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης με επικολλητά ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, από ΚΑΝ.ΕΠΕ για το συντελεστή ασφαλείας γ_m ισχύει ότι $\gamma_m = \gamma_{IOΠ} = 1.2$.

Για τον προσδιορισμό της τιμής της χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης ισχύει η σχέση (5.16).

$$f_{jk} = E_j \cdot \epsilon_{j.crit} \quad (5.16)$$

όπου,

$$\epsilon_{j.crit} = k_v \cdot \epsilon_{j.max}, \text{ με } k_v = 0.5$$

$$\epsilon_{j.max} = \epsilon_{ju} \cdot \gamma = 2.8\% \cdot 1 > 1.5\% \Rightarrow \epsilon_{j.max} = 1.5\%$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις η (5.16) γίνεται:

$$f_{jk} = E_j \cdot \epsilon_{j.crit} = E_j \cdot k_v \cdot \epsilon_{j.max} = 70 \cdot 10^3 \cdot 0.5 \cdot \frac{1.5}{100} = 525 \text{ MPa}$$

Η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$s_{jd} = \frac{1}{g_m} f_{jk} = \frac{525}{1.2} = 437.5 \text{ MPa}$$

5.2.4.2. Έλεγχος πρόωρης αποκόλλησης υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας σύνδεσης κατά μήκος ή της αγκύρωσης των άκρων

Στα επικολητά ελάσματα από σύνθετα υλικά δεν γίνεται έλεγχος πρόωρης αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης. Ο έλεγχος αυτό γίνεται μόνο στα επικολητά ελάσματα από χάλυβα.

Άρα μετά τον έλεγχο, είναι $s_{jd} = 437.5 \text{ MPa} \rightarrow f_{yd} = 437.5 \text{ MPa}$

Αντικαθιστούμε στην αρχική εξίσωση:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}} = \frac{30210}{0.9 \cdot 1702 \cdot 437.5} = 450.78 \text{ mm}^2$$

όπου $d_j = 1702 \text{ mm}$: Στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής, μετρούμενο από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

$$\text{Όμως } A_j = b \cdot t_j \Rightarrow t_j = \frac{A_j}{b} \Rightarrow t_j = \frac{450.78 \text{ mm}^2}{675 \text{ mm}} \Rightarrow t_j \approx 0.667 \text{ mm}$$

Η διαφορά αρχικής επιλογής ($t_j = 0.2 \text{ mm}$) και τελικού αποτελέσματος ($t_j = 0.667 \text{ mm}$) είναι μεγαλύτερη από 10%. Άρα το αποτέλεσμα δεν γίνεται δεκτό και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία των υπολογισμών.

· Έστω υλικό ενίσχυσης ΙΟΠ G με $\epsilon_{ju} = 2.8\%$ και $E_j = 70 \text{ GPa}$, πάχος: $t_j = 0.2 \text{ mm}$.

Επιλέγεται η χρήση τριών ($k = 3$) στρώσεων επικολητών ελασμάτων από σύνθετα υλικά. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης, τότε το πάχος t_{jl} λαμβάνεται ίσο με $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων και t_{j1} το πάχος κάθε στρώσης. Άρα το συνολικό πάχος στη συγκεκριμένη περίπτωση θα είναι: $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1} = 1 \cdot 3 \cdot 0.2 = 0.6 \text{ mm}$. Ο μειωτικός συντελεστής ψ λαμβάνεται ίσος με 1 αφού ο αριθμός των στρώσεων είναι μικρότερος του 4 ($k = 3$).

Το πλάτος του κάθε ελάσματος θα είναι $b_j = 50 \text{ mm}$ τοποθετημένα ανά $b_l = 25 \text{ mm}$ απόσταση μεταξύ τους.

Άρα το συνολικό πλάτος των ελασμάτων στην πλάκα πρόβολο πλάτους 1 m, θα είναι 675 mm. $1000 - 13 \cdot 25 \text{ mm} = 1000 - 325 = 675 \text{ mm}$.

Άρα η εξίσωση (5.10), όπως και στην περίπτωση των επικολλητών ελασμάτων από χάλυβα, γίνεται:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{z s_{jd}} = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}}$$

Όπου έχει υπολογιστεί $DM_{do} = 30.21 \text{ kNm}$

5.2.4.3. Έλεγχος αστοχίας ίδιου υλικού

Άρα για την περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης με επικολλητά ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, από ΚΑΝ.ΕΠΕ για το συντελεστή ασφαλείας γ_m ισχύει ότι $\gamma_m = \gamma_{IOΠ} = 1.2$.

