



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία υποστυλωμάτων  
ωπλισμένου σκυροδέματος μεγάλης κλίμακας ενισχυμένων με  
Ινωπλισμένα Πολυμερή (FRPs)»**

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΕΣΠΟΙΝΑ Β. ΑΝΤΩΝΙΟΥ**  
**ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

Επιβλέπων: Παπαδόπουλος Βησσαρίων, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	5
2	Βλάβες δομικών στοιχείων- Υλικά Επέμβασης .....	7
2.1	Βλάβες δομικών στοιχείων .....	7
2.1.1	Βλάβες σε υποστυλώματα .....	7
2.1.2	Βλάβες σε δοκούς .....	10
2.1.3	Βλάβες σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων.....	10
2.1.4	Βλάβες σε τοιχώματα.....	11
2.1.5	Βλάβες σε πλάκες .....	12
2.2	Υλικά και μέθοδοι επέμβασης- Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή.....	13
2.2.1	Εισαγωγικά .....	13
2.2.2	Πολυμερικές κόλλες – Εποξειδικές ρητίνες .....	16
2.2.3	Επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή.....	18
3	Ενισχύσεις δομικών στοιχείων .....	21
3.1	Εισαγωγικά.....	21
3.2	Ενισχύσεις υποστυλωμάτων .....	21
3.3	Ενισχύσεις τοιχωμάτων.....	25
3.4	Ενίσχυση Δοκών και Πλακών.....	26
3.4.1	Καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος .....	27
3.4.2	Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή.....	27
3.4.3	Διατμητική ενίσχυση με εξωτερικά στοιχεία.....	28
3.4.4	Ενισχύσεις με μανδύες ωπλισμένου σκυροδέματος .....	28
3.5	Ενισχύσεις Κόμβων Δοκών – Υποστυλωμάτων .....	28
4	Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία – Θεωρία Πλαστικότητας.....	31
4.1	Μέθοδος μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο.....	31
4.1.1	Βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων .....	31
4.1.2	Καταστατικοί νόμοι σκυροδέματος και χάλυβα.....	33
4.1.3	Προσομοίωση στοιχείων ωπλισμένου σκυροδέματος.....	34

4.1.4	Προσομοίωση χαλύβδινου οπλισμού .....	34
4.2	Θεωρία Πλαστικότητας.....	35
5	Περιγραφή και ανάλυση προσομοιωμάτων.....	38
5.1	Βήματα προσομοίωσης .....	38
5.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων (Module Part).....	38
5.1.2	Ιδιότητες Υλικών (Module Materials) .....	40
5.1.3	Συγκρότηση προσομοιώματος (Module Assembly).....	41
5.1.4	Δημιουργία του Βήματος (Module Step).....	41
5.1.5	Ορισμός ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων του προσομοιώματος (Module Interaction).....	42
5.1.6	Ορισμός συνοριακών συνθηκών του προσομοιώματος (Module Load) ....	45
5.1.7	Διακριτοποίηση προσομοιωμάτων (Module Mesh) .....	46
5.2	Επιλογή υλικών της παρούσας διπλωματικής εργασίας .....	47
5.2.1	Σκυρόδεμα .....	47
5.2.2	Χάλυβας- Οπλισμοί δοκιμίων.....	48
5.2.3	Πλεκτό ύφασμα με ίνες άνθρακα.....	48
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	49
7	Συμπεράσματα .....	65

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1:	Διατμητική αστοχία υποστυλώματος.....	9
Εικόνα 2-2:	Καμπτοδιατμητική αστοχία με σύνθλιψη .....	10
Εικόνα 2-3:	Βλάβες σε κόμβους πλαισίων α) σύνθλιψη κάτω παρειάς δοκού β) σύνθλιψη άνω παρειάς δοκού γ) αποδιοργάνωση κόμβου από ανακυκλιζόμενη φόρτιση (ΟΑΣΠ 2000).....	11
Εικόνα 3-1:	Περίσφιγξη με μεταλλικά επικολλητά ελάσματα. ....	22
Εικόνα 3-2:	:Παράδειγμα Τεχνική του μεταλλικού κλωβού [2] .....	23
εικόνα 3-3:	Ενδεικτική απεικόνιση άκρων μανδύα απο ωπλισμένο σκυρόδεμα [15].....	24
Εικόνα 3-4::	Μονόπλευρη ενίσχυση τοιχώματος και προσθήκη υποστυλωμάτων [15]...26	
Εικόνα 3-5:	Ενίσχυση με ολόπλευρο κλειστό μανδύα [15] .....	26
Εικόνα 5-1:	Part σκυροδέματος. ....	39

Εικόνα 5-2: Διατομή δοκιμίου όπου φαίνεται η γωνιακή καμπυλότητα .....	40
Εικόνα 5-3: Τύποι υλικών .....	40
Εικόνα 5-4: Νόμος Drucker Prager .....	41
Εικόνα 5-5: Module Step του προγράμματος.....	42
Εικόνα 5-6: Constraint manager του προγράμματος .....	42
Εικόνα 5-7: Δημιουργία περιορισμού για τους οπλισμούς σε σχέση με το σκυρόδεμα... 43	
Εικόνα 5-8: Δημιουργία περιορισμού για τους οπλισμούς σε σχέση με το σκυρόδεμα... 43	
Εικόνα 5-9: Δημιουργία περιορισμού tie για το ύφασμα CFRP. ....	44
Εικόνα 5-10: Δημιουργία περιορισμού tie για το ύφασμα CFRP. ....	44
Εικόνα 5-11: Δημιουργία πάκτωσης στη βάση του προσομοιώματος. ....	45
Εικόνα 5-12: Δημιουργία συνοριακής συνθήκης λόγω απόλυτης συμμετρίας του προσομοιώματος.....	45
Εικόνα 5-13: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος. ....	46
Εικόνα 5-14: Διακριτικοποιημένο προσομοίωμα.....	46
Εικόνα 5-15: Διακριτικοποιημένο προσομοίωμα.....	47
Εικόνα 5-16: Part του ανθρακούφασματος στο πρόγραμμα. ....	48

# 1. Εισαγωγή

Η χρήση Ινωπλισμένων Πολυμερών (FRPs) ως εξωτερικού οπλισμού περίσφιγξης σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα είναι ευρέως διαδεδομένη διεθνώς σε ποικίλες εφαρμογές, όπως:

- Κατασκευών σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον εξαιτίας κλιματολογικών συνθηκών ή ύπαρξης χημικών ουσιών,
- Ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών έναντι αυξημένων στατικών, δυναμικών ή σεισμικών φορτίων,
- Αποκατάστασης και ενίσχυσης κατασκευών που έχουν υποστεί βλάβες.

Η ανάγκη για επέμβαση σε μια κατασκευή προκύπτει από διάφορους παράγοντες και οδηγεί είτε σε επισκευή είτε σε επισκευή και ενίσχυση ως αναγκαιότητα για την αποκατάσταση και την αναβάθμιση του παρεχόμενου επιπέδου ασφάλειας των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

Διάφοροι μέθοδοι επισκευής και ενίσχυσης κατασκευών έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες με έμφαση στην εφαρμογή μανδύων σε δομικά στοιχεία, από διάφορα υλικά. Σε υποστυλώματα σχεδιασμένα με παλαιότερους κανονισμούς, τα οποία παρουσιάζουν ανεπαρκείς εγκάρσιους οπλισμούς (συνδετήρες) ή έχουν υποστεί βλάβες μετά από σεισμό, συχνά προτιμάται η τεχνική ενίσχυσης ή επισκευής μέσω περίσφιγξης με μανδύες ΙΩΠ αντί των συμβατικών μανδύων από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Η χρήση μανδύων έως μέθοδος ενίσχυσης παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι άλλων υλικών που αφορούν στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας και πλαστικότητας του υφιστάμενου στοιχείου ή κατασκευής αλλά και στην οικονομία καθώς αποτελούν μία συμφέρουσα λύση με εύκολη εφαρμογή. Διεθνώς είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση σύνθετων υλικών (Ινωπλισμένα Πολυμερή- Fiber Reinforced Polymers-FRP) ως εξωτερικού οπλισμού περίσφιγξης. Τα φύλλα εφαρμόζονται σε οριζόντια διεύθυνση όταν απαιτείται αύξηση μόνο της διατμητικής αντοχής ενώ αν συγχρόνως επιδιώκεται και η αύξηση της καμπτικής αντοχής χρησιμοποιούνται και φύλλα με κατακόρυφη διεύθυνση ινών. Η αποτελεσματικότητα του μανδύα στον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος εξαρτάται από το συνολικό πάχος του μανδύα, από την εφελκυστική αντοχή κατά την έννοια της περιμέτρου του και από τη γεωμετρία της εγκιβωτισμένης διατομής.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με ΙΩΠ και συγκεκριμένα με μανδύα ανθρακοϋφάσματος (CFRP). Η αναλυτική αυτή διερεύνηση έγινε με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπου προσομοιώθηκαν 26 δοκίμια στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS CAE (Simulia)**. Τα προσομοιώματα είναι τετραγωνικά διαστάσεων 300x300mm και ύψους 2700mm και προσομοιώνουν σε πλήρη κλίμακα ένα πραγματικό υποστυλώμα. Τον οπλισμό των δοκιμίων αποτελούν 4 ράβδοι διαμήκους οπλισμού διαμέτρου 20mm και συνδετήρες 10mm σε αποστάσεις 150mm και 100mm στις κρίσιμες περιοχές του υποστυλώματος. Οι οπλισμοί αγκυρώθηκαν κατάλληλα σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 (European Standard EN, 2005) και του ελληνικού κανονισμού (Ε.Κ.Ω.Σ./Ε.Α.Κ, 2002). Η επικάλυψη οπλισμού είναι 25 mm. Χρησιμοποιήθηκε ένα πλεκτό ύφασμα με ίνες

άνθρακα (CFRP), σχεδιασμένο για τοποθέτηση χρησιμοποιώντας την υγρή μέθοδο εφαρμογής. Το ύφασμα εφαρμόστηκε στα προσομοίωμα σε 1, 2, 3 αλλά και 4 έως 5 στρώσεις ( $t=0.165, 0.33, 0.495, 0.66$  και  $0.825\text{mm}$  αντίστοιχα). Στα προσομοιώματα εφαρμόστηκε επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση.

Εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης των υποστυλωμάτων μεγάλης κλίμακας με περίσφιξη με CFRP συναρτήσει βασικών παραμέτρων σχεδιασμού, όπως η ακτίνα καμπυλότητας των τετραγωνικών δοκιμίων, οι ιδιότητες των υλικών, ο τρόπος και οι περιοχές που περισφίγονται καθώς και το πάχος του ΙΩΠ.

## 2. Βλάβες δομικών στοιχείων- Υλικά Επέμβασης

### 2.1 Βλάβες δομικών στοιχείων

Οι βλάβες στις κατασκευές δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν έστω και αν ο σχεδιασμός γίνεται σύμφωνα με τους πιο σύγχρονους κανονισμούς και με άρτια μελέτη και κατασκευή. Το γεγονός αυτό δεν οφείλεται μόνο στην αβεβαιότητα όσον αφορά στον βαθμό αξιοπιστίας των δεδομένων και ιδιαίτερα των σεισμικών ή στις παραδοχές και τις προσεγγίσεις που υπεισέρχονται στο αναλυτικό προσομοίωμα. Η ίδια η φιλοσοφία των σύγχρονων αντισεισμικών Κανονισμών με την εφαρμογή του ικανοτικού σχεδιασμού, επιτρέπει τις βλάβες όχι μόνο στα μη φέροντα στοιχεία αλλά και στο φέροντα οργανισμό.

Όσον αφορά στις υφιστάμενες κατασκευές που δομήθηκαν πριν τη θέσπιση των νέων Κανονισμών, είναι φανερό ότι δεν μπορούν με τα σημερινά δεδομένα να θεωρηθούν ασφαλή καθώς είναι αδύνατον να πληρούν το σύνολο των απαιτήσεων που τίθενται για τα νέα κτίρια. Η άποψη αυτή ενισχύεται αν ληφθούν υπόψη ανερεύνητες παράμετροι στο παρελθόν όπως η πλαστιμότητα.

Τα κυριότερα ερωτήματα που ανακύπτουν αφορούν στην αντοχή του σκυροδέματος, στην ύπαρξη ή όχι οπλισμού στις προβλεπόμενες από τη μελέτη θέσεις, στη διάμετρο και στις αποστάσεις μεταξύ των ράβδων του οπλισμού, στην πιθανότητα ο οπλισμός να έχει υποστεί διάβρωση, καθώς και πλήθος άλλα ερωτήματα που σχετίζονται με ορατές ρωγμές, αποφλοιώσεις και άλλες ενδείξεις βλαβών που ενδεχομένως έχει υποστεί η κατασκευή.

Η δομική κατάσταση του σκυροδέματος πολύ δύσκολα μπορεί να προσδιοριστεί μόνο με οπτικό έλεγχο. Ο οπτικός έλεγχος μπορεί να εντοπίσει τις εξωτερικές ενδείξεις των προχωρημένων σταδίων της διάβρωσης, όπως είναι οι ρωγμές και η τοπική εκτίναξη του σκυροδέματος, αλλά μόνο οι πειραματικοί έλεγχοι διάγνωσης βλαβών μπορούν να παρέχουν μια πλήρη εικόνα της συνολικής κατάστασης της κατασκευής και της έκτασης των βλαβών.

Φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορούν να παρουσιάσουν τρεις τυπικούς βαθμούς βλάβης από σεισμό: απλή ρηγμάτωση, μερική αποδιοργάνωση και διακοπή συνέχειας από πλήρη αποδιοργάνωση σκυροδέματος ή βλάβη οπλισμών.

Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου αναφέρονται στοιχειωδώς οι συνηθέστερες βλάβες που πλήττουν τα δομικά στοιχεία. Η αναγνώρησή τους βοηθά στην εκτίμηση της μείωσης ικανότητας της υφιστάμενης κατασκευής με σκοπό την λήψη άμεσων μέτρων και τη επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επέμβασης.

#### 2.1.1 Βλάβες σε υποστυλώματα

Μετά από ένα σεισμό, οι βλάβες στα υποστυλώματα της κατασκευής είναι από τις πιο συχνές αλλά συγχρόνως και από τις πλέον σοβαρές. Μπορούν να οδηγήσουν σε μερική ή ολική κατάρρευση του κτιρίου, ενώ συχνά απαιτείται να ληφθούν αυστηρά μέτρα υποστυλώσεως έως ότου ολοκληρωθεί η αποκατάστασή τους. Οι βλάβες στα υποστυλώματα μπορεί να είναι καμπτικού ή διατμητικού χαρακτήρα, αναλόγως της συσχέτισης καμπτικής και διατμητικής καταπόνησης του στοιχείου.



Το μέτρο συσχέτισης καμπτικής και διατμητικής έντασης, που εκφράζει το λόγο διάτμησης, είναι:

$$\alpha_s = M/(V \cdot h)$$

Τα υποστυλώματα με μεγάλο ύψος και μικρές διαστάσεις είναι ευάλωτα σε κάμψη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι ευάλωτα σε διάτμηση.

Στα υποστυλώματα οι βλάβες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το τυπικό βαθμό της βλάβης και το χαρακτήρα των βλαβών:

➤ **Ανάλογα με το χαρακτήρα των βλαβών:**

**A) Καμπτικού τύπου**

Οι βλάβες καμπτικού τύπου παρουσιάζονται συνήθως στις άκρες των υποστυλωμάτων μιας και σε αυτές τις θέσεις παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της καμπτικής έντασης.

Σε περιπτώσεις μικρών αξονικών φορτίων στα υποστυλώματα, η βλάβη παίρνει τη μορφή οριζόντιας καμπτικής ρωγμής λόγω διαρροής του χάλυβα οπλισμού. Μπορεί επίσης να εκδηλωθεί με αποφλοιώση του σκυροδέματος στην περιοχή επικάλυψης του οπλισμού λόγω υπέρβασης της θλιπτικής αντοχής. Αυτό το είδος βλάβης παρατηρείται συχνά σε υπεροπλισμένα στοιχεία με πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των διαμήκων ράβδων, ενώ δεν εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους εφόσον περιορίζεται στην εκτός του πυρήνα περιοχή.

Σε περιπτώσεις μεγάλων θλιπτικών φορτίων, εμφανίζεται ένας σοβαρότερος τύπος βλάβης, ψαθυρού χαρακτήρα, λόγω της συνύπαρξης κάμψης και διάτμησης. Εκδηλώνεται με συνθλιψη της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος που λόγω της αναστροφής της σεισμικής δράσης, μπορεί να εμφανιστεί και στις δυο πλευρές του υποστυλώματος. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος, διαρροή ή και θράυση των συνδετήρων, βράχυνση του υποστυλώματος και λυγισμός των διαμήκων ράβδων.

Τέτοιου είδους βλάβες παρουσιάζονται σε υποστυλώματα με διατομή μικρότερη από την απαιτούμενη, με χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος, με έλλειψη οπλισμού περίσφυξης και κοντά σε κόμβους όπου συντρέχουν ισχυρές δοκοί.

Αυτός ο τύπος βλάβης είναι από τους πιο σοβαρούς που μπορεί να εμφανιστούν σε μια κατασκευή αφού πέραν της ψαθυρότητας της αστοχίας και τη μείωση της δυσκαμψίας του στοιχείου, συνεπάγεται σημαντική αδυναμία ανάληψης των κατακορύφων φορτίων.

**B) Διατμητικού τύπου**

Οι βλάβες διατμητικού τύπου εμφανίζονται σε υποστυλώματα με μικρό λόγο διάτμησης στις περιοχές με τη μεγαλύτερη διατμητική αδυναμία. Είναι ψαθυρής μορφής και εκδηλώνονται με λοξές ή χιαστί ρωγμές λόγω της αναστροφής της σεισμικής δράσης. Για τιμές του λόγου διάτμησης μικρότερες από 2,5 όπως συμβαίνει στα κοντά υποστυλώματα, οι βλάβες αυτού του τύπου είναι οι συχνότερες. Πολλές φορές εμφανίζεται συμπεριφορά κοντού υποστυλώματος σε ένα κοινό υποστυλώμα όταν εμποδίζονται οι μετακινήσεις από δύσκαμπτα στοιχεία σε ένα τμήμα του ύψους. Τέτοια συμπεριφορά συχνά παρατηρείται σε βιομηχανικούς χώρους με φεγγίτες εκατέρωθεν του υποστυλώματος.

### Γ)Καμπτοδιατμητικού τύπου

Στην περίπτωση μεγάλων αξονικών θλιπτικών φορτίων με σύγχρονη δράση κάμψης και διάτμησης εκδηλώνεται η βλάβη με εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος, διαρροή ή θραύση των συνδετήρων της περιοχής και πολλές φορές με λυγισμό των διαμήκων ράβδων. Συνήθως το γεγονός οφείλεται σε ανεπάρκεια των διαστάσεων της διατομής, έλλειψη περίσφιξης, χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος ή συνδυασμό των παραπάνω λόγων. Αυτός ο χαρακτήρας βλάβης πέρα από τη ψαθυρότητα της αστοχίας και τη σημαντική μείωση της ακαμψίας του υποστυλώματος, συνεπάγεται αδυναμία μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων. Η αδυναμία αυτή είναι δυνατόν σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά γειτονικών κατακόρυφων στοιχείων (πιθανές αλυσιδωτές αστοχίες), να οδηγήσει σε κατάρρευση της κατασκευής.

Ο σύγχρονος τρόπος διαστασιολόγησης σε διάτμηση όπου η τέμνουσα σχεδιασμού προσδιορίζεται από τις μέγιστες ροπές που μπορούν να εμφανιστούν στα άκρα του υποστυλώματος όταν δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις, αποτρέπει βλάβες αυτού του τύπου. Ο παραπάνω κανόνας δεν είναι επαρκής στα «κοντά» υποστυλώματα.

Ως ξεχωριστός τύπος διατμητικής βλάβης θεωρείται η περίπτωση όπου η αστοχία της τοιχοπλήρωσης μεταφέρεται στα υποστυλώματα του πλαισίου. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε περιπτώσεις μονόπλευρης και καλά δομημένης τοιχοπλήρωσης σφηνωμένης σε πλαίσιο με ασθενή υποστυλώματα. Σε αυτήν την περίπτωση τοιχοποιία και πλαίσιο λειτουργούν ως ένα στοιχείο.



Εικόνα 2-1: Διατμητική αστοχία υποστυλώματος [5]



Εικόνα 2-2: Καμπτοδιατμητική αστοχία με σύνθλιψη [5]

### 2.1.2 Βλάβες σε δοκούς

Οι βλάβες σε δοκούς από ωπλισμένο σκυρόδεμα προέρχονται από κατακόρυφα ή σεισμικά φορτία. Είναι συχνότερες από τις βλάβες των υποστυλωμάτων όμως λιγότερο επικίνδυνες σε ότι αφορά την ευστάθεια του φορέα σαν σύνολο, συνεπώς έπονται σε σπουδαιότητα των βλαβών που παρατηρούνται στα υποστυλώματα.

Συνήθης εικόνα αστοχίας μιας δοκού αποτελούν οι εγκάρσιες καμπτικές ρωγμές στο κάτω πέλμα. Όταν οφείλονται σε σεισμικές δράσεις, αφορούν κυρίως στην αποκάλυψη των τριχοειδών ρωγμών που έγιναν ορατές αφού διευρύνθηκαν λόγω της δράσης του σεισμού. Όταν οφείλονται σε δράση κατακόρυφων φορτίων αποτελούν ένδειξη καμπτικής ανεπάρκειας. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούνται αρκετές ρωγμές μεγάλου πλάτους συγκεντρωμένες σε μια περιοχή της δοκού όπου αναπτύσσεται η μέγιστη καμπτική ροπή και είναι ένδειξη διαρροής του εφελκυσμένου οπλισμού.

Στο άνω πέλμα της δοκού είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν καμπτικές ρωγμές λόγω σεισμού ή λόγω μακροχρόνιων δράσεων. Παρόμοιες ρωγμές εμφανίζονται κοντά στις στηρίξεις και στο κάτω πέλμα της δοκού για δύο λόγους.

Πρώτον, εξαιτίας διαρροής του εφελκυσμένου χάλυβα υπό την επίδραση σεισμικής έντασης και, δεύτερον, λόγω ανεπαρκούς αγκύρωσης των διαμήκων ράβδων και ολίσθησής τους.

Οι διατμητικές βλάβες στις περιοχές στήριξης μιας δοκού είναι πολύ συχνές μετά από έναν ισχυρό σεισμό και οδηγούν σε αστοχία ψαθυρού τύπου. Για την αποφυγή τους στους σύγχρονους Κανονισμούς ο ικανοτικός σχεδιασμός έχει ιεράρχηση γενικά και για καμπτικές και για διατμητικές ρωγμές.

### 2.1.3 Βλάβες σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων

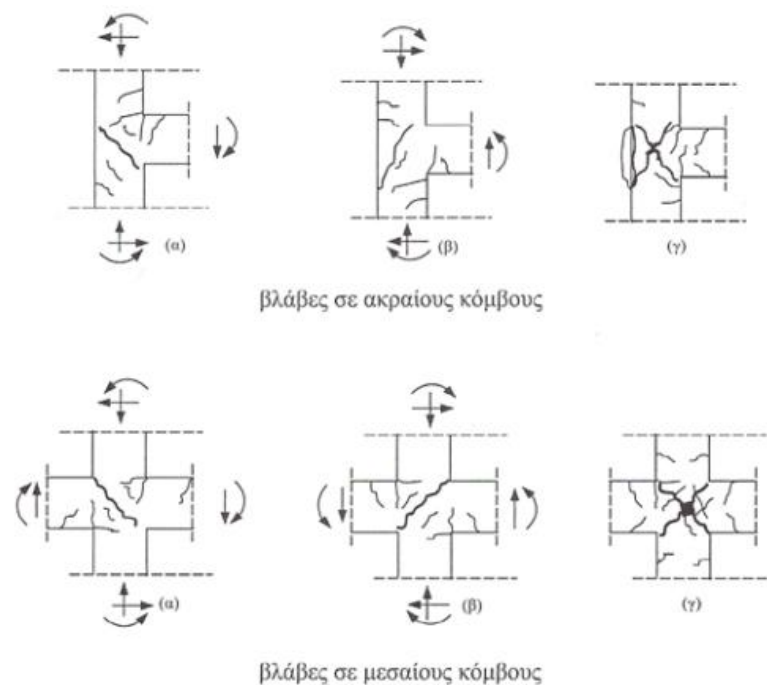
Μια από τις πιο σοβαρές βλάβες είναι αυτές που εμφανίζονται στους κόμβους των κατασκευών κι αυτό διότι υποβαθμίζεται η ακαμψία του φέροντος στοιχείου. Οι

τελευταίες μπορεί να οδηγήσουν στην πλήρη κατάρρευση της κατασκευής κατά τη διάρκεια των σεισμικών δράσεων. Οι κόμβοι δοκών - υποστλωμάτων θεωρούνται από τα πιο ευπαθή στοιχεία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Αυτό οφείλεται κυρίως στους εξής λόγους:

- Η διατμητική ένταση στους κόμβους είναι ιδιαίτερα υψηλή. [4]
- Ο σχεδιασμός των κόμβων, μέχρι και σήμερα, δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της τοπικής έντασης.
- Οι κόμβοι είναι συχνά περιοχές κακής σκυροδέτησης λόγω της μεγάλης πυκνότητας των οπλισμών.

Οι βλάβες στους κόμβους είναι από τις πλέον κρίσιμες για την ασφάλεια της ακεραιότητας του φορέα.



Εικόνα 2-3: Βλάβες σε κόμβους πλαισίων α) σύνθλιψη κάτω παρειάς δοκού β) σύνθλιψη άνω παρειάς δοκού γ) αποδιοργάνωση κόμβου από ανακυκλιζόμενη φόρτιση (ΟΑΣΠ 2000) [3]

#### 2.1.4 Βλάβες σε τοιχώματα

Τα τοιχώματα σε μια κατασκευή είναι τα στοιχεία που παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής έντασης και αυξάνουν τη δυσκαμψία της. Μετά από ένα ισχυρό σεισμό οι βλάβες σε τοιχώματα είναι εξίσου συχνές όπως και οι βλάβες σε υποστλώματα.

Οι βλάβες αυτές είναι διατμητικής ή καμπτικής μορφής.

Α) Οι διατμητικού τύπου βλάβες είναι οι περισσότερο συχνές και οι πιο σοβαρές. Εμφανίζονται με λοξά ρήγματα που λόγω της αντίστροφής τους σεισμικής δράσης τελικά εμφανίζουν μορφή χιαστί. Η σοβαρότητα αυτής της βλάβης δεν οφείλεται μόνο στη ψαθυρότητα της αστοχίας αλλά και στο γεγονός ότι μπορεί να προκληθούν εκατέρωθεν

μετακινήσεις των τριγωνικών τμημάτων του τοιχώματος που συνεπάγονται βράχυνση του συνολικού στοιχείου και πιθανή αδυναμία μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων. Κατά συνέπεια υπάρχει κίνδυνος τμηματικής ή συνολικής κατάρρευσης του δομήματος μέσα από μια αλυσιδώτη σειρά αστοχιών. Γι' αυτό το λόγο, ο σύγχρονος τρόπος σχεδιασμού των τοιχωμάτων προβλέπει τη μόρφωση ενισχύσεων στα άκρα του τοιχώματος υπό τη μορφή εμφανών υποστυλωμάτων ή κρυφουποστυλωμάτων που μπορούν να παραλάβουν το αξονικό φορτίο του τοιχώματος. [3] Έτσι ο βαθμός κινδύνου μιας τέτοιας μορφής βλάβης μειώνεται σημαντικά.

