

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών

**Αριθμητική Προσομοίωση της Συμπεριφοράς
Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος
για Δομικές Εφαρμογές**

Κυριακή Γεωργιάδη-Στεφανίδη
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ., M.Sc.

Διδακτορική Διατριβή

Επιβλέπων: Καθηγητής Ευριπίδης Μυστακίδης

Βόλος 2012

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών

Αριθμητική Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος για Δομικές Εφαρμογές

Κυριακή Γεωργιάδη-Στεφανίδη
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ., M.Sc.

Διδακτορική Διατριβή

Υποβλήθηκε
στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Εξεταστική επιτροπή:

Καθηγητής Ε. Μυστακίδης, Επιβλέπων

Καθηγητής Φ. Περδικάρης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Κ. Στυλιανίδης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Α. Κάππος

Καθηγητής Α. Τριανταφύλλου

Αν. Καθηγητής Σ. Καραμάνος

Αν. Καθηγητής Ε. Μπούσιας

Βόλος 2012

*Στην οικογένειά μου
και όσους με στήριξαν
στην προσπάθεια αυτή*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τον Ιανουάριο του 2007, ο Καθηγητής κ. Ευριπίδης Μυστακίδης μου πρότεινε την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής με θέμα: Αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος για δομικές εφαρμογές. Έναυσμα αποτέλεσε το ερευνητικό πρόγραμμα «Ανάπτυξη, πιλοτική παραγωγή και δοκιμαστική εφαρμογή νέας γενιάς σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο, για τη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών», με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή κ. Ε. Μυστακίδη.

Σήμερα, τελειώνοντας την διδακτορική διατριβή μου, έπειτα από πέντε περίπου χρόνια ερευνητικής προσπάθειας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Ε. Μυστακίδη, επιβλέποντα της δουλειάς αυτής. Τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της διατριβής, καθώς και για την ενθάρρυνση, την καθοδήγηση, τις υποδείξεις του και τη συνεχή επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής της διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Φίλιππο Περδικάρη για την πολύτιμη συνεργασία του αλλά και ως υπεύθυνο για την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών κάμψης δοκών, στα αποτελέσματα των οποίων βασίστηκε ένα σημαντικό μέρος της διατριβής και τον Καθηγητή κ. Κοσμά Στυλιανίδη για τις εύστοχες παρατηρήσεις και τις βελτιωτικές προτάσεις του στο κείμενο της διατριβής.

Σχετικά με τα πειράματα των δοκιμών κάμψης δοκών που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Θεοχάρη Παπαθεοχάρη για τη σημαντική συμβολή του, καθώς και όλους όσους εργάστηκαν για την πραγματοποίηση των πειραμάτων αυτών. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μιχάλη Ζυγομαλά για τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης ινών στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης, στην Επίκουρο Καθηγήτρια κα. Ολυμπία Παναγούλη για τις συμβουλές της και τη βοήθεια που μου προσέφερε. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μηχανικούς με τους οποίους συνεργάστηκα στο χώρο του Εργαστηρίου Ανάλυσης και Σχεδιασμού των Κατασκευών κατά τη διάρκεια των πέντε αυτών ετών και κυρίως την υποψήφια διδάκτορα Δάφνη Παντούσα και τον διδάκτορα Κωνσταντίνο Τζάρο για τη συνεργασία, την υποστήριξη και τη φιλία τους.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, τους φίλους και το σύντροφό μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Τους είμαι ευγνώμων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Αντικείμενο και στόχοι της έρευνας	3
1.3	Διάρθρωση της διατριβής.....	5
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	9
2.1	Εισαγωγή.....	9
2.2	Δοκιμή εξόλκευσης ινών κάθετων στο επίπεδο της ρωγμής	9
2.3	Δοκιμή εξόλκευσης ινών με γωνία προσανατολισμού ως προς το επίπεδο της ρωγμής	12
2.4	Δομικά μέλη από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα	16
2.5	Μανδύες για την ενίσχυση δομικών μελών.....	20
2.6	Συνεισφορά της διατριβής στο πεδίο του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	24
3	ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	27
3.1	Εισαγωγή.....	27
3.2	Μη-γραμμική ανάλυση	27
3.2.1	Μη-γραμμικότητα υλικού	28
3.2.2	Γεωμετρική μη-γραμμικότητα	31
3.2.3	Μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες.....	31
3.3	Μέθοδος μη-γραμμικής ανάλυσης.....	32
3.4	Τύποι χρησιμοποιούμενων Πεπερασμένων Στοιχείων	34
3.4.1	Π.Σ. αριθμητικών προσομοιωμάτων δοκιμής εξόλκευσης ινών από τσιμεντοειδή μήτρα.....	35
3.4.2	Π.Σ. αριθμητικών προσομοιωμάτων δοκιμών κάμψης δοκών	36
4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΜΗΤΡΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	39
4.1	Εισαγωγή.....	39
4.1.1	Εξόλκευση ευθύγραμμων ινών	40
4.1.2	Εξόλκευση ινών με αγκιστροειδή άκρα	41
4.1.3	Εξόλκευση ινών με γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης	42
4.2	Πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης	44
4.3	Το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από τσιμεντοειδή μήτρα	48
4.4	Αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς διαφορετικών τύπων ινών με αγκιστροειδή άκρα	65
4.5	Μόρφωση δισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	68
4.6	Αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς ινών με αγκιστροειδή άκρα που εξολκεύονται με διαφορετικές γωνίες φόρτισης.....	75
5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑ	87
5.1	Εισαγωγή.....	87
5.2	Χαρακτηριστικά των μελετώμενων δοκών	87
5.2.1	Γεωμετρία	87
5.2.2	Υλικά	89
5.2.3	Εκτίμηση της συμπεριφοράς της δοκού Ο/Σ	90
5.2.4	Τύποι φόρτισης	90
5.3	Πειραματικές δοκιμές κάμψης δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος	91
5.4	Αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης	93
5.4.1	Προσομοίωση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	93
5.4.2	Προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών	94
5.4.3	Προσομοίωση της διαδικασίας επιβολής της φόρτισης	97
5.4.4	Διαδικασία επίλυσης	98
5.5	Δοκοί Τύπου Α – προσομοίωση και αποτελέσματα	98
5.5.1	Τρισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Α	98
5.5.2	Δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Α	99
5.5.3	Αποτελέσματα για τη στατική μονοτονική φόρτιση.....	100
5.5.4	Αποτελέσματα για τη στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση	102
5.6	Δοκοί Τύπου Β – προσομοίωση και αποτελέσματα	105
5.6.1	Δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Β.....	105
5.6.2	Αποτελέσματα για τη στατική μονοτονική φόρτιση.....	106
5.6.2	Αποτελέσματα για τη στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση	109
5.7	Δοκοί Τύπου Γ – προσομοίωση και αποτελέσματα	112