Για τον προσδιορισμό της τιμής της χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης ισχύει η σχέση (5.16).

$$f_{jk} = E_j \cdot e_{j.crit} \quad (5.17)$$

όπου,

$$e_{j.crit} = k_v \cdot e_{j.max}, \text{ με } k_v = 0.5$$

$$e_{j.max} = e_{ju} \cdot \chi = 2.8\% \cdot \chi > 1.5\% \Rightarrow e_{j.max} = 1.5\%$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις η (5.16) γίνεται:

$$f_{jk} = E_j \cdot e_{j.crit} = E_j \cdot k_v \cdot e_{j.max} = 70 \cdot 10^3 \cdot 0.5 \cdot \frac{1.5}{100} = 525 \text{ MPa}$$

Η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$s_{jd} = \frac{1}{g_m} f_{jk} = \frac{525}{1.2} = 437.5 \text{ MPa}$$

Αντικαθιστούμε στην αρχική εξίσωση:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}} = \frac{30210}{0.9 \cdot 1702 \cdot 437.5} = 450.78 \text{ mm}^2$$

όπου $d_j = 1702 \text{ mm}$: Στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής, μετρούμενο από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

$$\text{Όμως } A_j = b \cdot t_j \Rightarrow t_j = \frac{A_j}{b} \Rightarrow t_j = \frac{450.78 \text{ mm}^2}{675 \text{ mm}} \Rightarrow t_j \approx 0.667 \text{ mm}$$

Η διαφορά αρχικής επιλογής ($t_j = 0.6 \text{ mm}$) και τελικού αποτελέσματος ($t_j = 0.667 \text{ mm}$) είναι περίπου 10%. Άρα το αποτέλεσμα δεν γίνεται δεκτό και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία των υπολογισμών.

· Έστω υλικό ενίσχυσης ΙΟΠ G με $\varepsilon_{ju} = 2.8\%$ και $E_j = 70 \text{ GPa}$, πάχος: $t_j = 0.2 \text{ mm}$.

Επιλέγεται η χρήση τριών ($k = 3$) στρώσεων επικολλητών ελασμάτων από σύνθετα υλικά. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης, τότε το πάχος t_{jI} λαμβάνεται ίσο με $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{jI}$, όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών

στρώσεων και t_{jI} το πάχος κάθε στρώσης. Άρα το συνολικό πάχος στη συγκεκριμένη περίπτωση θα είναι: $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{jI} = 1 \cdot 3 \cdot 0.2 = 0.6 \text{ mm}$. Ο μειωτικός συντελεστής ψ λαμβάνεται ίσος με 1 αφού ο αριθμός των στρώσεων είναι μικρότερος του 4 ($k = 3$).

Το πλάτος του κάθε ελάσματος θα είναι $b_j = 50 \text{ mm}$ τοποθετημένα ανά $b_I = 20 \text{ mm}$ απόσταση μεταξύ τους.

Άρα το συνολικό πλάτος των ελασμάτων στην πλάκα πρόβολο πλάτους 1 m, θα είναι 720 mm. $1000 - 14 \cdot 20 \text{ mm} = 1000 - 280 = 720 \text{ mm}$.

Άρα η εξίσωση (5.10), όπως και στην περίπτωση των επικολλητών ελασμάτων από χάλυβα, γίνεται:

$$A_j = \frac{DM_{do}}{z s_{jd}} = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}}$$

Όπου έχει υπολογιστεί $DM_{do} = 30.21 \text{ kNm}$

5.2.4.4. Έλεγχος αστοχίας ίδιου υλικού

Άρα για την περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης με επικολλητά ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, από ΚΑΝ.ΕΠΕ για το συντελεστή ασφαλείας γ_m ισχύει ότι $\gamma_m = \gamma_{IOP} = 1.2$.