Β) Οι καμπτικού τύπου βλάβες είναι λιγότερο συχνές. Παρουσιάζονται στη βάση του τοιχώματος κοντά στη θεμελίωση, αφού σε αυτή την περιοχή παρατηρούνται οι μεγαλύτερες καμπτικές εντάσεις και είναι εμφανείς στον ισόγειο όροφο των κτηρίων, όταν έχουν κατασκευαστεί με ισχυρή θεμελίωση ή όταν διαθέτουν υπόγειο όροφο τα περιμετρικά τοιχεία του οποίου δημιουργούν συνθήκες πάκτωσης του τοιχώματος. Στην περίπτωση θεμελίωσης τοιχωμάτων σε απλά πέδιλα, οι ροπές που αναπτύσσονται στη βάση είναι πολύ μικρότερες λόγω στροφής του πεδίου, ενώ δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην αναπτυσσόμενη τέμνουσα. Έτσι οι αναπτυσσόμενες βλάβες θα είναι διαμητρικής μορφής με πιθανές αστοχίες στις συνδετήριες δοκούς θεμελίωσης.

#### 2.1.5 Βλάβες σε πλάκες

Οι βλάβες που αφορούν τα επιφανειακά στοιχεία μιας κατασκευής όπως είναι οι πλάκες, είναι εν γένει δευτερεύουσας σημασίας μιας και δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του δομήματος και συνήθως δεν υπάρχει κίνδυνος ούτε για την ίδια την πλάκα λόγω δυνατότητας μεγάλης ανακατανομής έντασης που προκύπτει από την ανάπτυξη μεμβρανικών δυνάμεων. Στην συνέχεια αναφέρονται μερικές χαρακτηριστικές μορφές βλάβης σε πλάκες.

Μετά από έναν ισχυρό σεισμό μπορεί να παρατηρηθούν διαμπερείς εγκάρσιες ρωγμές κατ' επέκταση των καμπτικών ρηγματώσεων στην παρειά στήριξης των δοκών, σαν αποτέλεσμα της συνεργασίας πλάκας - δοκού. Μια σοβαρή μορφή βλάβης των πλακών οφείλεται σε καθιζήσεις των υποστυλωμάτων και συνοδεύεται συνήθως από βλάβες των γειτονικών δοκών και ρηγματώσεις των τοιχοπληρώσεων.

Η συγκέντρωση αρκετού πλήθους ρηγματώσεων που οφείλονται σε μακροχρόνιες δράσεις απαιτούν σημαντική προσοχή, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε περιοχές μεγίστων ροπών οπότε και καταδεικνύουν καμπτική ανεπάρκεια. Οι ρωγμές που παρατηρούνται στους προβόλους και έχουν διεύθυνση παράλληλη με τον κύριο οπλισμό δεν είναι ανησυχητικές. Αντίθετα, χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής οι ρηγματώσεις με διεύθυνση κάθετη προς τον κύριο οπλισμό, που θα εμφανιστούν στο άνω πέλμα, στην παρειά στήριξης με τη δοκό.

Η διάτρηση είναι μια από τις μορφές αστοχίας που χαρακτηρίζουν τις μνηστοειδείς πλάκες, δηλαδή τις πλάκες που στηρίζονται απ' ευθείας σε υποστυλώματα, χωρίς την παρεμβολή δοκών. Η σχεδόν σημειακή στήριξη της πλάκας στα υποστυλώματα συνεπάγεται (στην περιοχή στήριξης) υψηλές τιμές τέμνουσας δύναμης, οι οποίες, σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές καμπτικής ροπής που αναπτύσσονται εκεί, ενδέχεται να οδηγήσουν την πλάκα σε ψαθυρή αστοχία. Αυτού του τύπου η αστοχία εκδηλώνεται με

τη μορφή μιας κωνικής ρωγμής, η οποία αρχικά εμφανίζεται στην εφελκυσμένη επιφάνεια της πλάκας, όπου το ίχνος της ρωγμής περιβάλλει τη διατομή του υποστύλωματος σε απόσταση συνήθως μεγαλύτερη από το πάχος της πλάκας. Η ρωγμή αυτή καταλήγει στη συμβολή της θλιβόμενης επιφάνειας της πλάκας με το υποστύλωμα προκαλώντας πλήρη διαχωρισμό των δύο δομικών στοιχείων.

## 2.2 Υλικά και μέθοδοι επέμβασης- Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή.

### 2.2.1 Εισαγωγικά

Η επέμβαση σε μεμονωμένα μέλη (δοκούς, υποστύλωματα, κόμβους και τοιχώματα), που γίνεται με κατασκευή μανδύων, θεωρείται τοπική αφού μπορεί να γίνει ακόμη και σε τμήμα του μήκους ενός μέλους. Σε αυτού του είδους τις επεμβάσεις περιλαμβάνονται όλες αυτές οι οποίες αναφέρονται σε προσθήκη νέου υλικού σε μια, δυο ή και σε όλες τις πλευρές ενός δομικού. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται ποικίλλουν ανάλογα με το είδος του δομικού στοιχείου και ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται. Η επέμβαση μπορεί να βελτιώσει την αντοχή ενός μεμονωμένου μέλους σε κάμψη και διάτμηση, τη δυσκαμψία, την πλαστιμότητα και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Το κυριότερο πρόβλημα που εισέρχεται στο σύνολο των τεχνικών που αφορούν την κατασκευή μανδύων είναι η σύνδεση μεταξύ νέων και παλαιών υλικών και η μεταφορά φορτίων στην επιφάνεια σύνδεσής τους.

Η μελέτη για επισκευή-ενίσχυση κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα οδήγησε σε πειραματισμούς με νέα υλικά προηγμένης τεχνολογίας των οποίων η συμπεριφορά αποδείχτηκε κατά ένα μεγάλο ποσοστό αρκετά ικανοποιητική έτσι ώστε τα τελευταία χρόνια η χρήση τους να γίνεται σε ένα ευρύ πεδίο κατασκευών. Τα υλικά αυτά διακρίνονται σε:

#### A) Απλά:

- Τσιμέντο
- Κονίες, ασβέστης, γύψος και οργανικά συνδετικά υλικά
- Αδρανή υλικά
- Νερό
- Χάλυβας
- Πρόσθετα βελτιωτικά για κονιάματα και σκυροδέματα
- Εποξειδικές ρητίνες
- Εποξειδικά και άλλα υλικά ενισχύσεως με ενέσεις σε φέροντα στοιχεία και σε οργανισμούς πληρώσεως.

#### B) Σύνθετα:

- Σκυρόδεμα
- Έτοιμα τσιμεντοκονιάματα σε σακιά (νέος τύπος έγχυτου σκυροδέματος)
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και εκτοξευόμενο κονίαμα
- Κονιάματα δομήσεως

- Κονιάματα με πλαστικά γαλακτώματα και σκληρυνόμενα υδατοαιωρήματα ρητίνων για επιχρίσματα
- Λεπτόρρευστος τσιμεντοπολτός και λεπτά τσιμεντοκονιάματα ενέσεων για πλήρωση ρωγμών τοιχοποιίας
- Εποξειδικό κονίαμα και σκυρόδεμα
- Ασφαλτούχα προϊόντα
- Ινωπλισμένα πολυμερή (FRP- Fiber Reinforced Polymers), τα σύνθετα αυτά υλικά αποτελούνται από συνεχείς ίνες, συνήθως άνθρακα ή γυαλιού και σπανιότερα αραμιδίου σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη.

Οι κυριότερες μέθοδοι επισκευής ή/και ενίσχυσης μιας κατασκευής είναι:

- Με έγχυτο σκυρόδεμα
- Με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete ή gunite)
- Με τσιμεντενέσεις ή με τσιμεντοκονιάματα
- Με εποξειδικές ρητίνες, εποξειδικά κονιάματα και εποξειδικά σκυροδέματα
- Με τοποθέτηση ράβδων ως ενίσχυση επιφάνειας
- Με τοποθέτηση μεταλλικών πλακών ως εξωτερική ενίσχυση
- Με μανδύες από ινωπλισμένα πολυμερή (FRP)
- Με μανδύες ωπλισμένου σκυροδέματος με χρήση βλήτρων-αναρτήρων
- Με συγκόλληση (επικόλληση) χαλυβοελασμάτων σε σκυρόδεμα (beton plaque)
- Με μορφοσίδηρο (σε υποστυλώματα)
- Με σύνθετα υλικά
- Με έγκριση της μεθόδου από αρμόδια υπηρεσία

Τα σύνθετα υλικά από ινωπλισμένα πολυμερή στα οποία κυρίως εστιάζεται αυτό το κεφάλαιο, έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινωπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινωπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης – παραμόρφωσης έως την αστοχία τους.

Τα σύνθετα υλικά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων και αποτελούν ένα είδος μόνιμου εξωτερικού τους ωπλισμού. Η σύνδεση και η συνεργασία των διαφορετικών υλικών επιτυγχάνεται μέσω εποξειδικών ρητινών. Η χρήση τους αποτελεί σήμερα μια δημοφιλή τεχνική ενίσχυσης λόγω της ευκολίας εφαρμογής τους.

Τα ινωπλισμένα πολυμερή διακρίνονται σε:

➤ **Υφάσματα, ράβδους και ελάσματα ινών άνθρακα.**

Οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη ειδική δυσκαμψία (δυσκαμψία/ πυκνότητα) σε σχέση με τις άλλες ίνες και πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη. Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής.

Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποχική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

#### ➤ **Υφάσματα ινών υάλου.**

Το κύριο χαρακτηριστικό της υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι η υάλος-E και η υάλος-S. Η υάλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμίδης, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο υάλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση.

#### ➤ **Υφάσματα ινών πολυαραμίδης (Kevlar)**

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

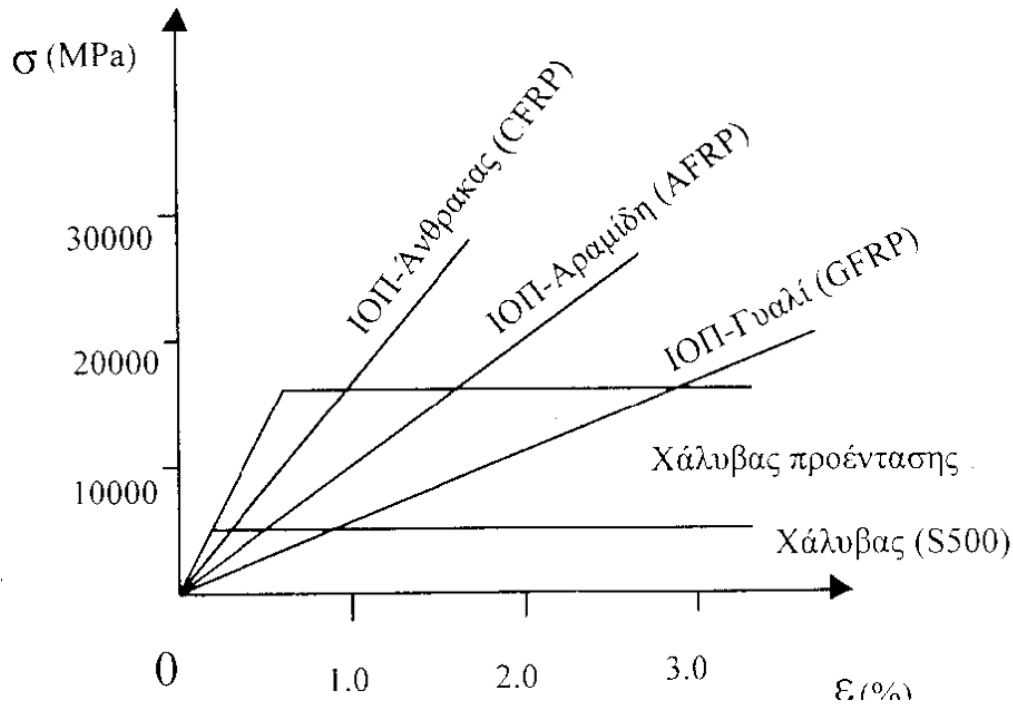
Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμίδης έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων για σύνθετα υλικά μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη για χάλυβα. Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί, τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται πλήρως ελαστικά, μέχρι την αστοχία τους. Η έλλειψη πλάστιμης 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 ωπλισμένο 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 την μορφή κλειστού μανδύα σε υποστυλώματα, η αύξηση της πλαστιμότητας αποτελεί την κύρια επιδίωξη εφαρμογής της τεχνικής.



Σχήμα 1: Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό.

### 2.2.2 Πολυμερικές κόλλες – Εποξειδικές ρητίνες

Οι πολυμερικές κόλλες είναι συγκολλητικά υλικά που δημιουργούνται από την επί τόπου ανάμειξη δύο συστατικών. Το πρώτο είναι το πολυμερές που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση (συστατικό Α) και το δεύτερο είναι ο σκληρυντής (συστατικό Β). Η ανάμειξή τους σε ένα ομοιογενές υλικό δημιουργεί ένα ισχυρό συγκολλητικό υλικό με ιδιαίτερα αυξημένες ιδιότητες.

Τα είδη των πολυμερών που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά. Όμως, για τις διαδικασίες επισκευής και ενίσχυσης των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα πλέον διαδεδομένα και ενδεδειγμένα πολυμερή είναι κυρίως οι εποξειδικές και δευτερευόντως οι πολυεστερικές ρητίνες.

Οι συνηθέστερες χρήσεις της κόλλας στο τομέα των επισκευών και ενισχύσεων είναι:

- Η συγκόλληση νωπού ή σκληρυμένου σκυροδέματος σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.
- Η συγκόλληση άλλων υλικών στο σκυρόδεμα.
- Οι αγκυρώσεις ράβδων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.
- Η επισκευή ρωγμών στο σκυρόδεμα (ρητινενέσεις).

Πλεονεκτήματα των τεχνικών σύνδεσης που βασίζονται στις πολυμερικές κόλλες σε σύγκριση με άλλα συστήματα σύνδεσης είναι ότι:

- Η κατανομή των φορτίων γίνεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια μειώνοντας έτσι τις τοπικές εντάσεις.
- Η χρήση τους επιτρέπει την πλήρη επαφή των προς σύνδεση στοιχείων χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις στο σχήμα ή την επιφάνεια επαφής τους.
- Δημιουργούν ένα αδιαπέραστο φράγμα υγρασίας.

Μειονεκτήματα των τεχνικών επεμβάσεων που χρησιμοποιούνται ρητίνες είναι:

- Ο χρόνος εργασιμότητάς τους (pot life), δηλαδή ο χρόνος που η ρευστότητα τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν, είναι μικρός.
- Τα στοιχεία που συγκολλήθηκαν θα πρέπει να παραμείνουν αδιατάρακτα για όσο χρόνο (ώρες ή ημέρες) διαρκεί η συγκόλλησή τους.
- Η μικρή αντοχή του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Η κόλλα – ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 250ο C. Γίνεται ως εκ τούτου προφανής ο κίνδυνος που δημιουργείται σε περίπτωση πυρκαγιάς και γι' αυτό απαιτείται να ληφθούν ειδικά μέτρα προστασίας των επισκευασμένων δομικών στοιχείων.
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι πολύ μικρότερο από αυτό του σκυροδέματος. Εν γένει είναι μικρότερο από το 1/10 της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του συνηθισμένου σκυροδέματος.

Οι συνηθέστερες χρήσεις της κόλλας στο τομέα των επισκευών και ενισχύσεων είναι:

- Η συγκόλληση νωπού ή σκληρυμένου σκυροδέματος σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.
- Η συγκόλληση άλλων υλικών στο σκυρόδεμα.
- Οι αγκυρώσεις ράβδων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.
- Η επισκευή ρωγμών στο σκυρόδεμα (ρητινενέσεις).

Στην πράξη, το μεγαλύτερο μερίδιο εργασιών με πολυμερικές κόλλες αφορά τις επισκευές ρωγμών με την τεχνική των ρητινενέσεων. Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής των ρητινενέσεων είναι:

- Οι κόλλες γεμίζουν το κενό της ρωγμής και δε γεφυρώνουν απλώς το άνοιγμα. Με αυτόν το τρόπο επιτυγχάνεται πλήρης συνέχεια του υλικού. Επίσης οι οπλισμοί, στην περιοχή της ρωγμής, εγκιβωτίζονται πλήρως κι έτσι προστατεύονται από κάθε διαδικασία οξειδωσης ή άλλης περιβαλλοντικής προσβολής. Επιπροσθέτως, αποκαθίστανται πλήρως η συνάφεια του οπλισμού και του περιβάλλοντος σκυροδέματος.
- Οι υψηλές αντοχές εφελκυσμού και συνάφειας των ρητίνων με το σκυρόδεμα εμποδίζουν την αύξηση του εύρους και του μήκους των ρωγμών.

- Οι κόλλες που χρησιμοποιούνται δεν είναι υλικά ευάλωτα από παράγοντες που συχνά επιδρούν δυσμενώς στην κατασκευή, όπως αλκαλικότητα, ιόντα, περιβαλλοντικές δράσεις. Εξάλλου το υλικό που βρίσκεται στο βάθος της ρωγμής δέχεται πολύ μικρότερες επιδράσεις από το υλικό που βρίσκεται στην επιφάνεια του στοιχείου.
- Όσον αφορά στη διαδικασία γήρανσης του υλικού επισκευής, είναι χαρακτηριστικό ότι οι ρητινενέσεις υπερτερούν σημαντικά έναντι των άλλων τεχνικών επισκευής ρωγμών, επειδή η μεγαλύτερη ποσότητα της ρητίνης βρίσκεται στο εσωτερικό της ρωγμής, όπου το άνοιγμα και κλείσιμο των παρειών λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών του περιβάλλοντος είναι πολύ μικρότερο απ' ό,τι στην επιφάνεια του στοιχείου.
- Ως προς το αισθητικό αποτέλεσμα της επέμβασης, θα πρέπει να τονιστεί ότι η τεχνική των ρητινενέσεων αποτελεί μοναδική ίσως διαδικασία με τόσο υψηλό βαθμό διακριτικότητας.

Όσον αφορά στα μειονεκτήματα της τεχνικής των ρητινενέσεων, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Η ανάγκη χρησιμοποίησης εξειδικευμένου και έμπειρου προσωπικού.
- Οι σοβαροί κίνδυνοι που προκύπτουν από την ανεπιτυχή εφαρμογή της μεθόδου.
- Το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας.

### 2.2.3 Επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή

#### 2.2.3.1 Χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα

Τα χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα είναι λεπτά χαλύβδινα ελάσματα από ανοξείδωτο χάλυβα με σύνηθες πάχος 1-1.5mm τα οποία επικολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα και στοχεύουν στη συμπλήρωση του ελλείμματος του προυπάρχοντος οπλισμού. Το πάχος των ελασμάτων αυτών όπως αναφέραμε είναι μικρό, δεν ξεπερνά τα 4mm και είναι μικρότερο από 2% του πλάτους του ελάσματος. Με αυτό λοιπόν το πάχος αποφεύγεται η πρόωρη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος, ιδιαίτερα στην ακραία περιοχή αγκύρωσής τους. Επιπλέον επιτυγχάνεται καλύτερη σύνδεση με το στοιχείο αφού ακολουθείται κάθε αλλαγή της επιπεδότητας του πέλματος, χωρίς να εισάγονται πρόσθετες τοπικές τάσεις στο έλασμα. Για αυτό σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερο πάχος χαλύβδινων ελασμάτων είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται ελάσματα σε περισσότερες από μία στρώσεις, αντί για ένα έλασμα μεγάλου πάχους.

Σε υποστρώματα με τη μέθοδο των επικολλητών ελασμάτων μπορούμε να πετύχουμε αύξηση αντοχής σε κάμψη και τέμνουσα, αντίσταση σε κάμψη και ενίσχυση με περίσφιξη ενεργητική ή παθητική. Διαφορετικές μέθοδοι ενίσχυσης υποστρωμάτων είναι η επικόλληση ολόκληρων φύλλων χάλυβα και η μέθοδος του μεταλλικού κλωβού.

Κύρια μειονεκτήματα της τεχνικής είναι η ευκολία διάβρωσης του χάλυβα που συχνά διαπιστώνεται εντονότερη στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων.

Η χρήση φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή (σύνθετα υλικά) αποτελεί σήμερα την πλέον σύγχρονη τεχνική στον τομέα της ενίσχυσης των κατασκευών και ουσιαστικά είναι η εξέλιξη των χαλύβδινων ελασμάτων.

#### 2.2.3.2 Φύλλα από Ινοπλισμένα Πολυμερή (Fiber Reinforced Polymer Composites)

Η χρήση φύλλων 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 επικολητών ελασμάτων αντιμετωπίζοντας επιτυχώς τις αδυναμίες αυτής της τεχνικής. Έχουν πολύ μικρό βάρος και εξαιρετικά υψηλή αντοχή, διατίθενται σε μεγάλα μήκη και δεν είναι ευαίσθητα σε διάβρωση [6].

Εξάλλου η εφαρμογή της τεχνικής είναι απλούστατη και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση της εργασίας ελάχιστος, υπερέχοντας 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.

Τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) – Fiber Reinforced Polymers (FRP) αποτελούνται από ίνες υλικών υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με θερμοσκληραινόμενη ρητίνη της οποίας τα χαρακτηριστικά δεν είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες κάτω των 60ο C. Τα υλικά αυτά διατίθενται με τη μορφή σχετικά δύσκαμπτων λωρίδων (πάχους της τάξης του 1mm) ή εύκαμπτων υφασμάτων (πάχους της τάξης του 0.1 έως 0.4mm), με τις ίνες τους να είναι σε μια (κατά κανόνα) ή σε περισσότερες διευθύνσεις. Οι ίνες των περισσότερων υλικών έχουν μεγαλύτερη αντοχή και ατένεια απ' ότι το αρχικό μαζικό υλικό. Η μικρή διάμετρος των ινών, σε σχέση με το μήκος τους, επιτρέπει αποτελεσματικότερη ενεργοποίηση των ικανοτήτων του υλικού και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς φορτίων εάν χρησιμοποιηθεί ένα υλικό εμβάπτισης που θα επιτρέπει τη συνεργασία των ινών.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι συνηθέστεροι τύποι των ινών που χρησιμοποιούνται για τα σύνθετα υλικά είναι:

- Γυαλί: Πάνω από το 90% των ινών που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση είναι ίνες γυαλιού, αφού είναι το υλικό φθηνό, εύκολο στην παραγωγή και έχει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία.
- Αραμίδιο (που συχνά αναφέρεται και ως kevlar): Χαρακτηρίζεται από υψηλή εφελκυστική αντοχή, υψηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλό βάρος. Έχει υψηλή ανθεκτικότητα τόσο σε πυρκαγιά όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης είναι απρόσβλητο από οργανικούς διαλύτες ή συμπιεστική δύναμη.

- Άνθρακας: Οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη ειδική δυσκαμψία (δυσκαμψία/ πυκνότητα) σε σχέση με τις άλλες ίνες και πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη. Επίσης είναι ανθεκτικές σε διάβρωση, ερπυσμό και κόπωση.

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. Η διαδικασία επικόλλησης των ινοπλισμένων φύλλων πολυμερών συνήθως συνιστάται από τους προμηθευτές. Τα χαρακτηριστικά των ινοπλισμένων πολυμερών εξαρτώνται κυρίως από την κατ' όγκο περιεκτικότητα τους σε ίνες.

Χρήσεις σύνθετων υλικών:

- Ενίσχυση υποστυλωμάτων με επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης και αύξηση πλαστιμότητας

Η αύξηση της πλαστιμότητας επιτυγχάνεται μέσω της τριαξονικής θλίψης που αναπτύσσεται στο στοιχείο προς ενίσχυση με περίσφιγξη από μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς. Ως αποτέλεσμα έχουμε και αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

- Αύξηση αντοχής σε κάμψη

Για την ενίσχυση κυρίως πλακών και δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, χρησιμοποιούμε επικολλητά φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την κατασκευή στην αγκύρωση του σύνθετου υλικού και στην ευθυγράμμιση των ινών του.

- Ενίσχυση σε κρούση

Στην επίδραση της κρούσης, καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει το σύνθετο υλικό με ίνες πολυαραμιίδης και εφαρμόζονται σε υποστυλώματα και βάθρα γεφυρών.

## 3. Ενισχύσεις δομικών στοιχείων

### 3.1 Εισαγωγικά

**Ενίσχυση** στοιχείου ή κατασκευής είναι το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται ώστε το στοιχείο ή η κατασκευή να αυξήσει την αντοχή του έναντι συγκεκριμένου συνδυασμού δράσεων. Στην περίπτωση που οι βλάβες προέρχονται από σεισμικές δράσεις, η ενίσχυση συνδυάζεται και με την επισκευή. Είναι δε απαραίτητη γιατί σε παρόμοια καταπόνηση της κατασκευής, αν γίνει μόνο επισκευή, είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα παρουσιαστούν οι ίδιες βλάβες με αυτές που είχαμε πριν την επισκευή. Οι μέθοδοι ενίσχυσης των κατασκευών ως συνόλου μπορούν να διακριθούν, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο σε τρεις κατηγορίες:

- I. Μέθοδοι ακαμψίας και της αντοχής της κατασκευής
- II. Μέθοδοι αύξησης της πλαστιμότητας της κατασκευής
- III. Μέθοδοι αύξησης και των δύο

### 3.2 Ενισχύσεις υποστυλωμάτων

Τα υποστυλώματα, λόγω της ιδιαίτερης σημασίας που έχουν για τον αντισεισμικό σχεδιασμό μιας υφιστάμενης κατασκευής, αποτελούν τα στοιχεία στα οποία κατά κανόνα επικεντρώνονται οι επεμβάσεις σε μια μελέτη αποτίμησης και ανασχεδιασμού. Επίσης τα υποστυλώματα, αλλά και τα κατακόρυφα στοιχεία γενικότερα, είναι τα μέλη που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό βλαβών λόγω σεισμού, εξαιτίας κυρίως των μεγάλων επιβαλλόμενων παραμορφώσεων και των αυξημένων απαιτήσεων πλαστιμότητας.