Για τον προσδιορισμό της τιμής της χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης ισχύει η σχέση (5.16).

$$f_{jk} = E_j \cdot e_{j.crit} \quad (5.18)$$

όπου,

$$e_{j.crit} = k_v \cdot e_{j.max}, \text{ με } k_v = 0.5$$

$$e_{j.max} = e_{ju} \cdot \chi = 2.8\% \cdot 1 > 1.5\% \text{ } \Rightarrow e_{j.max} = 1.5\%$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις η (5.16) γίνεται:

$$f_{jk} = E_j \cdot e_{j.crit} = E_j \cdot k_v \cdot e_{j.max} = 70 \cdot 10^3 \cdot 0.5 \cdot \frac{1.5}{100} = 525 \text{ MPa}$$

Η εξίσωση (5.10) γίνεται:

$$s_{jd} = \frac{1}{g_m} f_{jk} = \frac{525}{1.2} = 437.5 \text{ MPa}$$

Αντικαθιστούμε στην αρχική εξίσωση:

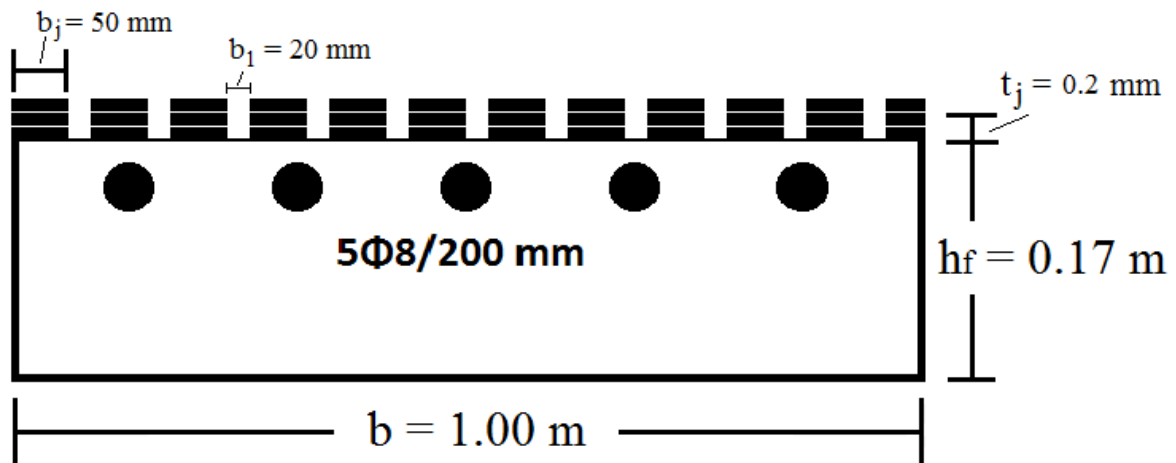
$$A_j = \frac{DM_{do}}{0.9 d_j s_{jd}} = \frac{30210}{0.9 \cdot 1702 \cdot 437.5} = 450.78 \text{ mm}^2$$

όπου $d_j = 1702 \text{ mm}$: Στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής, μετρούμενο από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

$$\text{Όμως } A_j = b \cdot t_j \text{ } \Rightarrow t_j = \frac{A_j}{b} \text{ } \Rightarrow t_j = \frac{450.78 \text{ mm}^2}{720 \text{ mm}} \text{ } \Rightarrow t_j \gg 0.626 \text{ mm}$$

Η διαφορά αρχικής επιλογής ($t_j = 0.6 \text{ mm}$) και τελικού αποτελέσματος ($t_j = 0.626 \text{ mm}$) είναι περίπου 4%, άρα μικρότερη από 10%. Άρα το αποτέλεσμα γίνεται δεκτό και δεν χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία των υπολογισμών.

Άρα επιλέγεται για την ενίσχυση, η προσθήκη τριών στρώσεων ($k = 3$) επικολλητών ελασμάτων από σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή) πλάτους $b_j = 50 \text{ mm}$ τοποθετημένα ανά $b_l = 20 \text{ mm}$ απόσταση μεταξύ τους (Σχήμα 40).



Σχήμα 40: Τομή δοκού μετά την προσθήκη των τριών στρώσεων επικολλητών ελασμάτων από σύνθετα υλικά, πλάτους 50 mm τοποθετημένα σε απόσταση 20 mm μεταξύ τους.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήθηκαν οι τεχνικές επισκευής και καμπτικής ενίσχυσης δοκών και πλακών οπλισμένου σκυροδέματος με πρόσθετους οπλισμούς και συγκεκριμένα επικολλητά ελάσματα από χάλυβα και ινοπλισμένα πολυμερή (FRP). Μετά από τη μελέτη της βιβλιογραφίας και την ανάλυση των παραδειγμάτων εφαρμογής, προκύπτουν κάποια ιδιαίτερος ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Η ενίσχυση μιας δοκού με επικολλητά ελάσματα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να αυξήσει την καμπτική της αντοχή με την τοποθετησή τους στο εφελκόμενο πέλμα της. Γενικά, η διαστασιολόγηση της καμπτικής ενίσχυσης με ελάσματα βασίζεται στην διαφορά υπάρχουσας και επιθυμητής αντοχής. Ένα ιδιαίτερος σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η καμπτική ενίσχυση με ελάσματα ή FRP είναι πρακτικά χρήσιμη μόνο για μικρές αυξήσεις αντοχής, ειδικά για σκυροδέματα μικρής αντοχής.