Οι βλάβες που προκαλούνται στα υποστυλώματα, μπορεί να οφείλονται σε: σεισμό, ισχυρούς ανέμους, πυρκαγιά, περιβαλλοντικές επιδράσεις ή κατασκευαστικές ατέλειες. Ο χαρακτήρας τους μπορεί να είναι καμπτικός (η βλάβη έχει τη μορφή οριζόντιας καμπτικής ρωγμής και εμφανίζεται συνήθως στη κορυφή και στη βάση των υποστυλωμάτων), διατμητικός (εδώ οι βλάβες, ψαθυρού τύπου, έχουν χιαστή μορφή και εμφανίζονται συνήθως στη μέση) και καμπτοδιατμητικός (η βλάβη εκδηλώνεται με εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος, διαρροή ή θραύση των συνδετήρων και λυγισμό των διαμηκών ράβδων). Συνεπώς, ο σκοπός των επεμβάσεων πρέπει να είναι η αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής καθώς και της πλαστιμότητας του μέλους.

Οι τεχνικές ενίσχυσης των υποστυλωμάτων μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την αύξηση ή όχι της διατομής του στοιχείου.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές στις οποίες δεν αυξάνεται η διατομή του υποστυλώματος και η ενίσχυση επιτυγχάνεται με ενεργή περίσφιγξη του στοιχείου. Στην δεύτερη κατηγορία η ενίσχυση επιτυγχάνεται με αύξηση της διατομής του υποστυλώματος με νέες στρώσεις σκυροδέματος και νέους οπλισμούς, κατασκευάζοντας ένα μανδύα γύρω από το αρχικό στοιχείο.

### Ενίσχυση υποστυλωμάτων με περίσφιξη

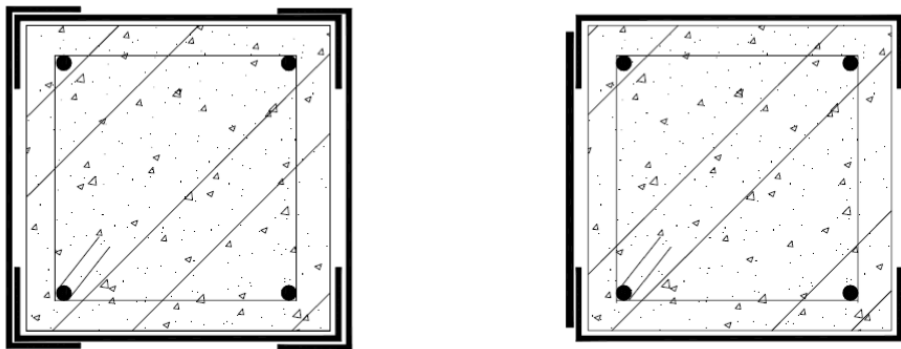
Η δράση των σύνθετων υλικών κατά την περίσφιξη του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ευνοϊκή. Ο μανδύας των σύνθετων υλικών που περιβάλλει το σκυροδέμα ενεργοποιείται μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες και παραμένουν ανενεργές σε θλιπτικές τάσεις. Στην ουσία δηλαδή προσφέρει παθητική δράση στο υποστύλωμα.

Οι τάσεις περίσφιξης έχουν ως αποτέλεσμα:

- Αύξηση κυρίως της παραμορφωσιμότητας και δευτερευόντως αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.
- Αύξηση της πλαστιμότητας, λόγω αύξησης της παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
- Παρεμπόδιση του τοπικού λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.

Η επιβολή εξωτερικής περίσφιξης σε υποστύλωματα μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- Με επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων
- Με τοποθέτηση προεντεταμένων κολλάρων
- Με τοποθέτηση μεταλλικού κλωβού
- Με τοποθέτηση ολόσωμου μανδύα από φύλλα χάλυβα
- Με τοποθέτηση λωρίδων ή ολόσωμου μανδύα από **FRPs**



Εικόνα 3-1: Περίσφιξη με μεταλλικά επικολλητά ελάσματα.

Οι δύο πιο διαδεδομένοι και αξιόπιστοι τρόποι εξωτερικής περίσφιξης είναι:

#### *1. Μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs)*

Ο τρόπος αυτός της περίσφιξης αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο τρόπο λόγω κυρίως της ευκολίας κατά τη χρήση του. Ο εγκιβωτισμός του σκυροδέματος μέσω μανδύα επιφέρει αύξηση της παραμορφωσιμότητας και της θλιπτικής αντοχής, μειώνει την πιθανότητα τοπικού λυγισμού των οπλισμών και βελτιώνει τη συνάφεια σε κρίσιμες περιοχές ενώσεων οπλισμών με μάλτιση.

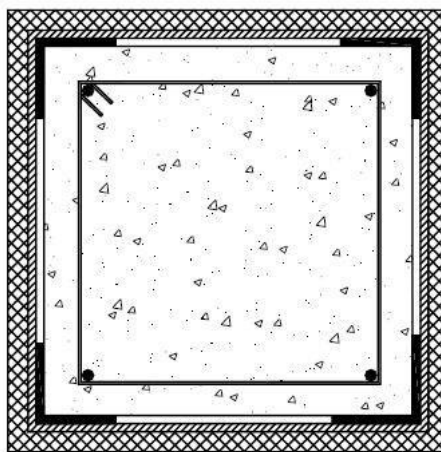
Τα φύλλα εφαρμόζονται σε οριζόντια διεύθυνση όταν απαιτείται αύξηση μόνο της διατμητικής αντοχής ενώ αν συγχρόνως επιδιώκεται και η αύξηση της καμπτικής αντοχής χρησιμοποιούνται και φύλλα με κατακόρυφη διεύθυνση ινών.

Η αποτελεσματικότητα του μανδύα στον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος εξαρτάται από το συνολικό πάχος του μανδύα, από την εφελκυστική αντοχή κατά την έννοια της περιμέτρου του και από τη γεωμετρία της εγκιβωτισμένης διατομής. Η εφαρμογή της τεχνικής είναι απλούστερη και περισσότερο αποδοτική στα κυκλικά υποστυλώματα. Συγκεκριμένα η αποδοτικότητα είναι μικρότερη σε ορθογωνικές διατομές, στις οποίες απαιτείται εξομάλυνση των γωνιών έτσι ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα τουλάχιστον 30 mm, από ότι σε κυκλικές. Η συμπεριφορά του επισκευασμένου υποστυλώματος δεν διαφέρει από εκείνη του ολόσωμου τόσο από πλευράς αντοχής όσο και από πλευράς ακαμψίας.

### II. Τεχνική του μεταλλικού κλωβού

Σύμφωνα με αυτή την τεχνική τέσσερα μεταλλικά γωνιακά ελάσματα προσαρμόζονται στις γωνίες του υποστυλώματος και συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλημένες λάμες. Προς διασφάλιση της περίσφιξης πριν από τη συγκόλληση τα γωνιακά περισφίγγονται στο στύλο με ειδικά κλειδιά και προεντεταμένους κοχλίες.

Τα κενά που δημιουργούνται στην επαφή του μεταλλικού κλωβού και του σκυροδέματος συμπληρώνονται με μη συρρικνούμενη τσιμεντοκονία ή εποξειδική κόλλα και ακολουθεί επένδυση με πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Με αυτή τη διάταξη δεν είναι δυνατή η αύξηση της καμπτικής αντοχής του υποστυλώματος στις θέσεις των κόμβων λόγω μη εκτάσεως του κλωβού στον υπερκείμενο και υποκείμενο όροφο, αλλά παρόλα αυτά η διαδικασία είναι διαδεδομένη επειδή καθιστά δυνατή τη μεταφορά ενός τμήματος των κατακόρυφων φορτίων του υποστυλώματος και σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης η τεχνική εφαρμόζεται με μεγάλη ταχύτητα.



Εικόνα 3-2: Παράδειγμα Τεχνική του μεταλλικού κλωβού [2]

### III. Μανδύες από ωπλισμένο σκυρόδεμα[1]

Οι μανδύες από ωπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται σε σοβαρές βλάβες υποστυλωμάτων ή όταν διαπιστώνεται ανεπάρκεια της αντοχής τους. Η τεχνική

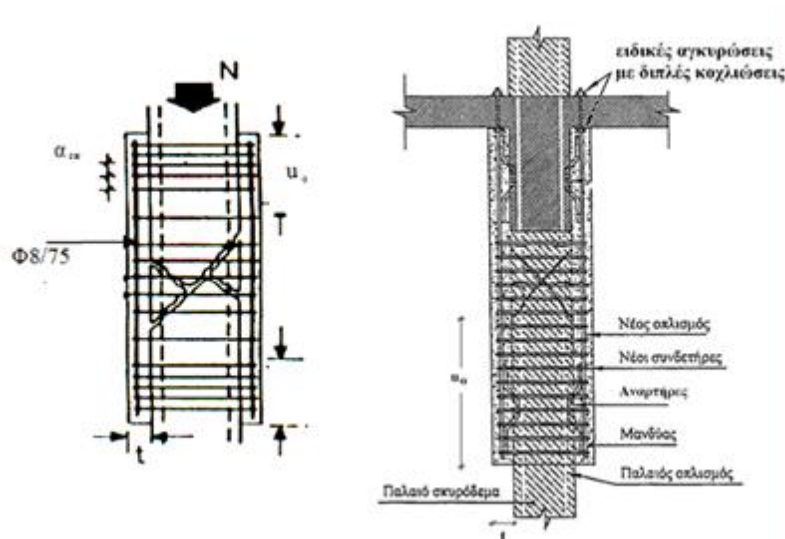


περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής του υποστύλωματος με νέο σκυρόδεμα και νέους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς περιμετρικά του αρχικού στοιχείου. Οι μανδύες συνίσταται να διαπερνούν την οροφή και το δάπεδο του ορόφου, γιατί έτσι επιτυγχάνεται αύξηση της καμπτικής ικανότητας των υποστύλωματων και στο ύψος των κόμβων.

Διακρίνονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους:

- Μανδύες από έγχυτο σκυρόδεμα
- Μανδύες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Μανδύες από σκυροτσιμεντόπηγμα
- Μανδύες από ειδικά σκυροδέματα

Στην περίπτωση ολόπλευρου μανδύα η συνεργασία παλιού και νέου σκυροδέματος ενισχύεται με αγκύριση της παλιάς επιφάνειας και συγκόλληση κεκαμμένων οπλισμών μεταξύ παλιών και νέων διαμήκων ράβδων. Η σύνδεση αυτή κρίνεται απαραίτητη όταν το υποστύλωμα έχει αποδιοργανωθεί πλήρως ή όταν η διάστασή του είναι μεγάλη ή όταν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού των ενδιάμεσων οπλισμών.



Εικόνα 3-3: Ενδεικτική απεικόνιση άκρων μανδύα απο ωπλισμένο σκυρόδεμα [8]

Στην περίπτωση που ο μανδύας δεν μπορεί να περιβάλλει ολόκληρη τη διατομή του υποστύλωματος χρησιμοποιείται η τεχνική του ανοικτού μανδύα. Απαιτείται ιδιαίτερη φροντίδα στη σύνδεση του παλιού με το νέο τμήμα της διατομής, το οποίο επιτυγχάνεται με τη συγκόλληση πυκνών συνδετήρων στους παλιούς οπλισμούς

Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή μανδύα απαρτίζεται από τα εξής βήματα :

- Αποφόρτιση και υποστύλωση των πλακών και δοκών που συντρέχουν με το υποστύλωμα
- Απομάκρυνση του αποδιοργανωμένου σκυροδέματος και επισκευή των βλαβών

- Αποκάλυψη των οπλισμών σε θέσεις που έχουν επιλεγεί για συγκόλληση νέων οπλισμών
- Διάνοιξη και προετοιμασία των οπών όπου θα αγκυρωθούν οι νέοι ράβδοι οπλισμού και των θέσεων όπου προβλέπονται τα βλήτρα.
- Εκτράχυνση της επιφάνειας του σκυροδέματος επιμελώς σε βάθος έξι (6) mm με κατάλληλο εξοπλισμό (ματσακόνι, υδροβολή)
- Καθαρισμός της εξωτερικής επιφάνειας με πεπιεσμένο αέρα και στο εσωτερικό των οπών με αναρρόφηση από τον πυθμένα
- Αγκύρωση των διαμήκων οπλισμών με χημική πάκτωση δηλαδή χρήση εποξειδικής ρητίνης
- Αγκύρωση των βλήτρων μηχανικά ή χημικά
- Εφόσον προβλέπονται συγκολλήσεις, τοποθέτηση και ηλεκτροσυγκόλληση χαλύβδινων παρεμβλημάτων σύνδεσης παλαιών και νέων οπλισμών
- Τοποθέτηση νέων συνδετήρων
- Καθαρισμός της επιφάνειας με αέρα και νερό
- Διαβροχή του παλιού σκυροδέματος και του ξυλοτύπου τουλάχιστον έξι (6) ώρες πριν τη σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος.
- Τέλος , σκυροδετείται ο μανδύας και ακολουθούνται τα μέτρα συντήρησης σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος

### 3.3 Ενισχύσεις τοιχωμάτων

Για την ενίσχυση τοιχωμάτων από ωπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλογες με αυτές που εφαρμόζονται για τα υποστυλώματα. Λόγω της ιδιαίτερης σημασίας που έχουν τα τοιχώματα για την ανάληψη των σεισμικών δράσεων, οι επεμβάσεις που γίνονται σε αυτά πρέπει να είναι προϊόν ενδεδειγμένης μελέτης, στην οποία θα λαμβάνεται σαφώς υπόψη η επιρροή που θα έχουν στη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.

Οι ενισχύσεις των τοιχωμάτων γίνονται επίσης με τις τεχνικές της περίσφιγξης και των μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος.

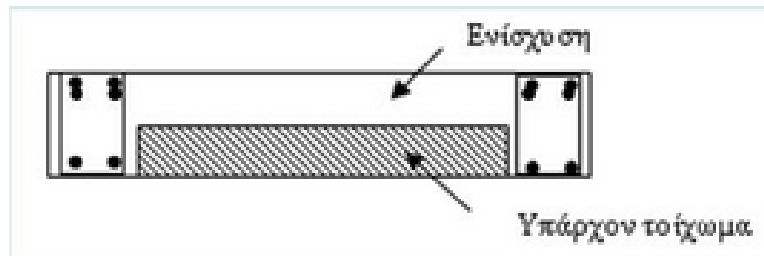
Η ενίσχυση των τοιχωμάτων με περίσφιξη μπορεί να εφαρμοστεί τεχνικά αλλά ο μεγάλος λόγος των πλευρών των τοιχωμάτων δεν αφήνει πολλά περιθώρια αξιολογής απόδοσής της τεχνικής.

Η τεχνική ενίσχυσης με μανδύες είναι αποτελεσματικότερη από την περίσφιξη, όμως λόγω του μεγάλου μήκους των πλευρών των τοιχωμάτων ο μανδύας δεν είναι κλειστός.

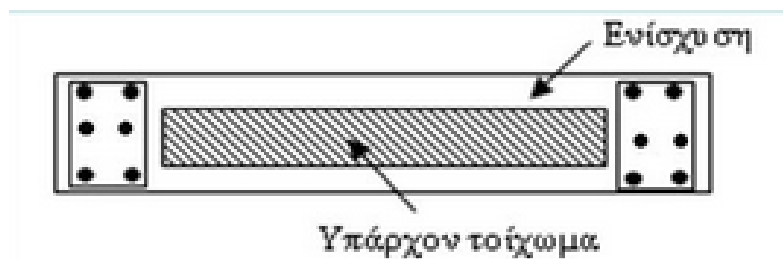
Πρόκειται για αύξηση του πάχους της μίας ή των δύο πλευρών του τοιχώματος. Η τοποθέτηση των οπλισμών είναι αντίστοιχη με αυτή των υποστυλωμάτων. Το σκυρόδεμα μπορεί να είναι έγχυτο ή εκτοξευόμενο.

Όταν πρόκειται να εφαρμόσουμε αυτή την τεχνική πρέπει οι πράξεις μας να ακολουθούν κάποιες διατάξεις. Αυτές είναι οι ακόλουθες :

- Το ελάχιστο το πάχος του μανδύα στην περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να είναι 50mm και στο έγχυτο σκυρόδεμα 80mm.
- Η αντοχή του σκυροδέματος του μανδύα θα πρέπει να είναι μία κατηγορία υψηλότερη από του αρχικού τοιχώματος.
- Οι ελάχιστοι διατμητικοί σύνδεσμοι στη διεπιφάνεια παλαιού και νέου σκυροδέματος είναι είτε βλήστρα από χάλυβα είτε άλλοι διατμητικοί σύνδεσμοι ίσης αντίστασης έναντι διάτμησης.



Εικόνα 3-4:: Μονόπλευρη ενίσχυση τοιχώματος και προσθήκη υποστρωμάτων [8]



Εικόνα 3-5: Ενίσχυση με ολόπλευρο κλείστο μανδύα [8]

### 3.4 Ενίσχυση Δοκών και Πλακών

Οι δοκοί είναι τα δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα που αποτελούν συνηθισμένο αντικείμενο επέμβασης, είτε λόγω βλαβών που έχουν υποστεί είτε λόγω πρόσθετων φορτίων που καλούνται να παραλάβουν. Η επέμβαση είναι δυνατό να περιλαμβάνει μόνο την επισκευή των υφιστάμενων βλαβών, όπου αυτές υπάρχουν, ή επιπλέον την ενίσχυση της δοκού, δηλαδή την περαιτέρω βελτίωση των ιδιοτήτων της.

Η διαδικασία επισκευής μιας δοκού έχει ως στόχο την αποκατάσταση των χαρακτηριστικών που είχε πριν υποστεί τις βλάβες όσον αφορά τόσο στην αντοχή όσο και στη δυσκαμψία της.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ενίσχυσης μιας δοκού εξαρτάται άμεσα από τον επιδιωκόμενο στόχο. Κατά κανόνα, μεταξύ του συνόλου των δοκών της κατασκευής που ανασχεδιάζεται, ενισχύονται αυτές που εμφανίζουν ανεπαρκή καμπτική ή/και διατμητική αντοχή με βάση τις απαιτήσεις και τα κριτήρια σχεδιασμού της επιλεγείσας στάθμης

επιτελεστικότητας. Οι τεχνικές ενίσχυσης ανάλογα με το ποια αντοχή θέλουμε να αυξήσουμε διακρίνονται σε καμπτικού ή διατμητικού χαρακτήρα.

#### 3.4.1 Καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται όταν η αντοχή μιας δοκού σε κάμψη δεν πληροί τα κριτήρια σχεδιασμού, είναι δυνατή η ενίσχυση του εφελκυσμένου πέλματος με νέους διαμήκεις οπλισμούς που καλύπτονται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε όλο το πλάτος της δοκού. Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι της τάξης των 7 - 10 cm. Στη λιγότερο συνηθισμένη περίπτωση ενίσχυσης του θλιβόμενου πέλματος δεν είναι απαραίτητη η χρήση νέου οπλισμού, ενώ αντί για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί έγχυτο.

Παρόλο που η μέθοδος της ενίσχυσης δοκών με προσθήκη στρώσεων σκυροδέματος έχει εξαιρετικά ευρεία εφαρμογή, εξακολουθεί να παρουσιάζει μειονεκτήματα. Το κυριότερο από αυτά είναι ότι το νέο σκυρόδεμα, είτε έγχυτο είτε εκτοξευόμενο, υπόκειται σε συστολή ξηράνσεως έως ότου αναλάβει πλήρως την αντοχή του, ενώ αντίθετα οι διαστάσεις του αρχικού στοιχείου παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες.

Επειδή όμως τα δύο στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους και συμπεριφέρονται ως ενιαία διατομή, η συστολή ξηράνσεως του νέου σκυροδέματος παρεμποδίζεται, οπότε αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις. Εάν οι τάσεις αυτές είναι σημαντικές μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του προστιθέμενου στοιχείου ή την αποκόλλησή του από την υφιστάμενη διατομή. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, όπως και στην περίπτωση της κατασκευής μανδύα, συνιστάται να χρησιμοποιείται σκυρόδεμα με κατάλληλα χημικά πρόσθετα ή να αντικαθίσταται το τσιμέντο από μη συρρικνούμενη κονία.

#### 3.4.2 Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή

Η προσθήκη νέων μελών από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή (FRP), ως εξωτερικός οπλισμός στο εφελκυσμένο πέλμα δοκών ή πλακών, αποτελεί μία οικονομική αλλά και αποδοτική μέθοδο ενίσχυσης δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση της καμπτικής αντοχής των δοκών και των πλακών. Επιπλέον επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της καμπτικής ακαμψίας και μείωση των παραμορφώσεων και της αναμενόμενης ρηγμάτωσης καθώς και μείωση της πλαστιμότητας. Τα ελάσματα ή τα υφάσματα επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέλμα με χρήση ρητίνης. Στην περίπτωση των χαλύβδινων ελασμάτων χρησιμοποιούνται και βλήτρα.

Το σύστημα ενίσχυσης είναι απόλυτα εξαρτημένο από την ποιότητα της εργασίας, ιδιαίτερα στη φάση εφαρμογής της εποξικής κόλλας. Εάν η επιφάνεια του σκυροδέματος δεν είναι κατάλληλα προετοιμασμένη, η κόλλα που χρησιμοποιείται είναι ελαττωματική ή δεν μπορεί να ακολουθήσει το ρυθμό παραμόρφωσης της δοκού ή η διαδικασία δεν γίνει όσο προσεκτικά απαιτείται, το τελικό αποτέλεσμα θα είναι μία χαλαρή σύνδεση του ελάσματος στη δοκό που θα περιορίζει σημαντικά την αποδοτικότητα της ενίσχυσης. Η εποξική κόλλα μπορεί να τοποθετηθεί είτε με ρητινένηση είτε με επάλειψη της κόλλας και στις δύο επιφάνειες που πρόκειται να

συγκολληθούν.

Η κυριότερη αδυναμία της συγκεκριμένης τεχνικής εντοπίζεται στις υψηλές συγκεντρωμένες τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή αγκύρωσης των άκρων των ελασμάτων. Οι τάσεις αυτές στα άκρα μπορούν να οδηγήσουν σε απόσχιση στη γειτονική προς το έλασμα περιοχή σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκές μήκος αγκύρωσης του ελάσματος, εκτός της περιοχής που απαιτείται καμπτική ενίσχυση.

### 3.4.3 Διατμητική ενίσχυση με εξωτερικά στοιχεία

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν οι κυριότερες μέθοδοι για την αύξηση της καμπτικής αντοχής μιας δοκού. Παρόμοιες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση των δοκών σε διάτμηση. Η διατμητική ανεπάρκεια των δοκών μπορεί να αντιμετωπισθεί με την εφαρμογή μεταλλικών στοιχείων που περισφίγγουν εξωτερικά τη δοκό με επικολλητά φύλλα από χάλυβα. Ακόμα, μπορεί να γίνει χρήση των επικολλητών φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή. Η τεχνική μπορεί να εφαρμόζεται είτε με επικόλληση των φύλλων στις δυο απέναντι παρειές της δοκού είτε ακόμη καλύτερα με τη μορφή μανδύων που συνήθως είναι ανοικτής μορφής.

Η ανεπάρκεια της δοκού έναντι λοξής θλίψης μπορεί να αντιμετωπισθεί με την προσθήκη νέων στρώσεων σκυροδέματος (προτιμότερη η εφαρμογή κλειστού μανδύα), ενώ η ανεπάρκεια οπλισμού διάτμησης μπορεί να αντιμετωπισθεί με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος ή με τεχνικές εξωτερικής περισφίγξης.

### 3.4.4 Ενισχύσεις με μανδύες ωπλισμένου σκυροδέματος

Πέρα από τη χρήση της για την επισκευή δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα που έχουν υποστεί βλάβες, η τεχνική της κατασκευής μανδύων αποτελεί τη συνηθέστερη και αποτελεσματικότερη μέθοδο ενίσχυσης δοκών όταν απαιτείται αύξηση τόσο της καμπτικής όσο και της διατμητικής τους αντοχής. Η τεχνική περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής της δοκού με νέο σκυρόδεμα, νέους διαμήκεις οπλισμούς και νέους συνδετήρες περιμετρικά του αρχικού στοιχείου. Για κατασκευαστική ευκολία συνήθως επιλέγεται η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Βασικό κατασκευαστικό πρόβλημα της τεχνικής είναι η δημιουργία του κλειστού μανδύα στο πάνω μέρος της δοκού, λόγω της ύπαρξης των πλακών. Γι' αυτό πολλές φορές στην πράξη επιλέγεται η λιγότερο αποτελεσματική τεχνική της κατασκευής ανοικτού μανδύα. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για την εξασφάλιση της αγκύρωσης των συνδετήρων.

## 3.5 Ενισχύσεις Κόμβων Δοκών – Υποστρωμάτων

Οι κόμβοι στον τομέα των επεμβάσεων ίσως αποτελούν τη δυσκολότερη κατασκευαστική διαδικασία γιατί σε αυτούς συντρέχουν πολλά στοιχεία του φορέα. Ανάλογα με το βαθμό βλάβης που έχουν υποστεί οι κόμβοι, οι τεχνικές αποκατάστασής

τους διαχωρίζονται σε επισκευές (ελαφριές ρηγματώσεις) και ενισχύσεις (βαριές βλάβες).

Οι βασικές μορφές ενίσχυσης κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων είναι τρεις:

### **I. Χιαστί προεντεταμένα κολάρα**

Τα χιαστί κολάρα τοποθετούνται και εντείνονται με μηχανικό τρόπο περισφίγοντας έτσι την περιοχή του κόμβου. Επίσης τοποθετούνται δύο οριζόντια κολάρα στις διατομές παρειάς των υποστυλωμάτων τα οποία συγκολλούνται πάνω στα χιαστί κολάρα σταθεροποιώντας έτσι το σύστημα περίσφυξης. Συνήθως η όλη περιοχή των κόμβων καλύπτεται με έναν μανδύα από έγχυτο ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με ένα ελαφρύ ανοξείδωτο πλέγμα. Η τεχνική αυτή δεν εφαρμόζεται σε κόμβους που συντρέχουν τέσσερις δοκοί επειδή η διέλευση των χιαστί διαγωνίων στην περίπτωση αυτή είναι προβληματική και ιδιαίτερα επίπονη. Στους εξωτερικούς κόμβους λοιπόν όπου έχει εφαρμογή συνήθως η τεχνική, συνίσταται η τεχνική της «καμπούρας» δηλαδή επεκτάσεως της δοκού ή του υποστυλώματος ή και των δύο. Τα άκρα των διαμηκών οπλισμών της δοκού ή/και του υποστυλώματος αποκαλύπτονται και επί αυτών ηλεκτροσυγκολλούνται νέα τμήματα οπλισμών σε μήκος τουλάχιστον 200mm πέραν από τις εξωτερικές παρειές του κόμβου. Στην συνέχεια τοποθετούνται πυκνοί συνδετήρες S500 Φ8/50. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι με την ανωτέρω μεθοδολογία επεμβάσεως βελτιώνονται σημαντικά η αντοχή, η ακαμψία η πλαστιμότητα και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

### **II. Χρήση επικολητών χαλύβδινων ελασμάτων ή φύλλων και χρήση επικολητών φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)**

Τα ελάσματα προεκτείνονται εκατέρωθεν του κόμβου, στις συντρέχουσες δοκούς και τα υποστυλώματα, σε μήκος τουλάχιστον ίσο με το αντίστοιχο πλάτος του κόμβου. Συνήθως χρησιμοποιούνται λεπτά χαλύβδινα ελάσματα πάχους 1-1,5mm με όριο διαρροής που κυμαίνεται από 240 έως 400MPa. Το πάχος των ελασμάτων ενίσχυσης πρέπει να είναι μικρό για να αποφεύγεται η πρόωρη αστοχία στην διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή σύνδεση χρησιμοποιώντας κυρίως εποξειδική κόλλα. Φυσικά η σύνδεση των ελασμάτων με τον κόμβο δεν επαφίεται μόνο στην κόλληση με εποξειδική κόλλα αλλά χρησιμοποιούνται και πρόσθετα στοιχεία αγκύρωσης όπως βίδες ή ντίζες που συσφίγγουν τα ελάσματα των απέναντι παρειών. Με την τεχνική αυτή αυξάνεται η διατμητική αντοχή και η πλαστιμότητα του κόμβου κυρίως με τη χρησιμοποίηση κυματοειδών ελασμάτων. Επίσης έχει το πλεονέκτημα της εύκολης εφαρμογής και του χαμηλού κόστους. Κύρια αδυναμία της τεχνικής βρίσκεται ακριβώς στην περιοχή αγκύρωσης των άκρων των ελασμάτων. Η πρόωρη αστοχία των άκρων με απόσχιση στη γειτονική προς το έλασμα περιοχή σκυροδέματος οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή. Επομένως θα πρέπει να γίνεται έλεγχος για την εξασφάλιση επαρκούς μήκους αγκύρωσης πέραν της περιοχής που απαιτείται ενίσχυση και έλεγχος της συγκέντρωσης καμπτικών και διατμητικών τάσεων στην περιοχή των άκρων, λόγω της ασυνέχειας του επικολητού ελάσματος.