Κατά την καμπτική ενίσχυση με ελάσματα, πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες. Ένας είναι το όριο θραύσης του σκυροδέματος από θλίψη. Ο συγκεκριμένος παράγοντας είναι άκρως σημαντικός γιατί δε υπάρχει δυνατότητα να ξεπερασθεί. Επίσης, πολύ σημαντικό είναι το όριο αποκόλλησης του σκυροδέματος πριν το χάλυβα (μόνο για χρήση χαλύβδινων ελασμάτων), όπου αν συνεκτιμηθεί, τότε εξασφαλίζεται η πλαστική αστοχία του χάλυβα και γενικά του στοιχείου.

Ένας άλλος σοβαρός παράγοντας είναι ο αριθμός των στρώσεων, ο οποίος επηρεάζει κατά πολύ την πρακτικά δυνατή ενίσχυση καμπτικής αντοχής με ελάσματα. Ειδικά για τα σύνθετα υλικά, λόγω του μικρού τους πάχους (0.1-0.4 mm), η χρήση τους φαίνεται απαγορευτική για μεγάλες αυξήσεις αντοχής, επειδή απαιτείται μεγάλος αριθμός στρώσεων. Για μικρές αυξήσεις όμως είναι ευνοϊκή η χρήση ελασμάτων από σύνθετα υλικά (μείωση απαιτούμενου πάχους). Αντίθετα, η χρήση ελασμάτων από χάλυβα είναι ευνοϊκότερη για μεγαλύτερες αυξήσεις αντοχής. Επίσης υπάρχει μέγιστο όριο των στρώσεων ανάλογα με το υλικό. Το όριο αυτό πρακτικά είναι 3 στρώσεις για το χάλυβα και 5 στρώσεις για τα σύνθετα υλικά. Αυτό συμβαίνει γιατί η εφαρμογή του μειώνεται με κάθε στρώση. Άρα φυσιολογικά μειώνεται και η αντοχή, και πρακτικά δεν μπορεί να τοποθετηθεί μεγάλος αριθμός στρώσεων.

Σε ότι αφορά τη σύγκριση των δύο μεθόδων ενίσχυσης, ύστερα από μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, συμπεραίνουμε ότι η χρήση των FRP υπερέχει σε ότι αφορά κυρίως στην ανθεκτικότητα τους στη διάβρωση και στην ευκολία εφαρμογής τους που προέρχεται από το χαμηλό βάρος τους και το μη περιορισμένο μήκος τους. Από την άλλη πλευρά όμως η συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες και το κόστος τους, είναι αποτρεπτικοί παράγοντες, το κόστος ίσως όμως ισοσταθμίζεται με τα θετικά της μεθόδου.

Όσον αφορά την αστοχία των FRPs, ο πιο συνηθισμένος τρόπος αστοχίας είναι η αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος στα άκρα του ελάσματος ενίσχυσης. Οι περιοχές αυτές απόληξης είναι επίσης το αδύνατο σημείο για τα επικολλητά ελάσματα από χάλυβα, στα οποία επίσης αποκολλώνται τα άκρα. Τρόπος καθυστέρησης παρά αποφυγής της αστοχίας αυτής είναι η αγκύρωση των ελασμάτων, στα άκρα τους, με λωρίδες FRP ή χάλυβα ή με κοχλίες. Οι κοχλιωτές συνδέσεις βέβαια, δεν είναι κατάλληλες για δοκούς ενισχυμένες