Η χρήση επικολλητών φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) αποτελεί ουσιαστικά την εξέλιξη των χαλύβδινων ελασμάτων στον τομέα της ενίσχυσης των κατασκευών. Τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από ίνες άνθρακα ή γυαλιού και σπανιότερα από ίνες αραμιδίου. Στο εμπόριο κυκλοφορούν σε μορφή ελασμάτων πάχους 1,2mm και 1,5mm και πλάτους 5 έως 10mm ή σε μορφή υφασμάτων. Τα φύλλα επικολλώνται με εποξειδική ρητίνη όχι μόνο στον κόμβο αλλά και στα συντρέχοντα υποστυλώματα και δοκούς. Η κλίση των ινών είναι συνήθως 0, 45, 90. Θεωρητικά οι ίνες θα πρέπει να τοποθετούνται κάθετα στις πιθανές ρωγμές. Πρακτικά όμως αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο με αποτέλεσμα να τοποθετούνται κάθετα στον άξονα των δομικών μελών. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από την ευκολία εφαρμογής και το μικρό συγκριτικά με τα χαλύβδινα ελάσματα όγκο. Οι ίνες στα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας που μπορεί να είναι 30 έως 300MPa. Το βάρος τους είναι ιδιαίτερα χαμηλό, περίπου το 1/4 του χάλυβα ωστόσο δεν έχει διερευνηθεί ακόμη σε ικανοποιητικό βαθμό η ανθεκτικότητά τους σε διάρκεια. Απαραίτητη φυσικά είναι η καλή και προσεκτική αγκύρωση με βλήτρα, πολλές φορές ενισχυμένα με μεταλλικά φύλλα στις γωνίες, ώστε να αναπτυχθεί ολόκληρη η αντοχή τους στη μικρή αυτή περιοχή.

### **III. Μανδύες ωπλισμένου σκυροδέματος**

Ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης των κόμβων είναι η κατασκευή μανδύα ωπλισμένου σκυροδέματος. Συνήθως ο μανδύας αυτός αποτελεί συνέχεια του μανδύα που έχει χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του υποστυλώματος. Όμως η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί και τοπικά μόνο στην περιοχή του κόμβου.

Οι μανδύες ωπλισμένου σκυροδέματος ανάλογα με το υλικό σκυροδέτησης διακρίνονται σε:

- Μανδύες από έγχυτο σκυρόδεμα
- Μανδύες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Μανδύες από σκυροτσιμεντόπηγμα

Μανδύες από ειδικά σκυροδέματα ή τσιμεντοκονιάματα ενώ ανάλογα με την έκταση της βλάβης ή πιθανούς αρχιτεκτονικούς περιορισμούς διακρίνονται σε:

- Ολικούς μανδύες: όταν η βλάβη δεν περιορίζεται στην περιοχή του κόμβου
- Τοπικούς μανδύες: όταν η βλάβη στην περιοχή του κόμβου
- Ολόπλευρος μανδύας: περιβάλλει ολόκληρη την διατομή
- Ανοιχτούς μανδύες: δίπλευρους ή τρίπλευρους όταν κτήρια σε επαφή με το προς ενίσχυση κτήριο επιβάλουν τη χρήση τους

## 4. Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία – Θεωρία Πλαστικότητας

### 4.1 Μέθοδος μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τον υπολογισμό της απόκρισης φορέων αποτελούμενων από υλικά που χαρακτηρίζονται από μη γραμμική συμπεριφορά. Είναι δυνατή η διερεύνηση της μεταβολής των αποτελεσμάτων παραμέτρων της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών ή δομικών στοιχείων σε μακροδομικό ή μικροδομικό επίπεδο ανάλογα με τη διακριτοποίηση, η οποία επιλέγεται. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιόπιστη προσομοίωση είναι η θεώρηση κατάλληλων προσομοιωμάτων για τα υλικά των επιμέρους μελών του προσομοιώματος, καθώς και για τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν οι φορείς ωπλισμένου σκυροδέματος με ράβδους οπλισμού ανελαστικής συμπεριφοράς. Τα φαινόμενα που απορρέουν, όπως η ρηγμάτωση και η συντριβή του σκυροδέματος, η διαρροή του χάλυβα, η αλληλοεμπλοκή των αδρανών, η δράση βλήτρου των οπλισμών και η ατελής συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα καθιστούν την αναλυτική τους προσομοίωση εξαιρετικά πολύπλοκη και υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο ελαστικό πεδίο, αλλά και για μη γραμμικά προβλήματα, λογισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.α. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στη μηχανική των συνεχών μέσων. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα, όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

#### 4.1.1 Βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με τεχνητά συστατικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα [11]. Για να γίνει χρήση μητρωικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις



των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτόν το τρόπο οι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που ο αριθμός των κομβικών μετατοπίσεων είναι μεγάλος, ωστόσο είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρωικές) μεθόδους.

Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε φορείς οπλισμένου σκυροδέματος βασίζεται στην προσομοίωση του συνεχούς μέσου, σε κατάλληλη μορφή και πλήθος πεπερασμένων στοιχείων, ξεχωριστά για το σκυρόδεμα και τις ράβδους οπλισμού. Στη συνέχεια επιβάλλεται στο φορέα ένα καθολικό διάνυσμα φόρτισης με τη μορφή μικρών φορτιστικών βημάτων. Στόχος της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της μη γραμμικής απόκρισης του φορέα και συγκεκριμένα ο προσεγγιστικός υπολογισμός του καθολικού διανύσματος μετακινήσεων που προκύπτει από την παραπάνω φόρτιση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας κατάλληλης επαναληπτικής μεθόδου, η οποία γραμμικοποιεί το πρόβλημα σε κάθε επανάληψη [12].

Παρακάτω ακολουθούν απλά βήματα με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων:

- I. Για το τρέχον φορτιστικό βήμα ( $n$ ) προσδιορίζεται το καθολικό διάνυσμα φόρτισης ( $\mathbf{P}_n$ ) του φορέα και ανακαλείται από τη μνήμη το καθολικό εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του προηγούμενου φορτιστικού βήματος ( $\mathbf{K}^{n-1}_T$ ).
- II. Επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες.
- III. Επιλύεται η παρακάτω γραμμική εξίσωση και υπολογίζεται το καθολικό διάνυσμα των μετακινήσεων ( $\mathbf{U}^n$ ):

$$\mathbf{K}^{n-1}_T * \mathbf{U}^n = \mathbf{P}^n \rightarrow \mathbf{U}_n = \mathbf{K}^{n-1}_T * \mathbf{P}^n$$

Το διάνυσμα αυτό (ελαστική πρόβλεψη) συνήθως δεν αντιστοιχεί στην πραγματική εντατική κατάσταση του φορέα (λόγω της ενδεχόμενης ανελαστικής συμπεριφοράς των υλικών) και πρέπει να διορθωθεί στη συνέχεια με μια κατάλληλη επαναληπτική διαδικασία.

Για κάθε πεπερασμένο στοιχείο:

- a. Υπολογίζεται το διάνυσμα επικόμβιων μετακινήσεων ( $\mathbf{d}$ ) του στοιχείου, το οποίο προέρχεται από το καθολικό διάνυσμα μετακινήσεων ( $\mathbf{U}_n$ ), ανάλογα με τη θέση του στοιχείου στον κάρναβο διαφοροποίησης.
- b. Υπολογίζεται το διάνυσμα παραμορφώσεων του στοιχείου ( $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} * \mathbf{d}$ ), όπου ( $\mathbf{B}$ ) είναι το μητρώο παραμορφώσεων – επικόμβιων μετακινήσεων του στοιχείου.
- c. Από τον αντίστοιχο καταστατικό νόμο υλικού υπολογίζεται για κάθε σημείο ολοκλήρωσης του πεπερασμένου στοιχείου το διάνυσμα των μη γραμμικών τάσεων ( $\boldsymbol{\sigma}$ ).

- d. Υπολογίζεται το εφαπτομενικό καταστατικό μητρώο του υλικού ( $\mathbf{D}_T$ ) για κάθε σημείο ολοκλήρωσης.
- e. Υπολογίζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου ( $\mathbf{k}_T$ ) και το διάνυσμα μη γραμμικής απόκρισης του στοιχείου ( $\mathbf{r}$ ) με αριθμητική ολοκλήρωση των συνεισφορών όλων των σημείων ολοκλήρωσης του πεπερασμένου στοιχείου.
- f. Από τις συνεισφορές όλων των πεπερασμένων στοιχείων συντίθεται το νέο καθολικό εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας ( $\mathbf{K}_{nT}$ ) και το καθολικό διάνυσμα μη γραμμικής απόκρισης ( $\mathbf{R}$ ) του φορέα.
- g. Επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες.
- h. Υπολογίζεται το διάνυσμα φόρτισης εκτός ισορροπίας ( $\mathbf{P}_n - \mathbf{R}$ ) και επιβάλλεται ως πρόσθετη φόρτιση στο φορέα. Στη συνέχεια επιλύεται η παρακάτω γραμμική εξίσωση και υπολογίζεται το πρόσθετο διάνυσμα μετακινήσεων ( $\Delta \mathbf{U}$ ), το οποίο προστίθεται στο καθολικό διάνυσμα μετακινήσεων ( $\mathbf{U}$ ):

$$\mathbf{K}_T^n * \Delta \mathbf{U} = \mathbf{P}^n - \mathbf{R} \rightarrow \Delta \mathbf{U} = \mathbf{K}_T^{n-1} * (\mathbf{P}^n - \mathbf{R})$$

$${}^n \mathbf{U}' = {}^n \mathbf{U} + \Delta \mathbf{U}$$

- i. Τα βήματα (a) έως (h) επαναλαμβάνονται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης της επαναληπτικής διαδικασίας, όπως για παράδειγμα ο μηδενισμός των δυνάμεων εκτός ισορροπίας ( $\mathbf{P}_n - \mathbf{R}$ ) ή των πρόσθετων μετακινήσεων ( $\Delta \mathbf{U}$ ), οπότε και η ανάλυση συνεχίζεται στο επόμενο φορτιστικό βήμα. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να διαφοροποιηθεί σε ορισμένα σημεία, ιδιαίτερα ως προς την ανανέωση (επικαιροποίηση) ή όχι του καθολικού μητρώου δυσκαμψίας του φορέα, ανάλογα με τον αλγόριθμο επίλυσης που επιλέγεται για τη λύση του μη γραμμικού προβλήματος.

#### 4.1.2 Καταστατικοί νόμοι σκυροδέματος και χάλυβα

Βασικό ρόλο στην αξιοπιστία των αναλυτικών αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε φορείς οπλισμένους σκυροδέματος έχει η επιλογή των κατάλληλων καταστατικών νόμων για το σκυρόδεμα και το χάλυβα. Η βασική λειτουργία ενός καταστατικού νόμου είναι η σχέση μεταξύ της τρέχουσας παραμορφωσιακής κατάστασης του υλικού και της αντίστοιχης εντατικής κατάστασης, λαμβάνοντας ή όχι το αντίστοιχο ιστορικό φόρτισης. Στη γενική διαδικασία επίλυσης που παρουσιάστηκε παραπάνω, η παρουσία του καταστατικού νόμου εντοπίζεται στο βήμα 4(γ) και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης, επειδή βρίσκεται στον εσωτερικό βρόγχο της αντίστοιχης επαναληπτικής διαδικασίας.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon})$$

➤ **Καταστατικοί νόμοι σκυροδέματος**

Οι καταστατικοί νόμοι σκυροδέματος που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία είναι πολυάριθμοι και βασίζονται σε διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις (CEB, 1993, 1995), όπως η θεώρηση του συνεχούς μέσου ή οι αρχές της μικρομηχανικής και θερμοδυναμικής. Η κατηγοριοποίησή τους με βάση το θεωρητικό τους υπόβαθρο είναι:

- Αμιγώς εμπειρικοί καταστατικοί νόμοι (empirical models).
- Καταστατικοί νόμοι γραμμικής ελαστικότητας (linear elasticity models).
- Καταστατικοί νόμοι μη γραμμικής ελαστικότητας (non linear elasticity models).
- Καταστατικοί νόμοι πλαστικότητας (plasticity models).
- Καταστατικοί νόμοι βλάβης του συνεχούς μέσου (continuum damage models).
- Καταστατικοί νόμοι βασισμένοι στην ενδοχρονική θεωρία ανελαστικότητας (endochronic theory of inelasticity).
- Καταστατικοί νόμοι μικροεπιπέδων (microplane models).
- Καταστατικοί νόμοι θραύσης ή ρηγμάτωσης (fracture ή crack models).
- Μη τοπικές διατυπώσεις (nonlocal models).

➤ **Καταστατικοί νόμοι χάλυβα**

Οι καταστατικοί νόμοι χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση των ράβδων οπλισμού διατυπώνονται κατά κανόνα σε μονοαξονική μορφή ( $\sigma_s = f(\epsilon_s)$ ), οποία μπορεί να είναι διγραμμική τελεία ελαστοπλαστική ή κρατυνόμενη. Επίσης, είναι δυνατόν να λαμβάνουν υπόψη την υστερητική συμπεριφορά του υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

#### 4.1.3 Προσομοίωση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος

Η συνήθης πρακτική για την προσομοίωση του σκυροδέματος στο χώρο είναι η χρήση στερεών πεπερασμένων στοιχείων (solid elements) με τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Τα στοιχεία αυτά ανάλογα με τη γεωμετρία με τη γεωμετρία του προσομοιωμένου φορέα και την επιθυμητή ακρίβεια της ανάλυσης μπορούν να είναι τετράεδρα έως εξαέδρα. Συνήθως είναι ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία (isoparametric elements), το οποίο υποδηλώνει ότι χρησιμοποιούν τις ίδιες συναρτήσεις μορφής για να περιγράψουν την αντιστοιχία μεταξύ των επικόμβιων συντεταγμένων και του πεδίου γεωμετρίας (x, y, z) καθώς και αυτή μεταξύ των επικόμβιων μετακινήσεων και του πεδίου μετακινήσεων.

#### 4.1.4 Προσομοίωση χαλύβδινου οπλισμού

Η προσομοίωση των οπλισμών στην ανάλυση φορέων σκυροδέματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

➤ **Διακριτή προσομοίωση (discrete formulation)**

Οι οπλισμοί προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία ράβδου (truss elements) δυο ή τριών κόμβων, τα οποία μοιράζονται την ίδια τοπολογία κόμβων με τα στερεά στοιχεία σκυροδέματος.

➤ Κατανεμημένη προσομοίωση (smearred formulation)

Οι οπλισμοί κατανέμονται ομοιόμορφα εντός των περιβαλλοντικών πεπερασμένων στοιχείων σκυροδέματος με τη μορφή μιας ιδεατής δέσμης παράλληλων στρώσεων χάλυβα ισοδύναμου όγκου.

➤ Εμφυτευμένη προσομοίωση (embedded formulation)

Οι οπλισμοί προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία ράβδου (όπως και στη διακριτή μορφή), αλλά η τοπολογία τους είναι ανεξάρτητη από αυτήν των στοιχείων σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανένας περιορισμός όσον αφορά την τοπολογία του αντίστοιχου καννάβου διακριτοποίησης.

Η τεχνική embedded formulation χρησιμοποιείται για να καθορίσει ότι ένα στοιχείο ή μια ομάδα στοιχείων είναι ενσωματωμένα (embedded) σε άλλα στοιχεία (host elements) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει οπλισμούς. Το Abaqus αναζητά τις γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των κόμβων των ενσωματωμένων στοιχείων και των στοιχείων του κεντρικού υπολογιστή. Τα ενσωματωμένα στοιχεία επιτρέπεται να έχουν περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας, αλλά αυτές οι περιστροφές δεν περιορίζονται από την ενσωμάτωση. Επιτρέπεται ο ορισμός πολλαπλών embedded στοιχείων.

Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει δυσκολίες ως προς την ορθή προσομοίωση του εξεταζόμενου φορέα με πεπερασμένα στοιχεία μη γραμμικής συμπεριφοράς, ιδιαίτερα όταν αυτή ξεφεύγει από τη μονοδιάστατη μορφή και επεκτείνεται στις δυο και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Παράγοντες όπως ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων, η μορφή και η πυκνότητα του καννάβου διακριτοποίησης, η προσομοίωση των οπλισμών (διακριτή, εμφυτευμένη ή κατανεμημένη), οι συνοριακές συνθήκες (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συμμετρίας), η μορφή της φόρτισης (δυνάμεις ή μετακινήσεις) και ο ρυθμός επιβολής της, η παραδοχή μεγάλων μετακινήσεων (φαινόμενα 2ας τάξης), οι αλγόριθμοι επίλυσης και τα κριτήρια σύγκλισης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτόν απαιτείται εμπειρία στην ορθή αξιολόγηση της επιρροής της κάθε μιας από τις παραπάνω παραμέτρους ξεχωριστά, με στόχο την κατά το δυνατόν ακριβέστερη αναλυτική προσομοίωση του φυσικού προβλήματος.

## 4.2 Θεωρία Πλαστικότητας

Η θεωρία πλαστικότητας περιγράφει τη συμπεριφορά των υλικών, όταν αυτά περάσουν στην πλαστική περιοχή και οι παραμορφώσεις, που υφίστανται, είναι πλέον μόνιμες (πλαστικές παραμορφώσεις).

Η πλαστική παραμόρφωση είναι μια μη αντιστρεπτή (irreversible) διεργασία, σε αντίθεση με την ελαστική παραμόρφωση που είναι αντιστρεπτή. Η ελαστική συμπεριφορά εξαρτάται μόνο από την αρχική και τη τελική κατάσταση της τάσης και της παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα η πλαστική συμπεριφορά εξαρτάται και από το τρόπο με τον οποίο η τάση και η παραμόρφωση έφτασαν στη τελική τους κατάσταση.

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία πλαστικότητας [12], το μικροαυξητικό διάνυσμα των συνολικών παραμορφώσεων ( $d\epsilon$ ) διαχωρίζεται σε δυο ανεξάρτητα μεταξύ τους μερίδια (συνιστώσες), το ελαστικό ( $d\epsilon_e$ ) και το πλαστικό ( $d\epsilon_p$ ), σύμφωνα με τη σχέση:

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}_0 + d\boldsymbol{\varepsilon}_p$$

Οι απειροστές αυξήσεις των ανατρέψιμων ελαστικών παραμορφώσεων ( $d\boldsymbol{\varepsilon}_0$ ) συναρτώνται με τις αντίστοιχες αυξήσεις των τάσεων ( $d\boldsymbol{\sigma}$ ) με μια μητρική σχέση γραμμικής ελαστικότητας (νόμος του Hooke), μέσω του ελαστικού καταστατικού μητρώου ( $\mathbf{D}$ ). Το ελαστικό αυτό μητρώο ισότροπου υλικού εμπεριέχει τις βασικές ελαστικές παραμέτρους (σταθερές) του υλικού, οι οποίες είναι το μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ) και ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ).

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \mathbf{D}^{-1*}(d\boldsymbol{\sigma})$$

Οι απειροστές αυξήσεις των μη αναστρέψιμων πλαστικών παραμορφώσεων ( $d\boldsymbol{\varepsilon}_p$ ) ακολουθούν ένα νόμο πλαστικής ροής (flowrule), ο οποίος καθορίζει ότι η διεύθυνση του μικρού αυξητικού διανύσματος των πλαστικών παραμορφώσεων ( $d\boldsymbol{\varepsilon}_p$ ) είναι πάντα κάθετη σε μια επιφάνεια πλαστικού δυναμικού (plastic potential surface) ( $\mathbf{g}=\mathbf{0}$ ). Η επιφάνεια αυτή μπορεί είτε να ταυτίζεται με την επιφάνεια διαρροής (yieldsurface), οπότε ο νόμος πλαστικής ροής ονομάζεται συσχετισμένος (associated) είτε να είναι διαφορετική, οπότε προκύπτει ένας μη συσχετισμένος (non-associated) νόμος πλαστικής ροής.

Ένα βασικό συστατικό για την υλοποίηση της θεωρίας πλαστικότητας στο πλαίσιο ενός καταστατικού νόμου σκυροδέματος είναι η εκλογή ενός κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας ( $f$ ) (failure surface). Το κριτήριο αυτό ορίζεται ως μια συνάρτηση των κυρίων τάσεων (ή ισοδύναμα ως μια συνάρτηση των αναλλοίωτων μεγεθών τους), η οποία γεωμετρικά αποτυπώνεται ως μια επιφάνεια ( $f=0$ ) στο χώρο των κυρίων τάσεων.

$$f = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \text{ ή } f = f(j_1, j_2, j_3)$$

Βασικός ρόλος ενός κριτηρίου αστοχίας είναι να διαχωρίζει τις επιτρεπτές από τις μη επιτρεπτές εντατικές καταστάσεις του υλικού σε κάθε φάση του ιστορικού φόρτισής του. Όταν το υλικό λειτουργεί αμιγώς ελαστικά, χωρίς να αναπτύσσονται πρόσθετες πλαστικές παραμορφώσεις ( $d\boldsymbol{\varepsilon}_p=\mathbf{0}$ ), οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό βρίσκονται στο εσωτερικό της επιφάνειας αστοχίας του. Όταν όμως η εντατική κατάσταση του υλικού τείνει να ξεπεράσει το κριτήριο αστοχίας ( $f>\mathbf{0}$ ), ενεργοποιούνται ταυτόχρονα δυο παράλληλοι μηχανισμοί: ο πρώτος είναι η ανάπτυξη πρόσθετων πλαστικών παραμορφώσεων ( $d\boldsymbol{\varepsilon}_p$ ) βάσει του νόμου πλαστικής ροής και ο δεύτερος είναι η επιστροφή του διανύσματος των τάσεων πάνω στην επιφάνεια αστοχίας, ώστε να εξασφαλίζεται πάντοτε η συνθήκη συμβατότητας ( $f\leq 0$ ) (consistency condition).

Για την προσομοίωση του σκυροδέματος στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε θεωρία της πλαστικότητας με κριτήριο αστοχίας τύπου Drucker –Prager. Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται με τρισδιάστατο οκτάκομβο στοιχείο [26].

Υιοθετήθηκε κριτήριο αστοχίας τύπου Drucker – Prager της μορφής [25]:

$$F = \sqrt{J_{2D}}f(k) + \partial J_1 - k = 0$$

όπου:

$J_{2D}$  η δεύτερη αναλλοίωτη του εκτροπέα της τάσης

$J_{2D}$  η πρώτη αναλλοίωτη της τάσης

**g** παράμετρος τριβής

$f(\mathbf{K})$  η συνάρτηση που εκφράζει τη μεταβολή της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος ανάλογα με το ιστορικό φόρτισης για δεδομένη υδροστατική πίεση καθορίζοντας το σχήμα της επιφάνειας που προκύπτει από τη συνάρτηση φόρτισης κατά το επίπεδο εκτροπής κι εξαρτάται από την παράμετρο  $\mathbf{K}$  (σχήμα 3.1).

$\mathbf{k}$  Παράμετρος κράτυνσης που προκύπτει από τη σχέση:

$$\mathbf{k} = \left( \frac{1}{\sqrt{3}} - \theta \right) \sigma_c$$

Στην ανάλυση εισάγεται η συμπεριφορά τάσεων – πλαστικών παραμορφώσεων του απερίσφιγκτου σκυροδέματος σύμφωνα με την προσέγγιση έμμεσου προσδιορισμού, ώστε να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά κράτυνσης του σκυροδέματος [13]. Χρησιμοποιείται συνάρτηση πλαστικής ροής τύπου Drucker Prager της μορφής:

$$\mathbf{G} = \sqrt{J_{2D}} f(\mathbf{k}) + f_a J_1$$

όπου:

$f_a$  έκφραση συντελεστή πλαστικής διόγκωσης του σκυροδέματος, ώστε να ληφθεί υπόψη ότι το διάνυσμα των πλαστικών παραμορφώσεων είναι κάθετο σε οριακή επιφάνεια διαφορετική της επιφάνειας αστοχίας  $\mathbf{F}$  (μη συνεταιριστικός νόμος πλαστικής ροής).

## 5. Περιγραφή και ανάλυση προσομοιωμάτων.

Η διαδικασία της ανάλυσης προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα ABAQUS CAE (Simulia). Το ABAQUS είναι γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που αρχικά κυκλοφόρησε το 1978 και χρησιμοποιείται τόσο για την προσομοίωση όσο και την ανάλυση μηχανικών εξαρτημάτων και συστημάτων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στοιχείων.

Το ABAQUS/CAE διαιρείται σε λειτουργικές μονάδες που ονομάζονται modules. Κάθε module περιέχει μόνο εκείνα τα εργαλεία που είναι σχετικά με το ιδιαίτερο κομμάτι της διαδικασίας μοντελοποίησης.

Η ανάλυση, που χαρακτηριστικά βήματά της περιγράφονται παρακάτω, περιέλαβε δοκίμια, τα οποία ενισχύθηκαν με μανδύες ινωπλισμένων πολυμερών (ΙΩΠ). Οι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατηγορίας εφελκυστικής αντοχής 500MPa όσον αφορά στους διαμήκεις οπλισμούς, ενώ οι οπλισμοί περίσφιγξης (συνδετήρες) ήταν εφελκυστικής αντοχής 220MPa αντίστοιχα. Λόγω απόλυτης συμμετρίας των μοντέλων, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο  $\frac{1}{4}$  των πραγματικών στοιχείων. Παρακάτω δίνονται τα διαφορετικά προσομοιώματα που αναλύθηκαν :

- Υποστύλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο πλήρως καθόλο το ύψος με μανδύα CFRP σε 1,2,3,4 και 5 στρώσεις και γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$ , με επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση.
- Υποστύλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο με CFRP στις κρίσιμες περιοχές (πάνω και κάτω) (partially wrapped) και γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$ , με επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση.
- Υποστυλώματα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένα με ύφασμα CFRP σε όλο το μήκος τους (fully wrapped) και γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$  και  $r=25\text{mm}$  και ασκούμενο αξονικό φορτίο, με επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση .
- Υποστυλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο με ύφασμα CFRP 1,3 και 5 στρώσεων με ασκούμενο διατμητικό φορτίο.

Τέλος, για συγκριτικούς λόγους έχει προσομοιωθεί το απερίσφιγχο υποστύλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά και υλικά με τα υπόλοιπα, χωρίς βέβαια να έχουν λειανθεί οι γωνίες του αποκτώντας ακτίνα καμπύλωσης.

### 5.1 Βήματα προσομοίωσης

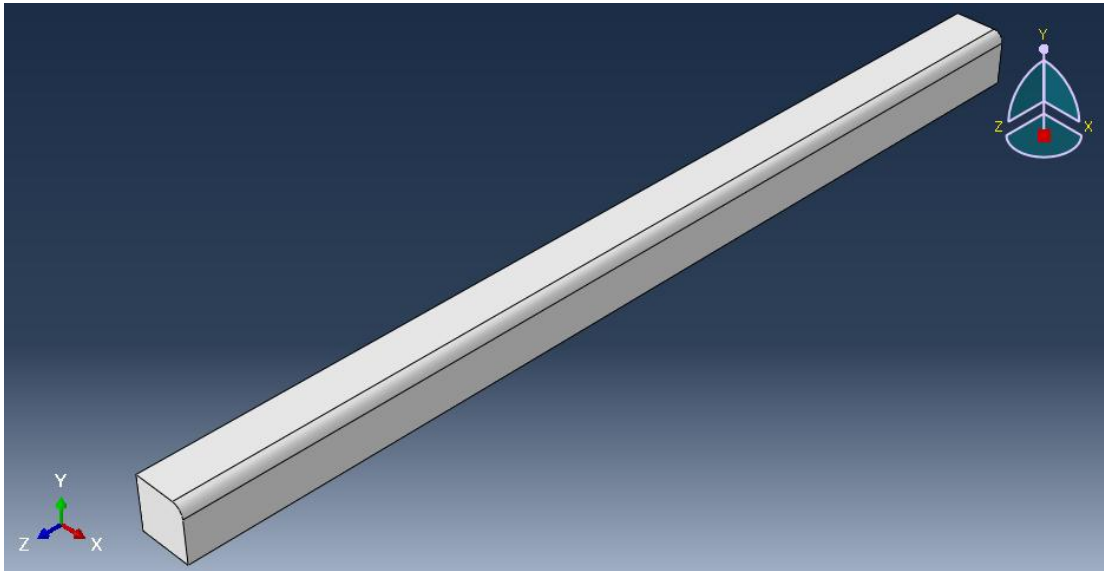
#### 5.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων (Module Part)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων (Module Part) αφορούν σε ό,τι σχετίζεται με τη γεωμετρία των στοιχείων που εισήχθησαν για την ανάλυση των παραπάνω προσομοιωμάτων. Τα στοιχεία αυτά είναι τρισδιάστατα και για τη δημιουργία τους χρησιμοποιήθηκε η εντολή Create Solid- Extrude για το σκυρόδεμα, Create Wire-Planar για τους οπλισμούς, Create Shell- Extrude για το FRP, αλλά και άλλες για τη μορφοποίησή τους. Αρχικά σχεδιάστηκαν δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος

διαστάσεων 300x300 και ύψους 2700mm, τα οποία προσομοιώνουν σε πλήρη κλίμακα ένα πραγματικό υποστυλώμα.

Συγκεκριμένα για το κάθε δοκίμιο δημιουργήθηκαν τα παρακάτω parts:

- Διαμήκης Οπλισμός
- Σκυρόδεμα Υποστυλώματος
- Οπλισμοί Περίσφιγξης (Συνδετήρες)
- Πλεκτό ύφασμα με ίνες άνθρακα (CFRP)



Εικόνα 5-1: Part σκυροδέματος.

Τα περισσότερα δοκίμια σχεδιάστηκαν με ακτίνα καμπύλωσης (corner radius)  $r=30\text{mm}$ , αλλά στη συνέχεια δημιουργήθηκαν για συγκριτικούς λόγους και άλλα με  $r=25\text{mm}$ .

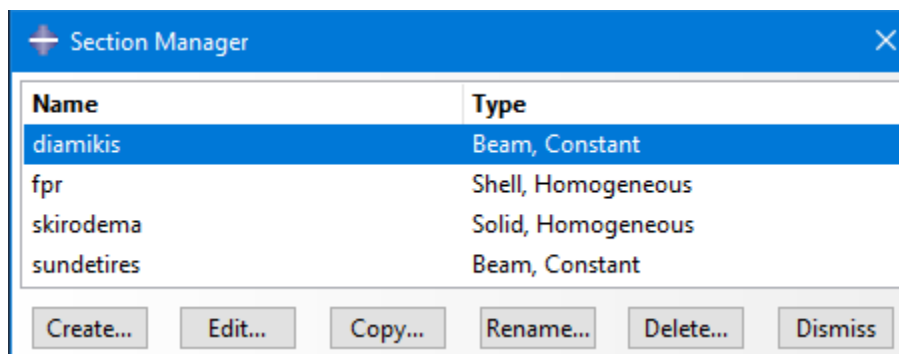




Εικόνα 5-2: Διατομή δοκιμίου όπου φαίνεται η γωνιακή καμπυλότητα

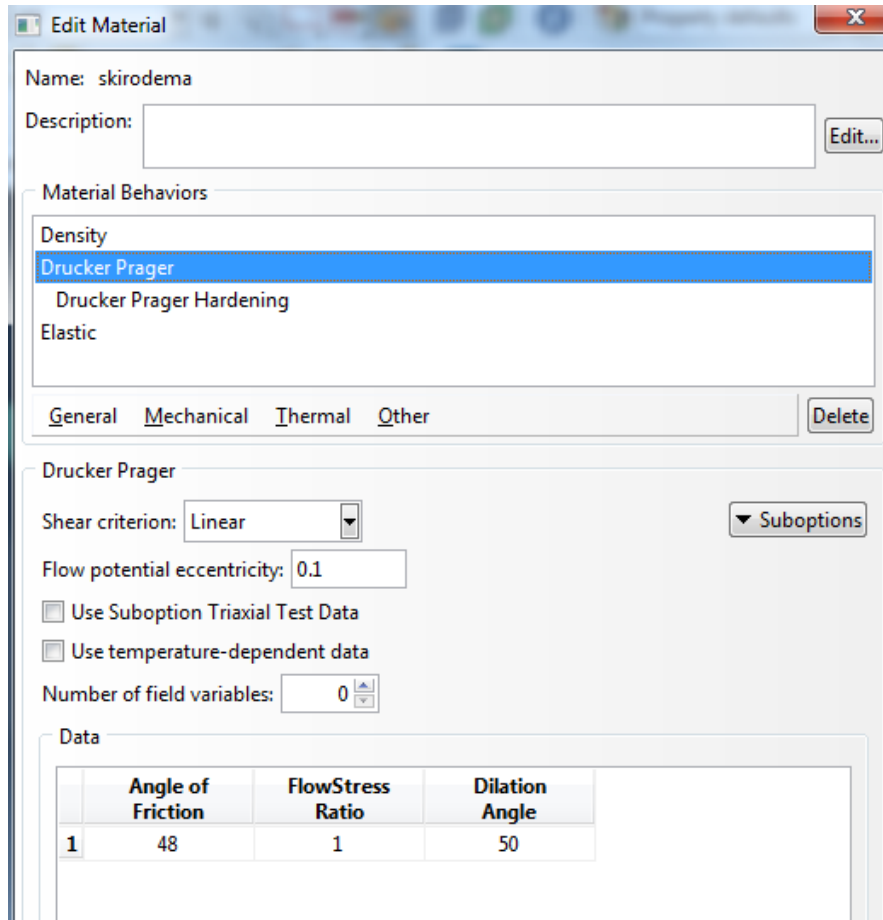
### 5.1.2 Ιδιότητες Υλικών (Module Materials)

Στα πλαίσια της εργασίας δημιουργήθηκαν τέσσερις (4) τύποι διαφορετικών υλικών που ταυτίζονται με τα μέρη που έχουν ήδη δημιουργηθεί σε προηγούμενο βήμα. Το σκυρόδεμα, ο χάλυβας (συνδετήρες και διαμήκης οπλισμός) και το ύφασμα σύνθετου υλικού αποτελούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Όπως φαίνεται (Εικόνα 3), το σκυρόδεμα προσομοιώθηκε ως solid, οι οπλισμοί ως beams και το fpr ως shell.



Εικόνα 5-3: Τύποι υλικών

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν άμεση σχέση με τα στοιχεία που απαρτίζουν τα προσομοιώματα. Τα δεδομένα που εισάγονται εξαρτώνται από το είδος του υλικού.



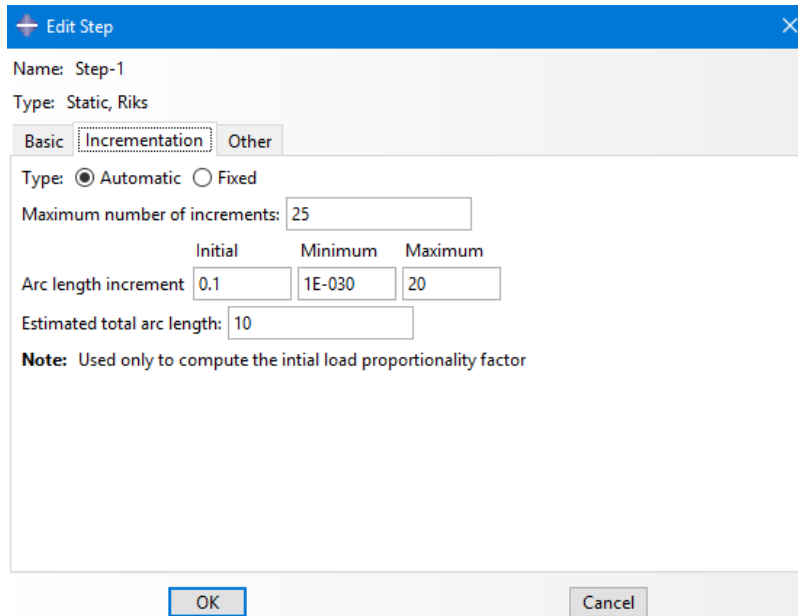
Εικόνα 5-4: Νόμος Drucker Prager

### 5.1.3 Συγκρότηση προσομοιώματος (Module Assembly)

Σε αυτό το σημείο τα μεμονωμένα μέρη που δημιουργήθηκαν -πυρήνας, διαμήκης οπλισμός, συνδετήρες, ύφασμα- συγκροτούνται σε ένα ενιαίο σύνολο, δημιουργώντας το επιθυμητό προσομοίωμα.

### 5.1.4 Δημιουργία του Βήματος (Module Step)

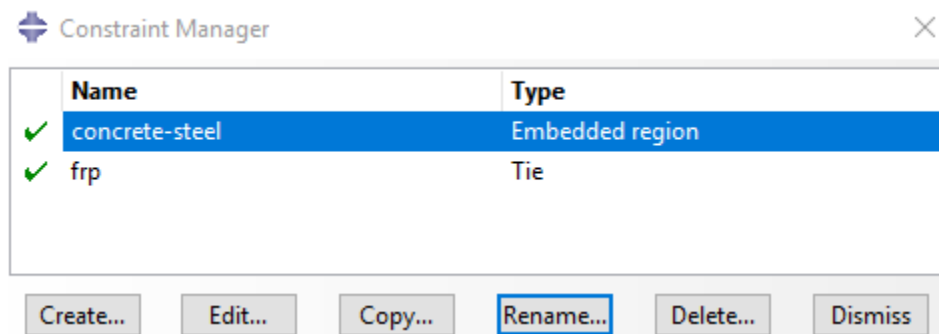
Στο βήμα αυτό δημιουργήθηκαν οι βασικές παράμετροι της ανάλυσης από την πλευρά του προγράμματος και αυτό γιατί ορίστηκαν τα βήματα της ανάλυσης (increments). Επιλέχθηκε ο τύπος του βήματος να είναι Static, Ricks) όπως φαίνεται.



Εικόνα 5-5: Module Step του προγράμματος

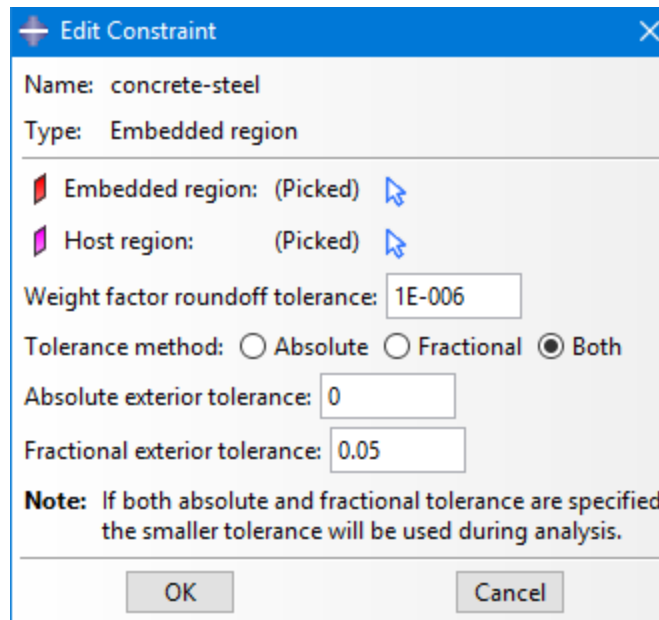
### 5.1.5 Ορισμός ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων του προσομοιώματος (Module Interaction)

Στο σημείο αυτό ορίστηκαν οι “περιορισμοί” (Constraints).

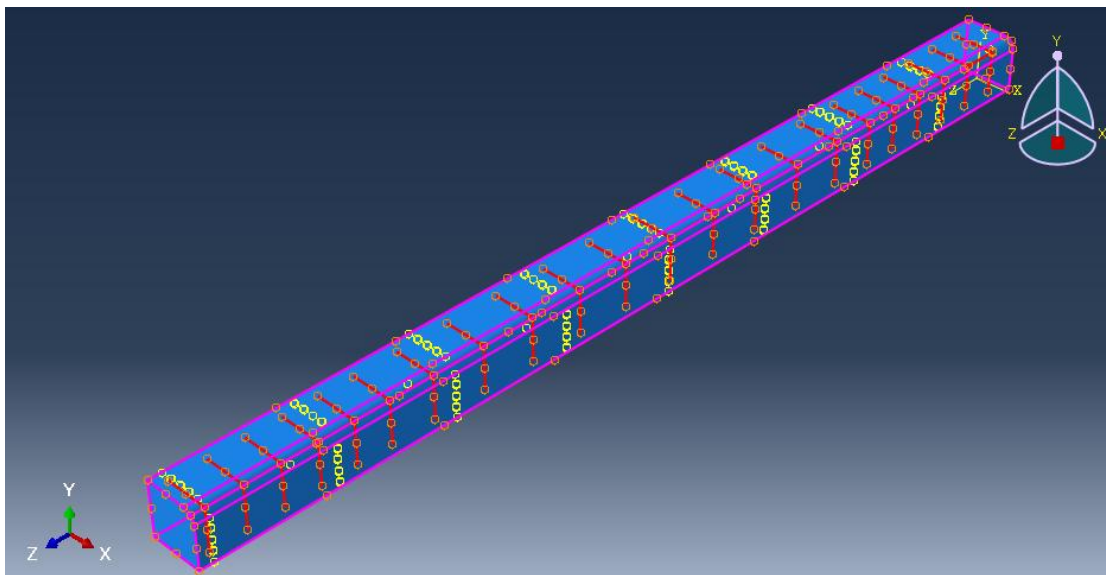


Εικόνα 5-6: Constraint manager του προγράμματος

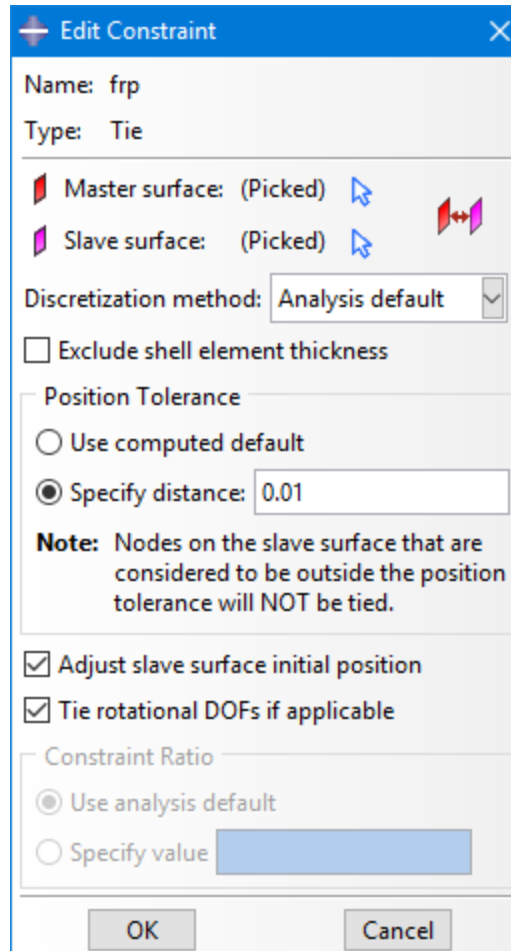
Συγκεκριμένα, οι οπλισμοί- beams ορίζονται ως ενσωματωμένα στοιχεία (embedded regions) στο σκυρόδεμα- solid (host region), ενώ όσον αφορά στα υφάσματα άνθρακα έχει οριστεί tie constraint για τη διεπιφάνειά τους με τα δοκίμια ωπλισμένου σκυροδέματος.



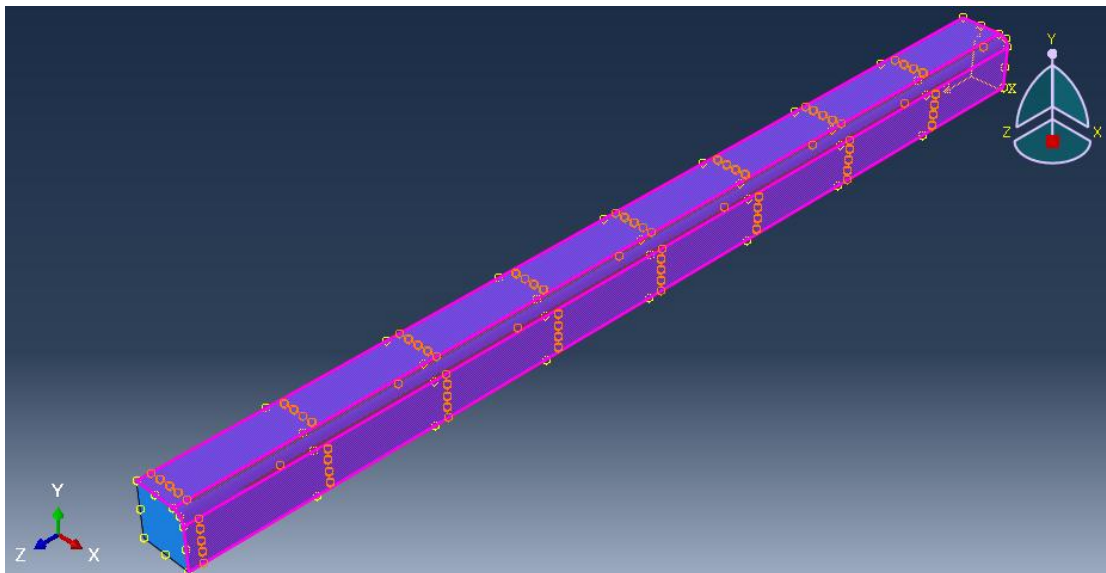
Εικόνα 5-7: Δημιουργία περιορισμού για τους οπλισμούς σε σχέση με το σκυρόδεμα.



Εικόνα 5-8: Δημιουργία περιορισμού για τους οπλισμούς σε σχέση με το σκυρόδεμα.



Εικόνα 5-9: Δημιουργία περιορισμού tie για το ύφασμα CFRP.

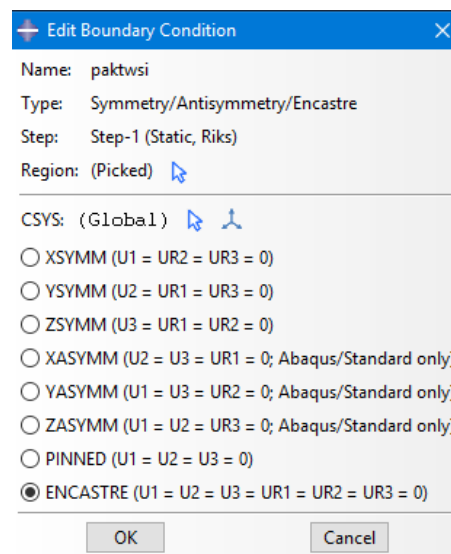


Εικόνα 5-10: Δημιουργία περιορισμού tie για το ύφασμα CFRP.

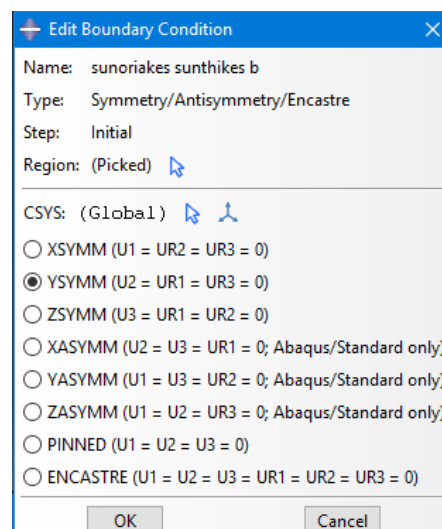
### 5.1.6 Ορισμός συνοριακών συνθηκών του προσομοιώματος (Module Load)

Στο βήμα αυτό επιλέχθηκαν όλες οι συνοριακές συνθήκες των προσομοιωμάτων. Συνοριακές συνθήκες αποτελούν η στήριξη με το έδαφος, η ενδεχόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση εφόσον έχει προτιμηθεί για τον τρόπο καταπόνησης ή το συγκεντρωμένο φορτίο και γενικότερα ό,τι σχετίζεται με τις συνθήκες παραμόρφωσης του μοντέλου (βύθιση, στροφή).

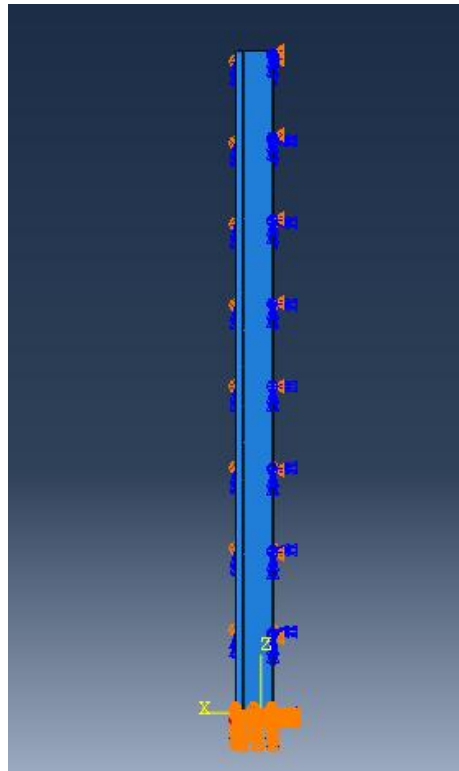
Σε περιπτώσεις ανάλυσης προσομοιωμάτων σε κλίμακα λόγω απόλυτης συμμετρίας, όπως αυτή της παρούσας διπλωματικής κρίνεται επιβεβλημένη η δημιουργία συνοριακών συνθηκών σε επιφάνειες και ακμές, ώστε να αποφευχθούν εκεί οι παραμορφώσεις.



Εικόνα 5-11: Δημιουργία πάκτωσης στη βάση του προσομοιώματος.



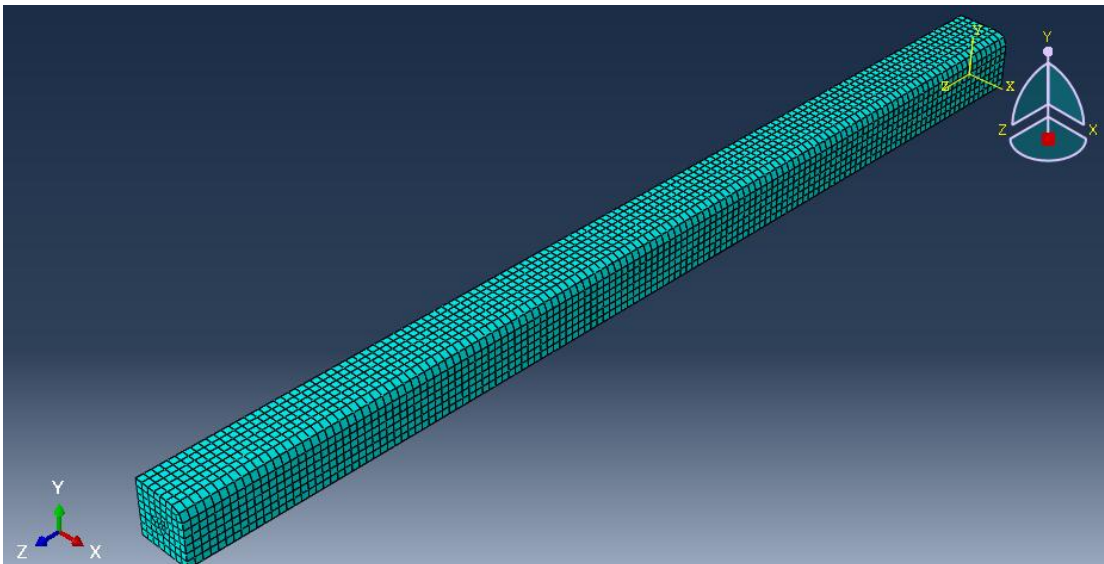
Εικόνα 5-12: Δημιουργία συνοριακής συνθήκης λόγω απόλυτης συμμετρίας του προσομοιώματος.