με FRPs γιατί λόγω ασυνέχειας που προκαλούν, βοηθούν στη θραύση του ίδιου του υλικού ενίσχυσης. Τέλος, παράγοντες όπως το πάχος του ελάσματος και η ποιότητα του συγκολλητικού υλικού πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη σε κάθε εφαρμογή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- [1] Αγγαντιάρη Γ. Τα νέα Πρότυπα του ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3). Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος - Υλικό και Μόρφωση, ΤΕΕ, Αθήνα, 2006
- [2] Αντωνόπουλος Α., Ζησοπούλου Ε. Αιτίες βλαβών και τρόποι ενίσχυσης κόμβων από οπλισμένο σκυρόδεμα. 6^ο Φοιτητικό συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών 2000», Φεβρουάριος 2000, Πάτρα.
- [3] Δρίτσος Σ. Η., Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. 3^η έκδοση αναθεωρημένο, Πάτρα, 2005.
- [4] Δρίτσος Σ. Η., Καμπτική Ενίσχυση Δοκού με Επικολλητά Ελάσματα, Αριθμητική Εφαρμογή, 2014-2015.
- [5] Ζουφιάκος Κ. Επίδραση γραφενικών νανοπροσθηκών σε σύνθετο μονοστρωματικό υλικό εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.
- [6] Καΐρης Σ., Χατζηβασιλειάδης Α. Ενίσχυση Υποστυλωμάτων με Μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος. 14^ο Φοιτητικό συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών», Φεβρουάριος 2008, Πάτρα.
- [7] ΚΑΝ.ΕΠΕ. - Κανονισμός Επεμβάσεων, 2^η αναθεώρηση, Ο.Α.Σ.Π., Αθήνα, 2017.
- [8] Κατσαϊδώνης Α., Κυρίτσης Θ., Χατζηβασιλείου Α. Συμπεριφορά κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε ακραίες συνθήκες σεισμού και πυρκαγιάς. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα, 2005.
- [9] Κουντεμάνη Α. Καμπτική ενίσχυση δοκών με σύνθετα υλικά ή χαλύβδινα ελάσματα (επικολλητά ή μέσα σε αυλάκια). 14^ο Φοιτητικό συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών», Φεβρουάριος 2008, Πάτρα.
- [10] Ντζέρος Γ. Αποτίμηση υφιστάμενης πλαισιακής κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευασμένης προ του 1980 & ενίσχυσή της. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα, 2013.
- [11] Παναγιωτάτου Ε., Κωτσοβίνος Α. Καμπτική ενίσχυση δοκών με ελάσματα και FRP κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. 19^ο Φοιτητικό συνέδριο «Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών-Αφιέρωμα στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.», Φεβρουάριος 2013, Πάτρα.
- [12] Παντελής Δ. Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά: Δομή-Ιδιότητες-Τεχνολογία-Εφαρμογές, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1996.
- [13] Πενέλης Γ., Κάππος Α., Αντισεισμικές Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1990.
- [14] Πετρόπουλος Φ. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού, παρασκευή και χαρακτηρισμός συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών άνθρακα. Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, 2015, Πάτρα.
- [15] Σταθοπούλου Μ. Περίσφιξη υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής μεγάλου λόγου πλευρών με ινοπλισμένα πολυμερή. Διατριβή ΜΔΕ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2014.

- [16] Τσιούλου Θ. Ουρανία, Πειραματική Μελέτη και Αναλυτική Εκτίμηση της Συμπεριφοράς Δοκών Οπλισμένου Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Νέες Στρώσεις Σκυροδέματος, Πάτρα, 2010.
- [17] Σημειώσεις μαθήματος «Εφαρμογές προηγμένων Υλικών», Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [18] Σπυράκος, Κ., Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία, ΤΕΕ, Αθήνα, 2004.
- [19] Φαρδής Μ., Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Μέρος Ι, Εκδόσεις Παν.Πατρών, Πάτρα, 2005.

Ξενογλώσση

- [20] Agarwal, B.D., & Boutman, L.J. Analysis and Performance of Fiber Composites, Second Edition, New York, 1990, John Wiley ISBN 0 471 511528.
- [21] Frangou M., Pilakoutas K., Dritsos S., Repair/Strengthening of Columns by a Simple Localized Strengthening Technique, Proc. of the 5th International Conference on Structural Faults and Repair, Vol.3, 205-211, Edinburgh, 1993.
- [22] Hau, K.M. Experiments on concrete beams strengthened by bonding fiber reinforced plastic sheets. MSc in civil engineering thesis, Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong, 1999.
- [23] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam L., ‘FRP Strengthened RC Structures’, John Wiley and Sons, Ltd, 2001.
- [24] Wang, R.M., Zheng, S.R. & Zheng, Y.P., Polymer matrix composites and technology, 1st edition, Woodhead Publishing, China, 2011.