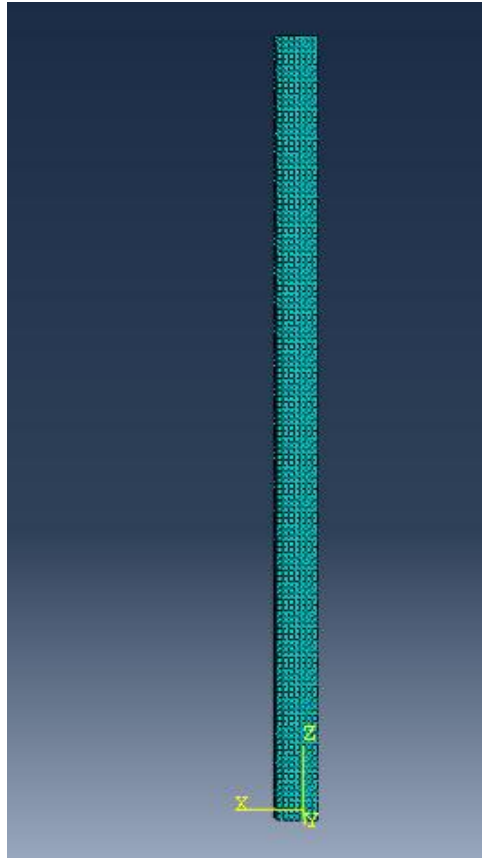
Εικόνα 5-13: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.

### 5.1.7 Διακριτοποίηση προσομοιωμάτων (Module Mesh)

Επιλέχθηκε η κατάλληλη διακριτοποίηση για όλα τα προσομοιώματα της παρούσας μελέτης.



Εικόνα 5-14: Διακριτικοποιημένο προσομοίωμα.



Εικόνα 5-15: Διακριτικοποιημένο προσομοίωμα.

## 5.2 Επιλογή υλικών της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στη μελέτη περιλαμβάνονται 26 δοκίμια διαστάσεων διατομής  $300 \times 300 \text{mm}^2$  και ύψους  $2700 \text{mm}$ . Τον οπλισμό των δοκιμίων αποτελούν 4 ράβδοι διαμήκους οπλισμού διαμέτρου  $20 \text{mm}$  και συνδετήρες  $10 \text{mm}$  σε αποστάσεις  $150 \text{mm}$  και  $100 \text{mm}$  στις κρίσιμες περιοχές του υποστυλώματος. Οι οπλισμοί αγκυρώθηκαν κατάλληλα σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 (European Standard EN, 2005) και του ελληνικού κανονισμού (Ε.Κ.Ω.Σ./Ε.Α.Κ, 2002). Η επικάλυψη οπλισμού είναι  $25 \text{mm}$ . Τέλος, για συγκριτικούς λόγους έχει προσομοιωθεί το απερίσφιγχο υποστύλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος με τα ακριβώς ίδια χαρακτηριστικά και υλικά με τα υπόλοιπα, χωρίς βέβαια να έχουν λειανθεί οι γωνίες του αποκτώντας ακτίνα καμπύλωσης.

### 5.2.1 Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής δεκαέξι (16)  $\text{MPa}$  (C16/20) και μέγιστο κόκκο αδρανών τριάντα-δύο (32) χιλιοστών και μέση ποιότητα σκυροδέματος ( $f_c=24.37 \text{MPa}$ ). Περιλαμβάνονται 26 δοκίμια διαστάσεων διατομής  $300 \times 300 \text{mm}$  και ύψους  $2700 \text{mm}$ .



### 5.2.2 Χάλυβας- Οπλισμοί δοκιμίων

Ο διαμήκης οπλισμός των δοκιμίων είναι 4Φ20 και σχηματίζει άγκιστρα στο επάνω μέρος. Οι συνδετήρες (οριζόντιος οπλισμός) είναι 22Φ10. Η επικάλυψη του οπλισμού είναι 25mm.

### 5.2.3 Πλεκτό ύφασμα με ίνες άνθρακα.

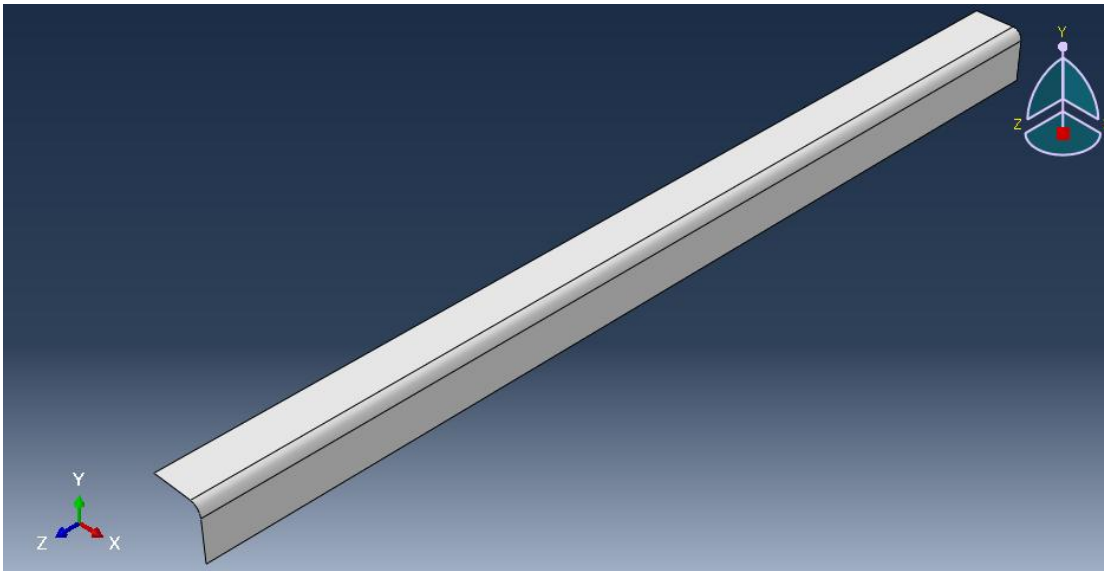
Ο μανδύας αποτελείται από πλεκτό ύφασμα με ίνες άνθρακα (CFRP), σχεδιασμένο για τοποθέτηση χρησιμοποιώντας την υγρή μέθοδο εφαρμογής.

Mechanical properties of CFRP sheets.

FRP composite	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Max. tensile strain (mm/mm)	Thickness (mm)
CFRP	3430	230,000	0.015	0.165

Όπως φαίνεται και παραπάνω, το CFRP έχει:

- Μέτρο Ελαστικότητας  $230000 \text{ N/mm}^2$
- Εφελκυστική Αντοχή  $3430 \text{ N/mm}^2$
- Πάχος  $0.165 \text{ mm}$



Εικόνα 5-16: Part του ανθρακούφασματος στο πρόγραμμα.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται διεξοδική διερεύνηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των προσομοιώματων μέσω διαγραμμάτων για κάθε προσομοίωμα.

Τα προσομοιώματα που αναλύθηκαν είναι όλα τετραγωνικά υποστυλώματα μεγάλης κλίμακας διαστάσεων 300x300x2700mm. Έχουν σχεδιαστεί με ακτίνα καμπύλωσης  $r=30\text{mm}$  αλλά και  $r=40\text{mm}$ , ενώ ενισχύονται με CFRP πυκνότητας  $t=0.165\text{mm}$ . Αποτελούν προσομοίωση πραγματικού υποστυλώματος σε πλήρη κλίμακα. Συνολικά αναλύθηκαν 26 τετραγωνικά προσομοιώματα, το καθένα από τα οποία ενισχύθηκε με 1,2,3,4 και τέλος 5 στρώσεις CFRP. Επιπλέον, αναλύθηκε και το προσομοίωμα ενός απερίσφιγχτου δοκιμίου με σκοπό τη σύγκρισή του με τα υπόλοιπα περισφιγμένα δοκίμια ως προς τα μεγέθη που μελετούνται.

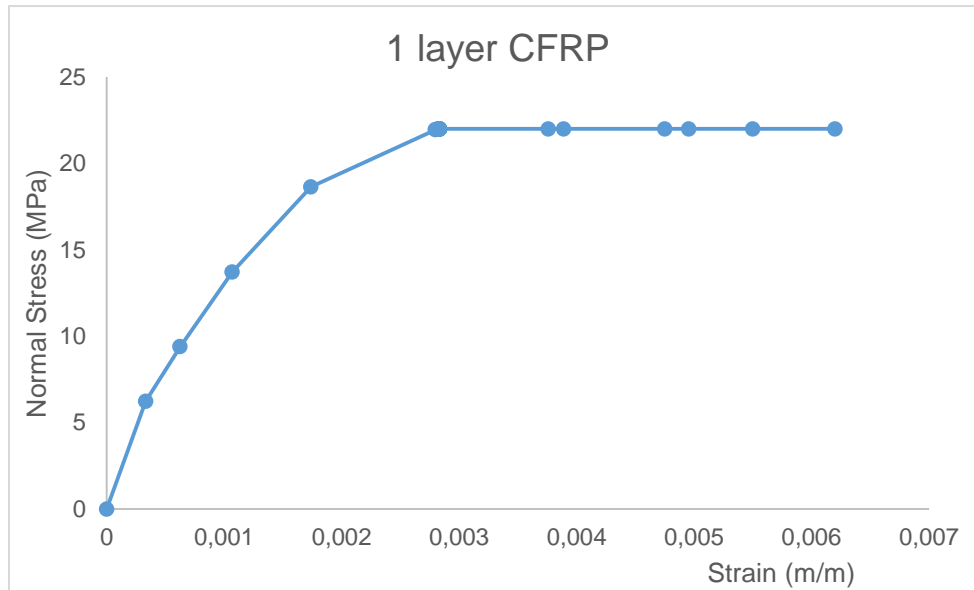
Παράλληλα με τα διαγράμματα τάσεων- παραμορφώσεων για κάθε είδος φόρτισης σε κάθε προσομοίωμα επισυνάπτονται και οι ισόχρωμες ασυνεχειών, τα οποία εξάχθηκαν από το πρόγραμμα ανάλυσης.

Επισυνάπτονται επίσης συγκριτικά διαγράμματα για συσχέτισμό και τελική εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στη συμπεριφορά των ενισχυμένων σε περίσφιξη υποστυλωμάτων.

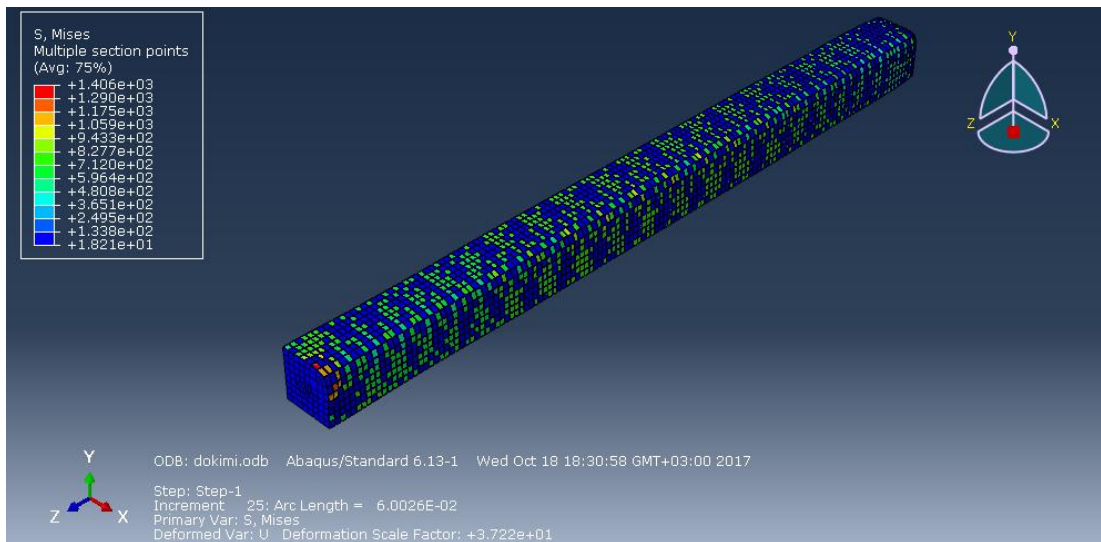
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτουν ανά προσομοίωμα και είναι τα εξής:

1. Υποστύλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο πλήρως καθόλο το ύψος με μανδύα CFRP σε 1,2,3,4 και 5 στρώσεις και γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$ , με επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση.

➤ 1 layer CFRP,  $t=0.165\text{mm}$ .

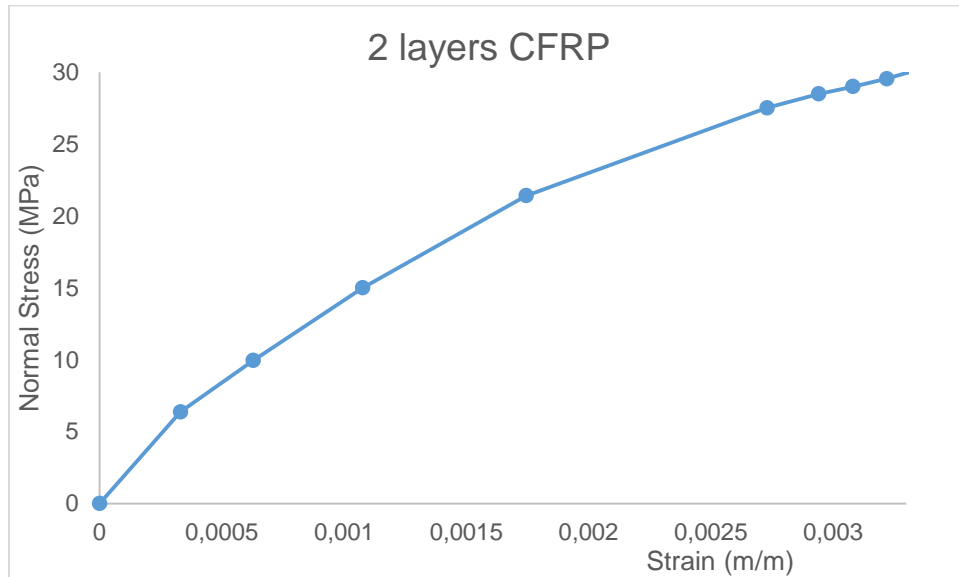


Διάγραμμα 1: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 1 στρώση CFRP.

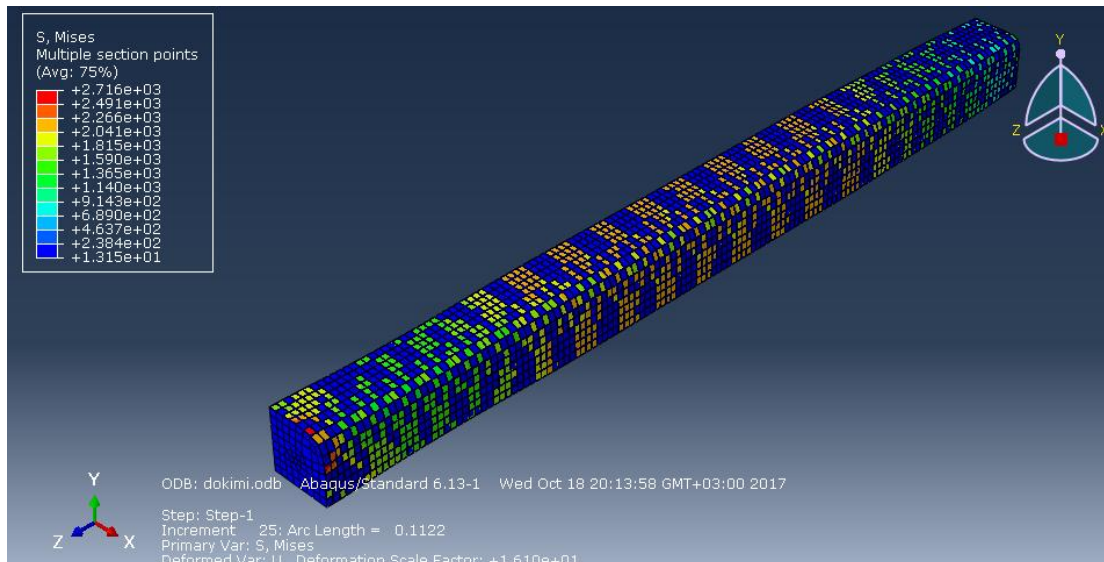


Εικόνα 6-1: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστύλωματος.

➤ 2 layers CFRP,  $t=0.33\text{mm}$ .

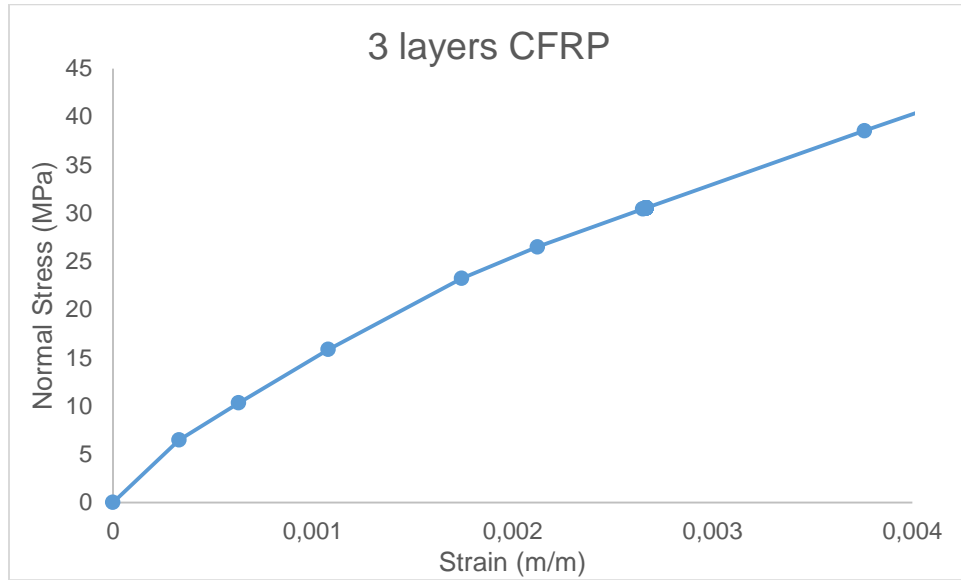


Διάγραμμα 2: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 2 στρώσεις CFRP.

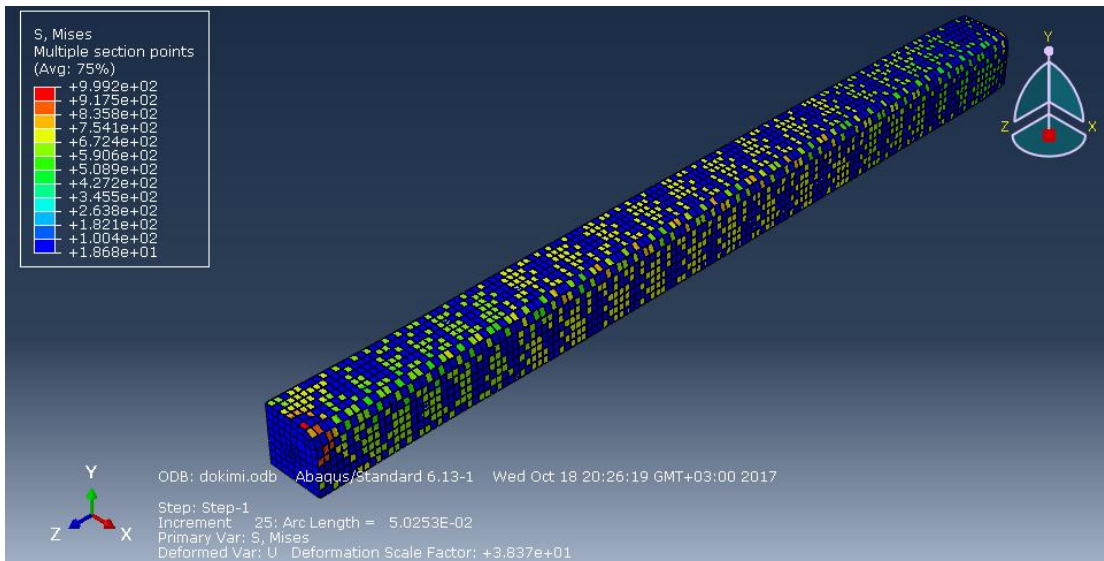


Εικόνα 6-2: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστρώματος.

➤ 3 layers CFRP,  $t=0.495\text{mm}$ .

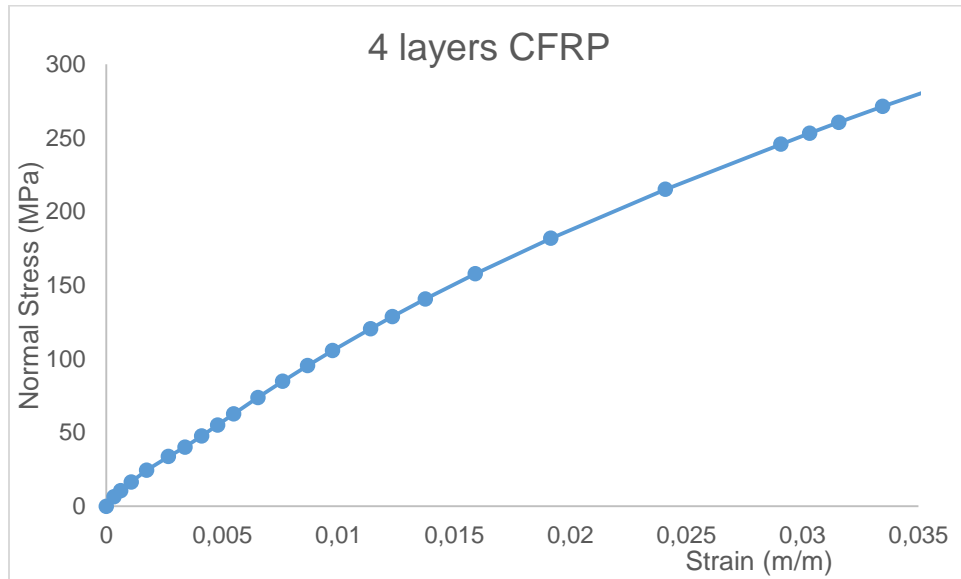


Διάγραμμα 3: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 3 στρώσεις CFRP.

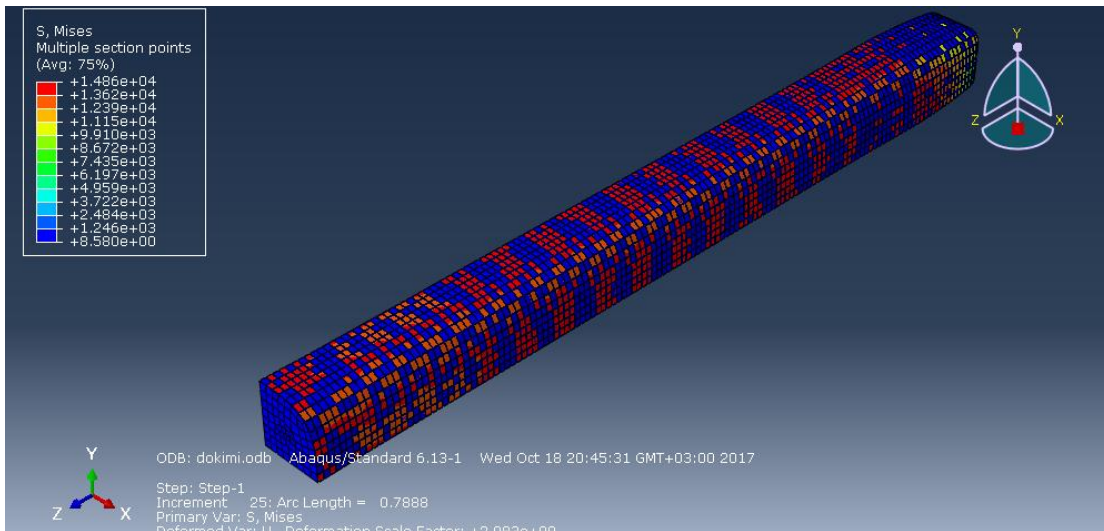


Εικόνα 6-3: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστρώματος.

➤ 4 layers CFRP,  $t=0.66\text{mm}$ .

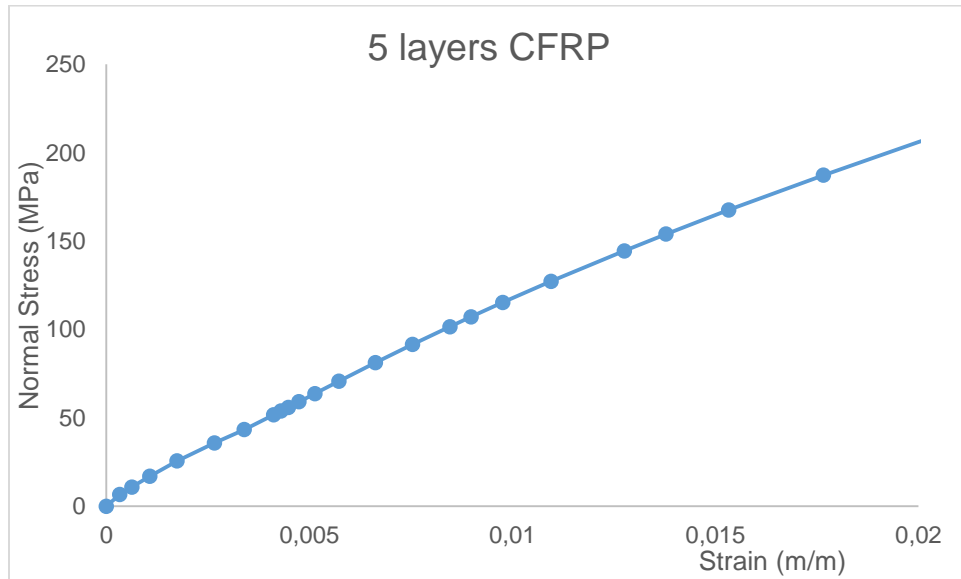


Διάγραμμα 4: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 4 στρώσεις CFRP.

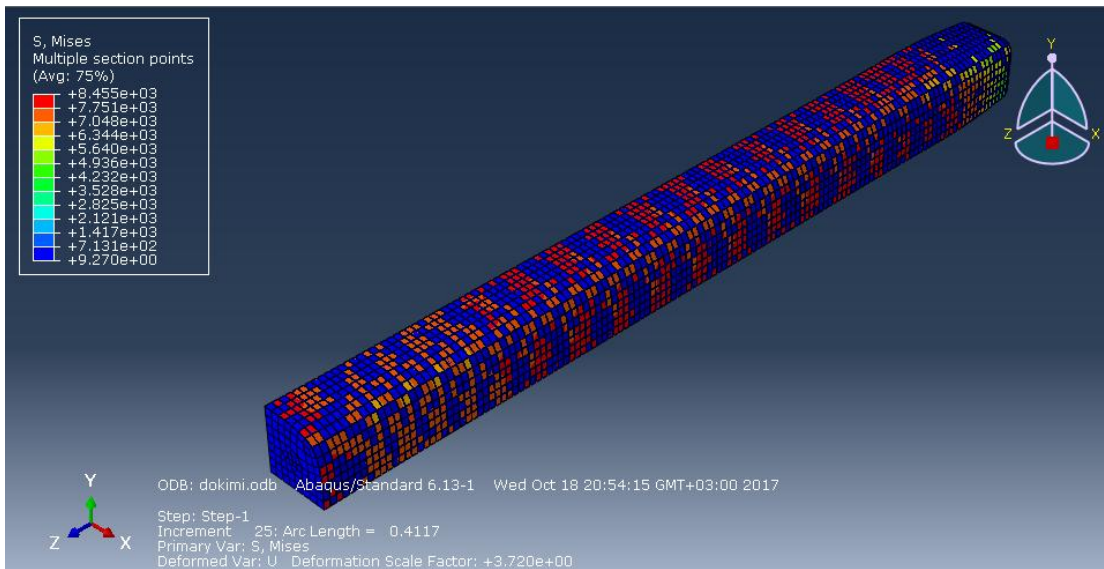


Εικόνα 6-4: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστυλώματος.

➤ 5 layers CFRP,  $t=0.825\text{mm}$ .

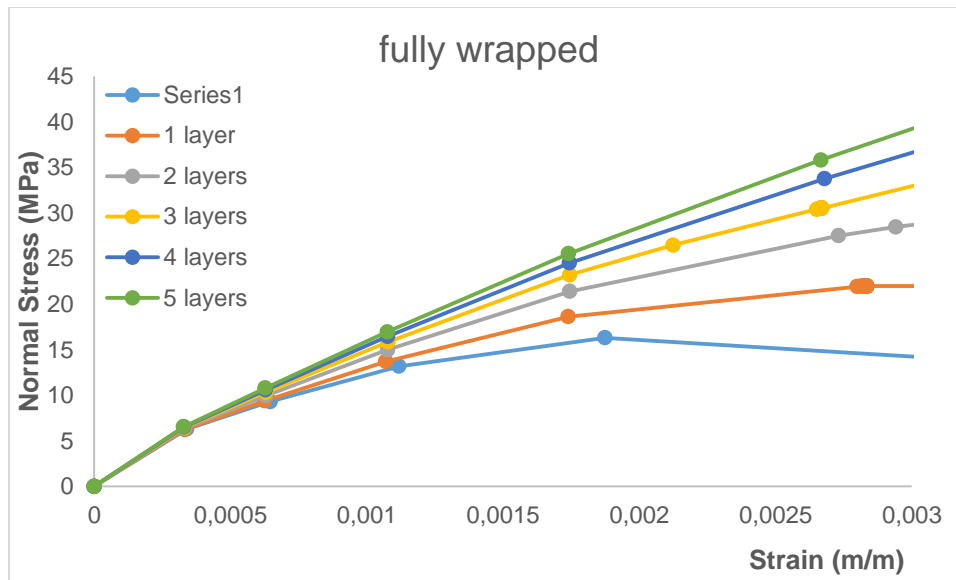


Διάγραμμα 5: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 5 στρώσεις CFRP.



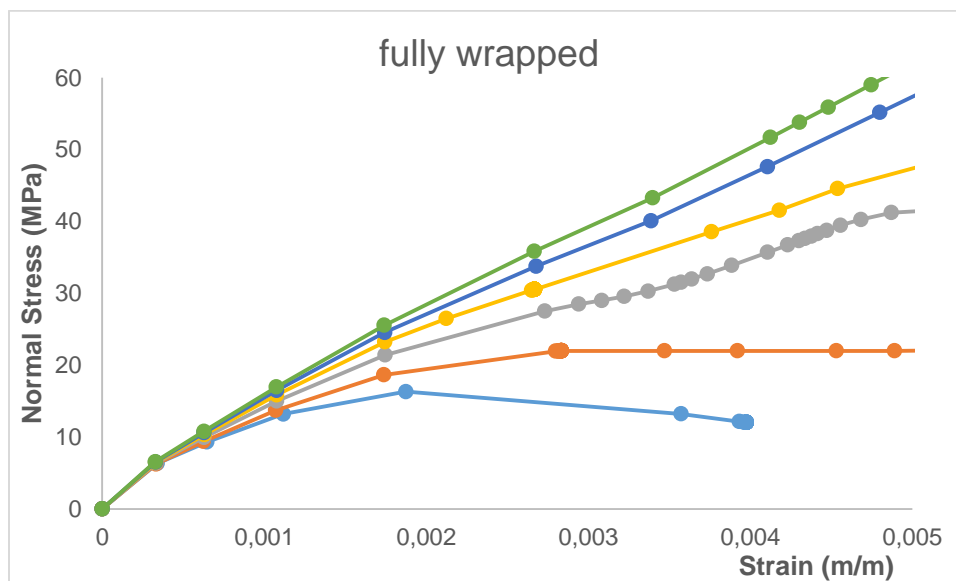
Εικόνα 6-5: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστυλώματος.

Ακολουθούν συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων- παραμορφώσεων των πλήρως ενισχυμένων δοκιμίων όπου φαίνεται η αύξηση της αντοχής σε θλίψη των περισφιγμένων υποστυλωμάτων όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ανθρακούφασματος, δηλαδή όσο αυξάνονται οι στρώσεις του frp.



Διάγραμμα 6: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ως προς τον αριθμό των στρώσεων του CFRP και το απερίσφιγχο προσομοίωμα.

Το παραπάνω είναι το δ/μα τάσης- παραμόρφωσης του προσομοιώματος με  $r=30\text{mm}$ . Παρατηρείται μεγάλη αύξηση της αντοχής σε σχέση με το απερίσφιγχο δοκίμιο (unwrapped). Στη διαρροή (3%) υπάρχει αύξηση αντοχής στα ενισχυμένα προσομοιώματα με CFRP κατά 30,34%, 13,79%, 9,85% και 8,97% με αύξηση 1 στρώσης κάθε φορά στα υποστυλώματα που έχουν ενισχυθεί με 1 έως 5 στρώσεις υφάσματος.



Διάγραμμα 7: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ως προς τον αριθμό των στρώσεων του CFRP και το απερίσφιγχο προσομοίωμα.

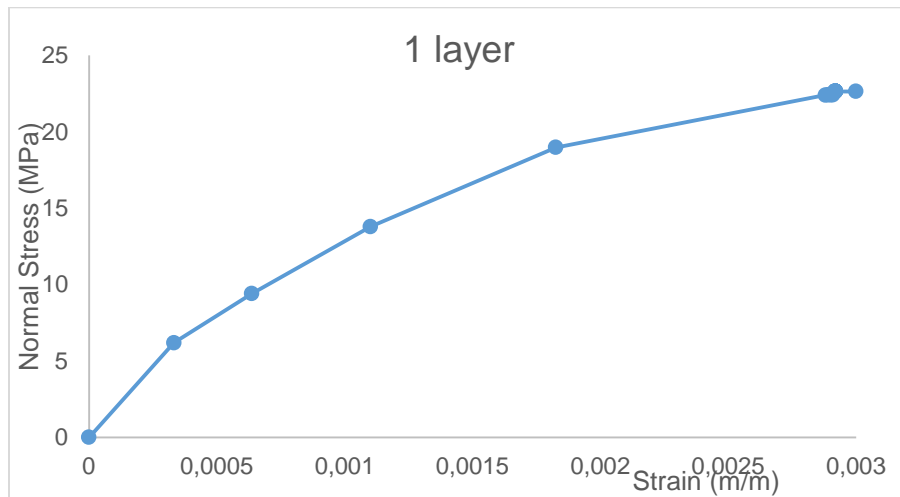
Με την αύξηση του πάχους του CFRP παρατηρείται αύξηση της αντοχής των υποστυλωμάτων σε θλίψη και κατά συνέπεια αύξηση της πλαστιμότητάς τους.



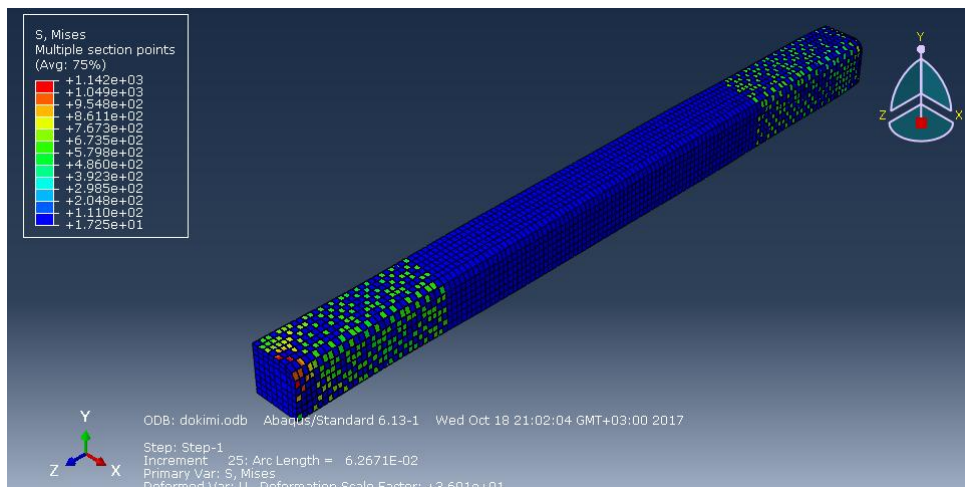
Οι μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται μετά τη διαρροή. Η αρχική δυστένεια μέχρι την παραμόρφωση του 3‰ είναι κοινή καθώς το ύφασμα δεν κατέχει δυστένεια.

## 2. Υποστύλωμα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο με CFRP στις κρίσιμες περιοχές (πάνω και κάτω) (partially wrapped) και γωνιακή καμπυλότητα $r=30\text{mm}$ , με επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση.

➤ 1 layer CFRP,  $t=0.165\text{mm}$ .

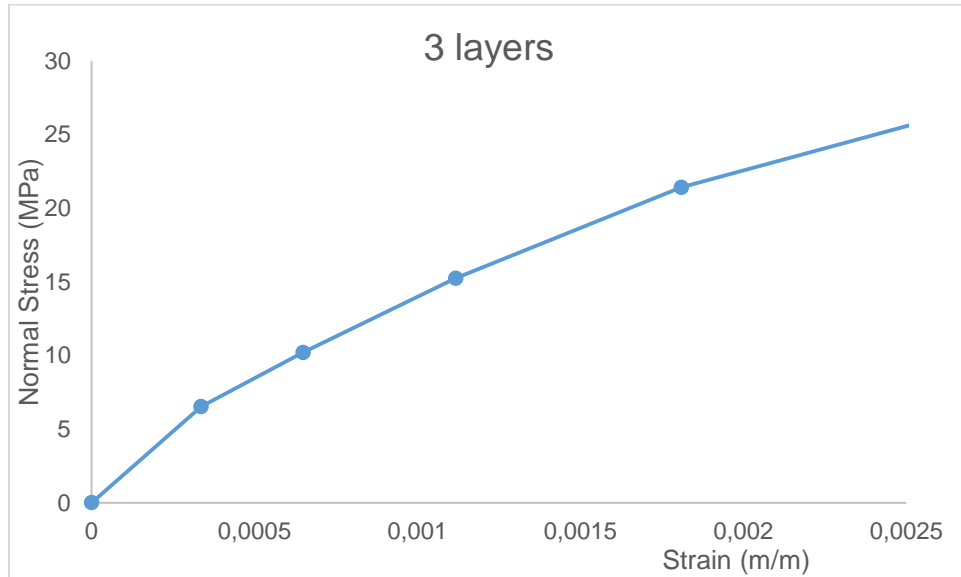


Διάγραμμα 8: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 1 στρώση CFRP στις κρίσιμες περιοχές.

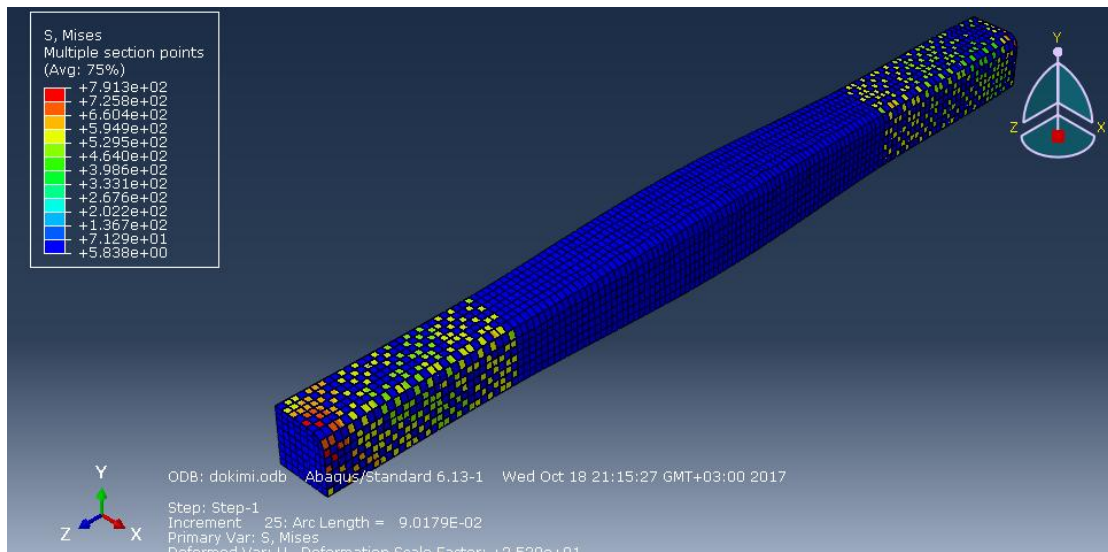


Εικόνα 6-6: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστύλωματος με ενίσχυση 1 στρώσης CFRP στις κρίσιμες περιοχές.

➤ 3 layers CFRP,  $t=0.495\text{mm}$ .

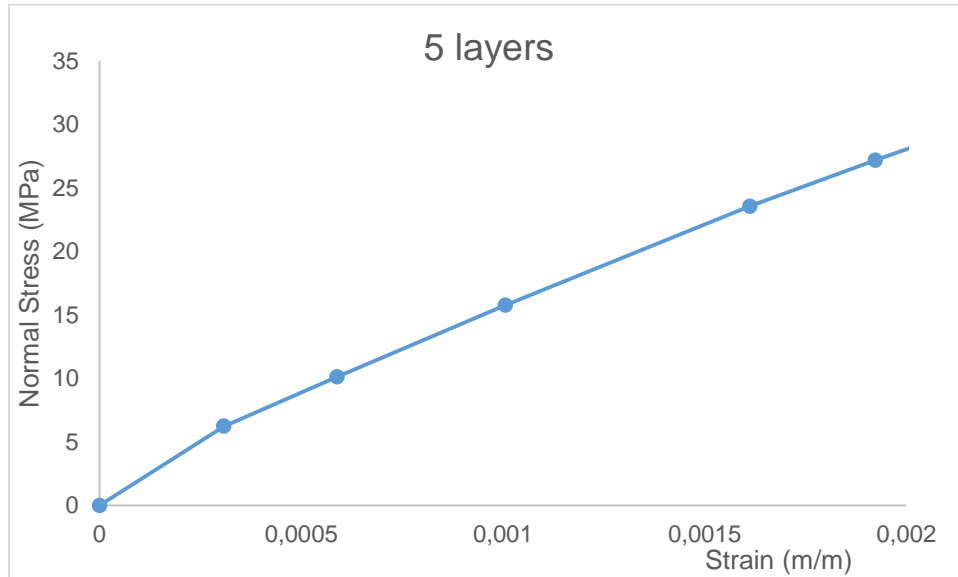


Διάγραμμα 9: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 3 στρώσεις CFRP στις κρίσιμες περιοχές.

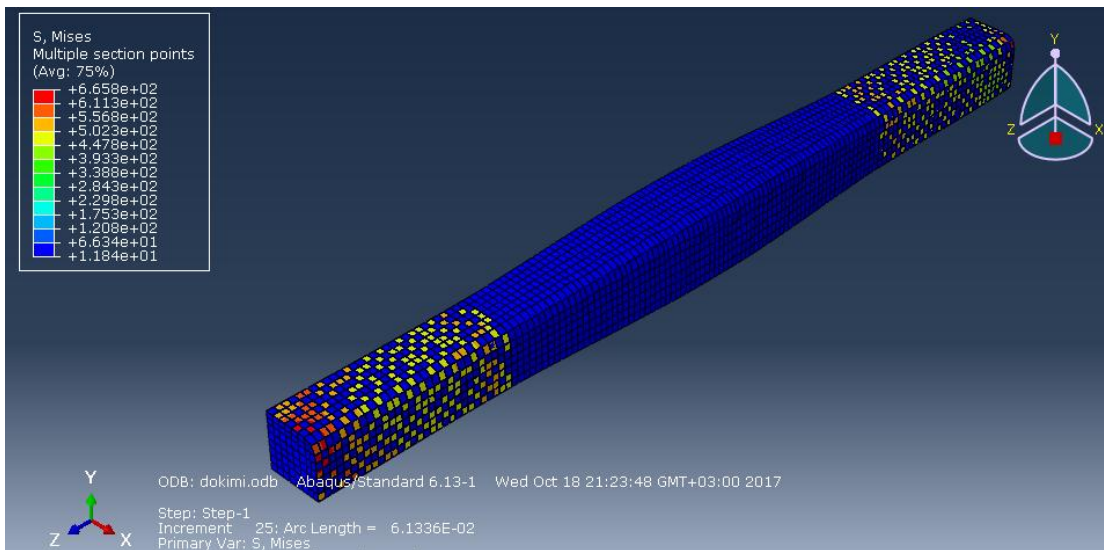


Εικόνα 6-7: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστυλώματος με ενίσχυση 3 στρώσεων CFRP στις κρίσιμες περιοχές.

➤ 5 layers CFRP,  $t=0.825\text{mm}$ .

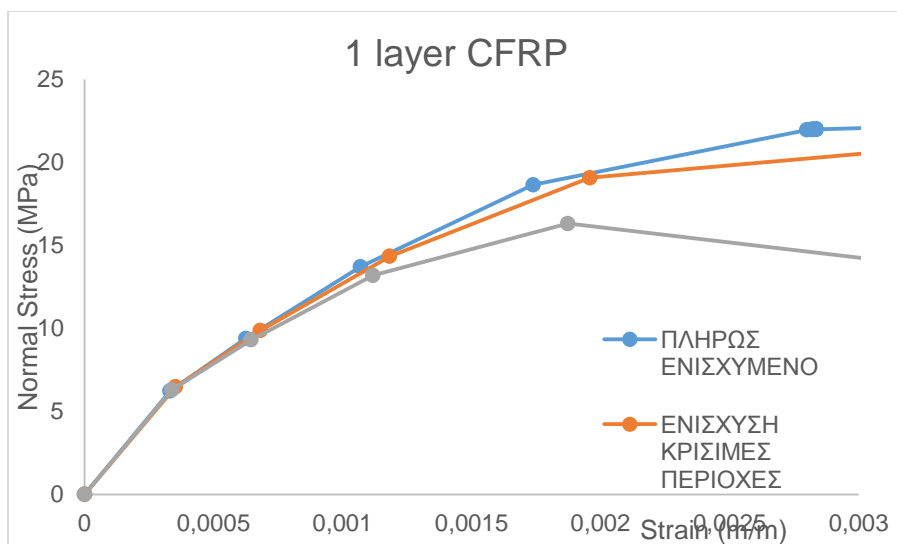


Διάγραμμα 10: Δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 5 στρώσεις CFRP στις κρίσιμες περιοχές.



Εικόνα 6-8: Περίγραμμα (contour) καταπονήσεων υποστυλώματος με ενίσχυση 5 στρώσεων CFRP στις κρίσιμες περιοχές.

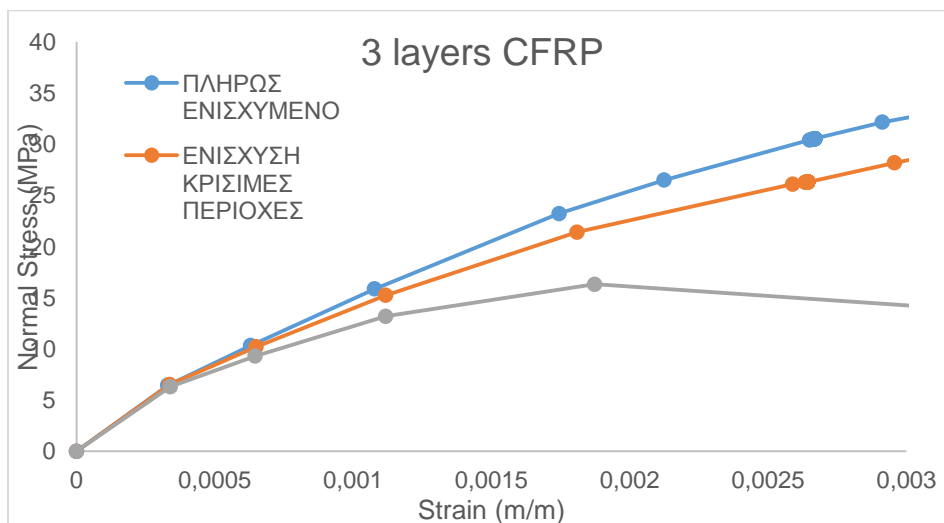
Ακολουθούν συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων- παραμορφώσεων των πλήρως ενισχυμένων υποστυλωμάτων, των περισφιγμένων στις κρίσιμες περιοχές καθώς και του απερίσφιγτου υποστυλώματος όπου φαίνεται η αύξηση της αντοχής σε θλίψη αναλογα με τον τρόπο περισφιγξης.



Διάγραμμα 11: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ως προς το είδος της ενίσχυσης 1 στρώσης CFRP και το απερίσφιγχο προσομοίωμα.

Το παραπάνω είναι δ/μα τάσης- παραμόρφωσης του προσομοιώματος με γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$ . Στη διαρροή (3%) παρατηρείται αύξηση της αντοχής του υποστυλώματος που έχει ενισχυθεί σε όλο το ύψος του με ανθραούφασμα 1 στρώσης κατά 14.29% μεγαλύτερη σε σχέση με το υποστύλωμα που έχει ενισχυθεί τμηματικά με ανθρακούφασμα στις κρίσιμες περιοχές του.

Επιπλέον, για το ίδιο προσομοίωμα, παρατηρείται αύξηση της αντοχής στη διαρροή από το απερίσφιγχο δοκίμιο κατά 44.83% στο αντίστοιχο ενισχυμένο στις κρίσιμες περιοχές, ενώ 65.52% στο πλήρως ενισχυμένο.

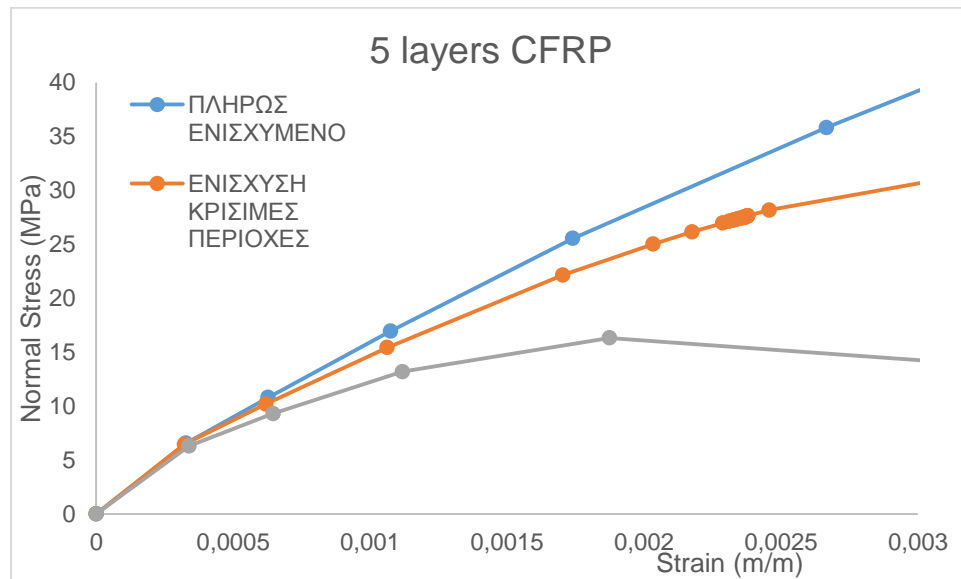


Διάγραμμα 12: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ως προς το είδος της ενίσχυσης 3 στρώσεων CFRP και το απερίσφιγχο προσομοίωμα.

Το παραπάνω είναι δ/μα τάσης- παραμόρφωσης του προσομοιώματος με γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$ . Στη διαρροή (3%) παρατηρείται αύξηση της αντοχής του υποστυλώματος που έχει ενισχυθεί σε όλο το ύψος του με ανθραούφασμα 3 στρώσεων

κατά 17.86% μεγαλύτερη σε σχέση με το υποστύλωμα που έχει ενισχυθεί τμηματικά με ανθρακούφασμα στις κρίσιμες περιοχές του.

Για το ίδιο προσομοίωμα 3 στρώσεων CFRP, παρατηρείται αύξηση της αντοχής στη διαρροή από το απερίσφιγχο δοκίμιο κατά 93.31% στο αντίστοιχο ενισχυμένο στις κρίσιμες περιοχές, ενώ 127.5% στο πλήρως ενισχυμένο.



Διάγραμμα 13: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ως προς το είδος της ενίσχυσης 5 στρώσεων CFRP και το απερίσφιγχο προσομοίωμα.

Το παραπάνω είναι δ/μα τάσης- παραμόρφωσης του προσομοιώματος με γωνιακή καμπυλότητα  $r=30\text{mm}$ . Στη διαρροή (3%) παρατηρείται αύξηση της αντοχής του υποστύλωματος που έχει ενισχυθεί σε όλο το ύψος του με ανθρακούφασμα 5 στρώσεων 25.81% μεγαλύτερη σε σχέση με το υποστύλωμα που έχει ενισχυθεί τμηματικά με ανθρακούφασμα στις κρίσιμες περιοχές του.

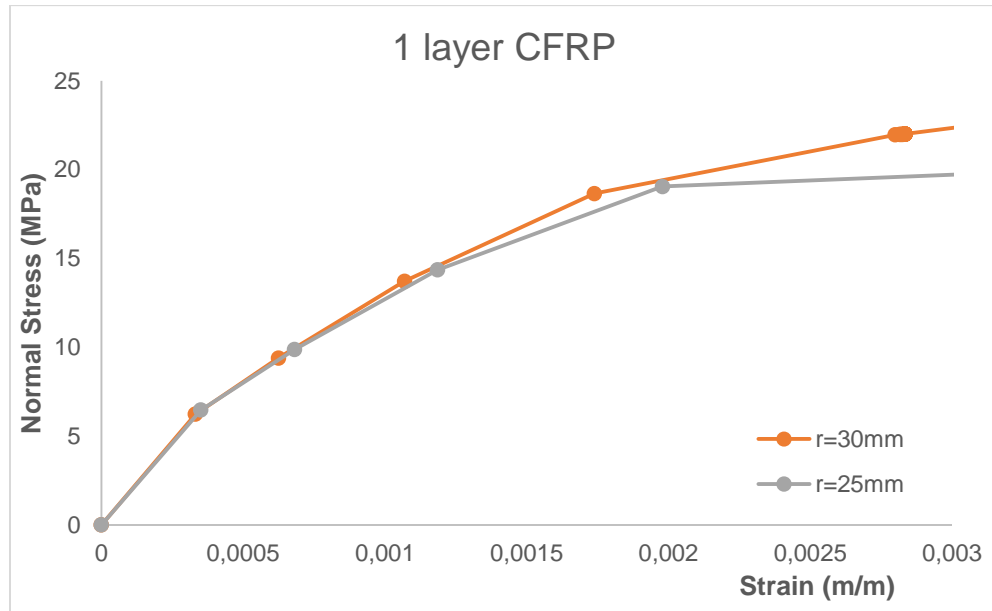
Για το ίδιο προσομοίωμα 5 στρώσεων CFRP, παρατηρείται αύξηση της αντοχής στη διαρροή από το απερίσφιγχο δοκίμιο κατά 113.8 % στο αντίστοιχο ενισχυμένο στις κρίσιμες περιοχές, ενώ 169% στο πλήρως ενισχυμένο.

### 3.Υποστύλωματα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένα με ύφασμα CFRP σε όλο το μήκος τους (fully wrapped) και ακτίνα καμπύλωσης $r=30\text{mm}$ και $r=25\text{mm}$ , με επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση.

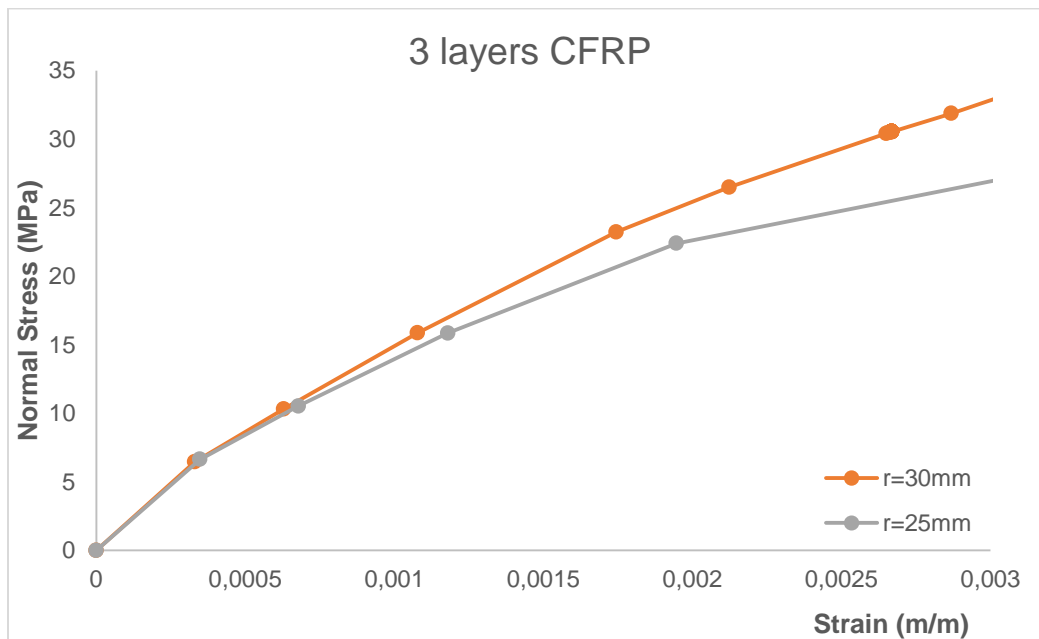
Έχουν σχεδιαστεί προσομοιώματα υποστύλωματων με μικρότερη γωνιακή καμπυλότητα ( $r=25\text{mm}$ ) από τα αρχικά ( $r=30\text{mm}$ ). Έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά και υπόκεινται στην ίδια αξονική καταπόνηση.

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων- παραμορφώσεων όπου παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε θλίψη στη διαρροή στα προσομοιώματα με τη μεγαλύτερη ακτίνα καμπύλωσης (corner radius).

Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση στα δοκίμια με  $r=30\text{mm}$  από εκείνα με  $r=25\text{mm}$  κατά 12,82%, 42,48%, και 46,63% με ενίσχυση 1, 3 και 5 στρώσεων ανθρακουφάσματος αντίστοιχα.

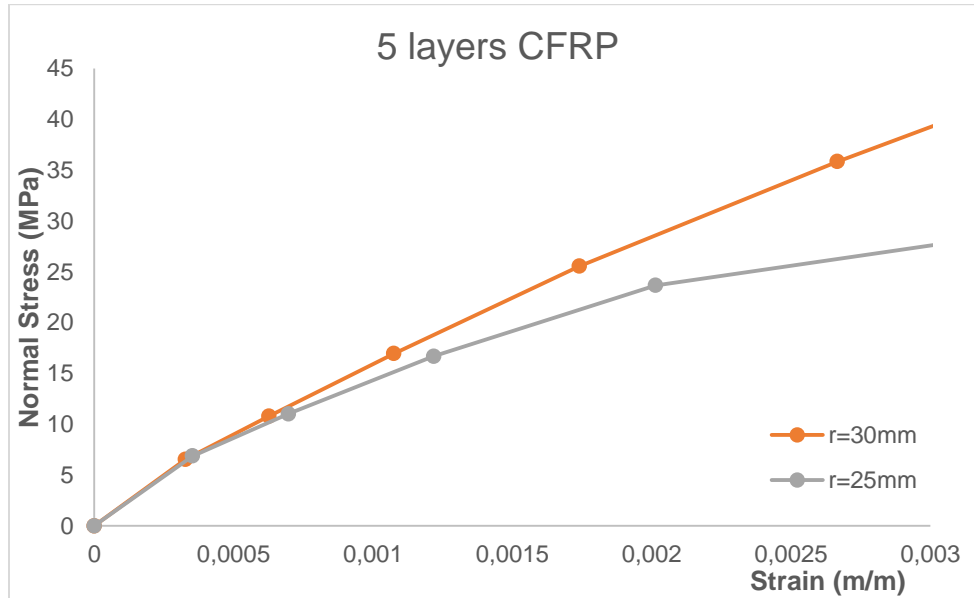


Διάγραμμα 14: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ενίσχυσης με 1 στρώση CFRP προσομοιωμάτων με διαφορετική γωνιακή καμπυλότητα.



Διάγραμμα 15: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ενίσχυσης με 3 στρώσεις CFRP προσομοιωμάτων με διαφορετική γωνιακή καμπυλότητα.

Η αποδοτικότητα της περίσφιγξης καθορίζεται λοιπόν και από την ακτίνα καμπυλότητας και συγκεκριμένα η μεγαλύτερη καμπυλότητα συνεπάγεται καλύτερη απόδοση περίσφιγξης.



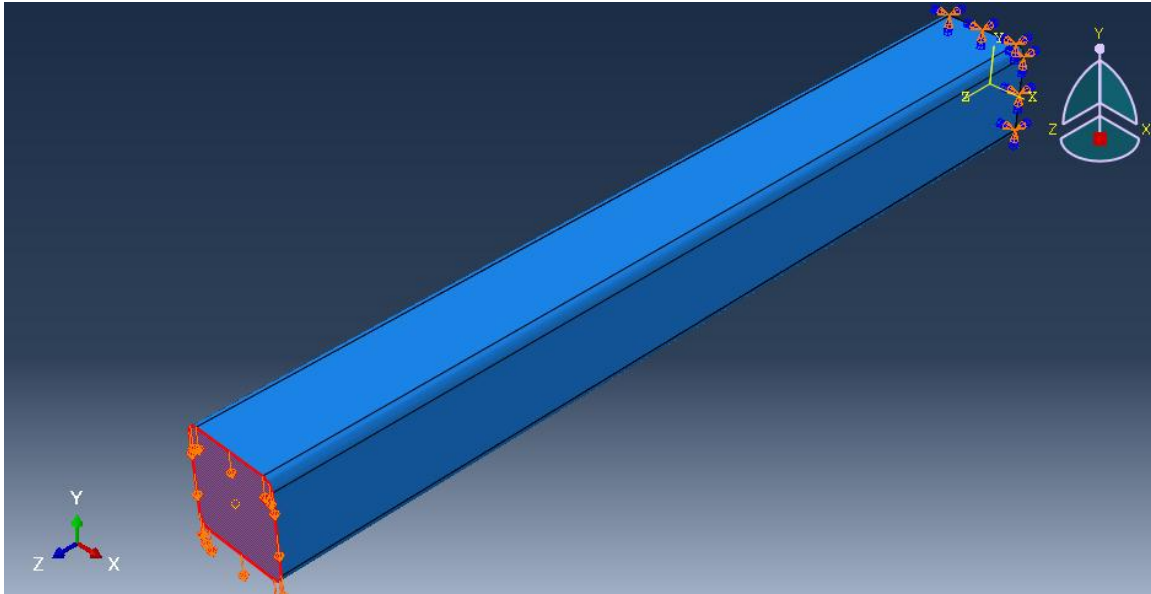
Διάγραμμα 16: Συγκριτικό δ/μα τάσεων- παραμορφώσεων ενίσχυσης με 3 στρώσεις CFRP προσομοιωμάτων με διαφορετική γωνιακή καμπυλότητα.

Με αύξηση της γωνίας καμπυλότητας των υποστυλωμάτων, η οποία είναι αναγκαία για τη σωστή τοποθέτηση και την αποτελεσματικότητα στην ενίσχυση του fip, παρατηρείται αύξηση της αντοχής τους σε θλίψη και κατά συνέπεια αύξηση της πλαστιμότητάς τους.

Η ακτίνα καμπύλωσης (corner radius) χρήζει μεγάλης προσοχής, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή και στην παραμόρφωση αστοχίας του δοκιμίου, αλλά και για να αποφευχθεί η γρήγορη αστοχία του μανδύα στις γωνίες.

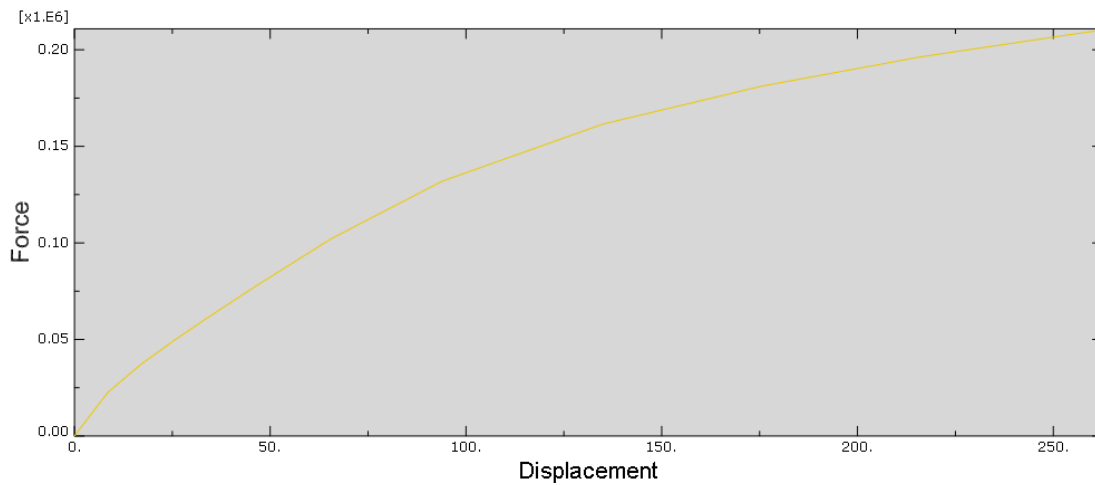
#### **4.Υποστυλώματα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένα με ύφασμα CFRP 1,3 και 5 στρώσεων και ασκούμενη διατμητική μετατόπιση.**

Σχεδιάστηκε προσομοίωμα υποστυλώματος διατομής 300x300mm ύψους 2700mm όπως και όλα τα προηγούμενα που μελετήθηκαν και με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Ενισχύθηκε αρχικά με 1 και στη συνέχεια με 3 και 5 στρώσεις ανθρακοϋφάσματος. Πακτώθηκε και αυτό στη βάση του και ασκήθηκε τέμνουσα.



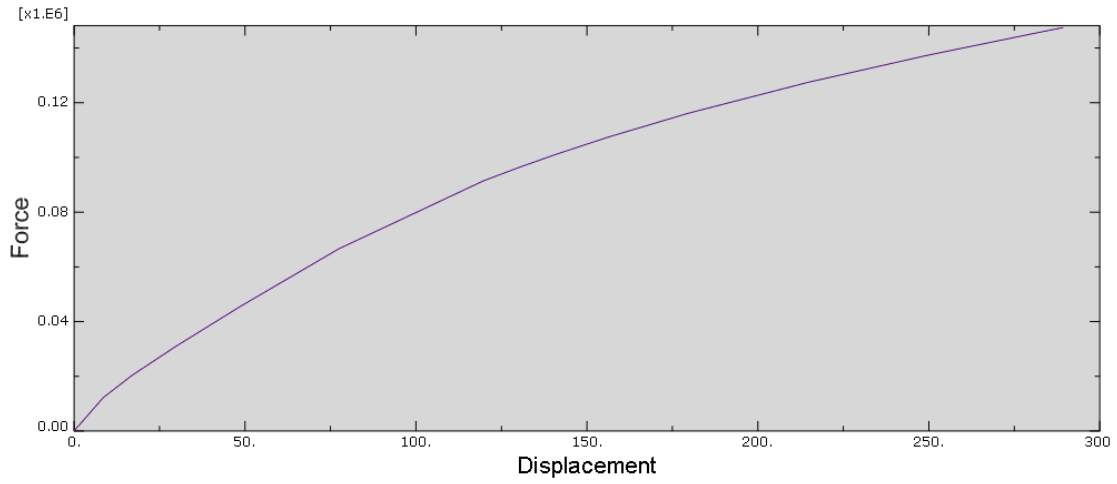
Εικόνα 6-9: Μετακίνηση και πάκτωση προσομοιώματος.

Ακολουθούν διαγράμματα φορτίου- μετατόπισης του προσομοιώματος για 1, 3 και 5 στρώσεις πλήρους ενίσχυσης σε όλο το μήκος του.

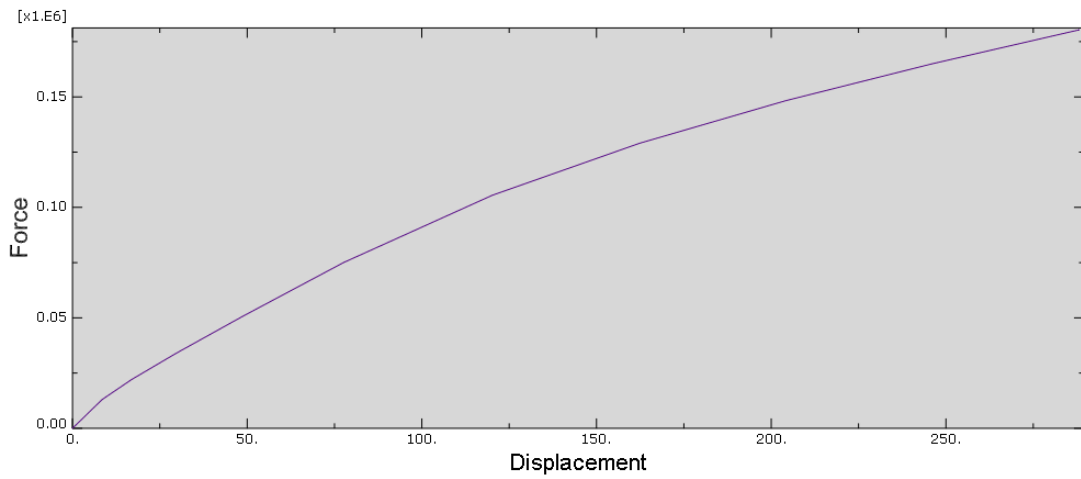


Διάγραμμα 17: Δ/μα φορτίου-μετακίνησης δ του προσομοιώματος με 1 στρώση CFRP.

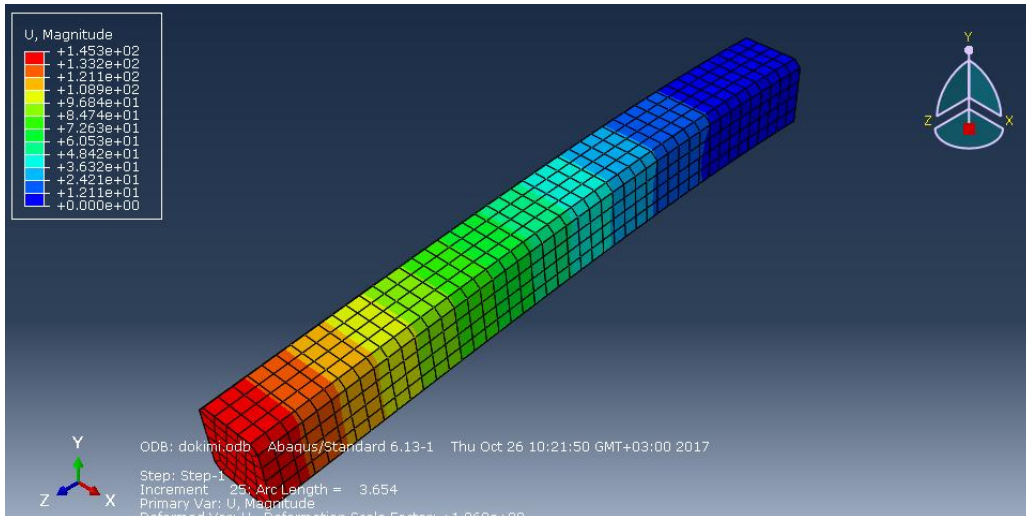




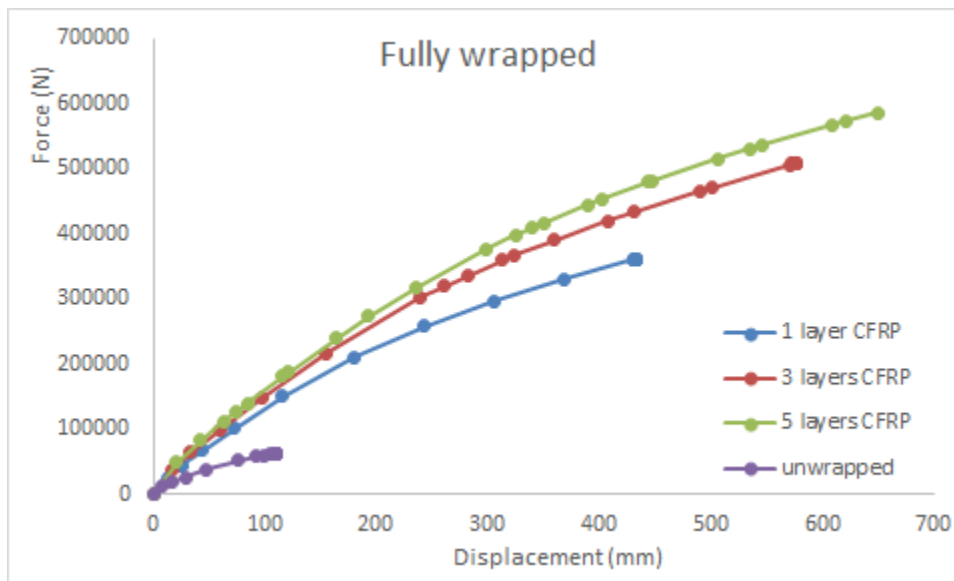
Διάγραμμα 18: Δ/μα φορτίου-μετακίνησης δ του προσομοιώματος με 3 στρώσεις CFRP.



Διάγραμμα 19: Δ/μα φορτίου-μετακίνησης δ του προσομοιώματος με 5 στρώσεις CFRP.



Εικόνα 6-10: Περίγραμμα (contour) μετακινήσεων υποστυλώματος.



Διάγραμμα 20: Συγκριτικό δ/μα φορτίου- μετακίνησης δ προσομοιωμάτων με διαφορετικό αριθμό στρώσεων CFRP (1,3 και 5 αντίστοιχα).

Από τα αποτελέσματα φαίνεται σημαντική αύξηση παραλαβής φορτίου σε όλα τα περισιφιγμένα υποστυλώματα με CFRP σε σχέση με το απερίσιφιγχο.

Παρατηρείται πως για δεδομένη τιμή φορτίου, η μετακίνηση του προσομοιώματος ελαττώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του ανθρακούφασματος. Η μεγαλύτερη μετακίνηση αντιστοιχεί στο υποστυλώμα που έχει ενισχυθεί με 1 στρώση υφάσματος CFRP. Άρα όσο ενισχύουμε το στοιχείο με περισσότερες στρώσεις υφάσματος τόσο μικρότερη μετατόπιση έχουμε.

Η περίσιφιξη του μανδύα frp δεν αφήνει το θρυμματισμένο σκυρόδεμα να διογκωθεί και να γίνει αποσάθρωση και λόγω του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας το ύφασμα μπορεί να δεχτεί μεγάλες πιέσεις με μικρές παραμορφώσεις. Αυξάνεται έτσι η πλαστιμότητα του στοιχείου.

## 7. Συμπεράσματα

Με την αύξηση του πάχους του CFRP παρατηρείται αύξηση της αντοχής των υποστυλωμάτων σε θλίψη και κατά συνέπεια αύξηση της φέρουσας ικανότητας και της πλαστιμότητάς τους.

Πρατηρείται μεγάλη αύξηση της αντοχής του πλήρως ενισχυμένου υποστυλώματος με μανδύα ανθρακοϋφάσματος (CFRP) σε σχέση με το απερίσφιγχο (unwrapped). Στη διαρροή (3%) υπάρχει αύξηση αντοχής στα ενισχυμένα προσομοιώματα με CFRP κατά 30,34%, 13,79%, 9,85% και 8,97% με αύξηση 1 στρώσης κάθε φορά στα υποστυλώματα που έχουν ενισχυθεί με 1 έως και 5 στρώσεις υφάσματος.

Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της αντοχής του υποστυλώματος που έχει ενισχυθεί σε όλο το μήκος του με CFRP (fully wrapped) σε σχέση με το υποστυλώμα που έχει ενισχυθεί τμηματικά με CFRP στις κρίσιμες περιοχές του (partially wrapped). Συγκεκριμένα, στη διαρροή (3%) παρατηρείται αύξηση της αντοχής του υποστυλώματος που έχει ενισχυθεί σε όλο το ύψος του με CFRP 1 στρώσης κατά 14.29%, 3 στρώσεων κατά 17.86% και 5 στρώσεων 25.81% μεγαλύτερη, σε σχέση με το υποστυλώμα που έχει ενισχυθεί τμηματικά με CFRP στις κρίσιμες περιοχές του.

Για το ίδιο προσομοίωμα, η αύξηση της αντοχής στη διαρροή είναι ακόμη μεγαλύτερη από το απερίσφιγχο δοκίμιο. Ενδεικτικά για 1 στρώση ανθρακοϋφάσματος η αντοχή αυξάνεται κατά 44.83% στο αντίστοιχο ενισχυμένο στις κρίσιμες περιοχές, ενώ 65.52% στο πλήρως ενισχυμένο.

Η ακτίνα καμπύλωσης (corner radius) χρήζει μεγάλης προσοχής, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή και στην παραμόρφωση αστοχίας του δοκιμίου, αλλά και για να αποφευχθεί η γρήγορη αστοχία του μανδύα στις γωνίες.

Με αύξηση της γωνίας καμπυλότητας των υποστυλωμάτων, η οποία είναι αναγκαία για τη σωστή τοποθέτηση και την αποτελεσματικότητα στην ενίσχυση του f<sub>fr</sub>, παρατηρείται αύξηση της αντοχής τους σε θλίψη και κατά συνέπεια αύξηση της πλαστιμότητάς τους. Στα εξεταζόμενα προσομοιώματα παρατηρήθηκε αύξηση στα δοκίμια με r=30mm από εκείνα με r=25mm κατά 12,82%, 42,48%, και 46,63% με ενίσχυση 1, 3 και 5 στρώσεων ανθρακοϋφάσματος αντίστοιχα.

Τέλος, για ασκούμενη τέμνουσα, από τα αποτελέσματα φαίνεται σημαντική αύξηση παραλαβής φορτίου σε όλα τα περισφιγμένα προσομοιώματα με CFRP σε σχέση με το απερίσφιγχο. Στα ενισχυμένα υποστυλώματα με 1,3 και 5 στρώσεις CFRP και για δεδομένη τιμή φορτίου, η μετακίνηση του προσομοιώματος ελαττώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του ανθρακοϋφάσματος. Η μεγαλύτερη μετακίνηση αντιστοιχεί στο υποστυλώμα που έχει ενισχυθεί με 1 στρώση υφάσματος CFRP. Άρα όσο ενισχύουμε το στοιχείο με περισσότερες στρώσεις υφάσματος τόσο μικρότερη μετατόπιση έχουμε.

Η περίσφιξη του μανδύα f<sub>fr</sub> δεν αφήνει το θρυμματισμένο σκυρόδεμα να διογκωθεί και να γίνει αποσάθρωση και λόγω του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας το ύφασμα μπορεί να δεχτεί μεγάλες πιέσεις με μικρές παραμορφώσεις. Αυξάνεται έτσι η πλαστιμότητα του στοιχείου.

## 8. Βιβλιογραφία

[1] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ): Κανονισμός Επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ, Τελικό κείμενο Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010, [www.oasp.gr](http://www.oasp.gr)

[2] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ): Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις στα Κτήρια, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, Απρίλιος 2001, [www.oasp.gr](http://www.oasp.gr)

[3] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ): Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 & Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000

[4] Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance –, Part 3, European Standard EN 1998-3:2005

[5]<http://www.episkeues.civil.upatras.gr/ergasies%202008/11%20ΚΑΙΡΗΣ%20ΧΑΤΖΗΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ.pdf>

[6] Rousakis C. T., Karabinis I.A., Kiouisis D.P., Tefpers R., “ Analytical modeling of plastic behavior of uniformly FRP confined concrete member”, October 2006

[7] Rahul Ravala, Urmil Dave, Chemical, Civil and Mechanical Tracks of the 3rd Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE 2012)

[8] Δρίτσος Σ., Επεμβάσεις και Ενισχύσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, 2009

[9] Σκεπάρνης Ευθύμιος, “Αναλυτική Διερεύνηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων Ενισχυμένου Υποστρώματος με Μανδύα Σκυροδέματος”, Διπλωματική Εργασία:2014

[10]Theodoros C. Rousakis, Theodoros D. Rakitzis, and Athanasios I. Karabinis, “Design-Oriented Strength Model for FRP-ConfinedConcrete Members”,The 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Rome, 13 - 15 of June 2012

[11]B G Charalambidi, T C Rousakis, A I Karabinis, “Finite element modeling of reinforced concrete columns seismically strengthened through partial FRP jacketing”,15 WCEE, Lisboa, 2012

[12]Dimitra V. Achillopoulou, Eythimios Skeparnis, Athanasios I. Karabinis, “Investigation of the interface behavior of the retrofitted concrete columns through fea”, 2ECEES, Instabul, august 2014

[13] Yu-Fei Wu, You-Yi Wei, “Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns”, 2010

[14] TogayOzbakkaloglu and Deric J. Oehlers, “Concrete-Filled Square and Rectangular FRP Tubesunder Axial Compression”, 2008

[15] Δρίτσος Σ., Επεμβάσεις και Ενισχύσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, 2009

[20]<http://www.episkeues.civil.upatras.gr/ergasies%202008/11%20ΚΑΙΡΗΣ%20ΧΑΤΖΗΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ.pdf>

[16] Zhou, H, Li, Du, X. &Guo, E., “Experimental study on size effect of bending failure mechanism of RC beams.”, 2012