5.7.1 Δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Γ	112
5.7.2 Αποτελέσματα για τη στατική μονοτονική φόρτιση.....	113
5.7.3 Αποτελέσματα για τη στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση	117
5.8 Σύνοψη αποτελεσμάτων	121
6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΩΝ Ο/Σ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ.....	123
6.1 Εισαγωγή.....	123
6.2 Χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκών	123
6.2.1 Γεωμετρία	123
6.2.2 Υλικά	126
6.2.3 Τύποι φόρτισης	127
6.3 Πειραματικές δοκιμές κάμψης δοκών Ο/Σ, ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	127
6.4 Αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης ενισχυμένων δοκών	128
6.5 Συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών υπό στατική μονοτονική κάμψη.....	131
6.6 Συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη	137
6.7 Σύνοψη των αποτελεσμάτων	144
7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ	147
7.1 Εισαγωγή.....	147
7.2 Προσομοίωση διατομής δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και δοκών ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	147
7.2.1 Προσομοίωση διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό.....	148
7.2.2 Προσομοίωση διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	155
7.3 Πρακτική εφαρμογή αποτίμησης υφιστάμενου κτιρίου Ο/Σ και ενίσχυσης των μελών του με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	160
7.3.1 Σύντομη περιγραφή του κτιρίου	160
7.3.2 Αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της υφιστάμενης κατασκευής.....	163
7.3.3 Ανάλυση διατομών των υφιστάμενων και ενισχυμένων υποστρωμάτων της κατασκευής ..	168
7.3.4 Ενίσχυση της υφιστάμενης κατασκευής με την εφαρμογή λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.....	175
8 ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	181
8.1 Σύνοψη και συμπεράσματα.....	181
8.2 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής.....	183
8.3 Προοπτικές περαιτέρω έρευνας	186
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:.....	189
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ Π.Σ.	189
A.1 Προσδιορισμός της τάσης διαρροής του ισοδύναμου υλικού	189
A.2 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τιμών ϵ_1 και ϵ_2 του νόμου σ - ϵ του ισοδύναμου υλικού	192
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:.....	195
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ Π.Σ.....	195
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:	199
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ	199
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	205
ENGLISH SUMMARY.....	213

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

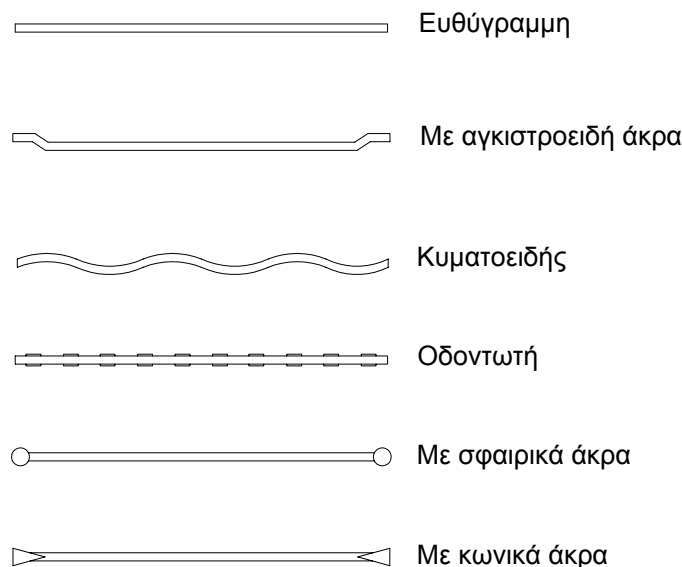
1.1 Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χαρακτηρίζεται από χαμηλή εφελκυστική αντοχή και σχετικά ψαθυρή συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται με τη μορφή του οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς οι ράβδοι οπλισμού αναλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις και προσφέρουν αντοχή και πλαστιμότητα στα δομικά μέλη. Με βάση την ίδια αυτή αρχή, ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 η ανάπτυξη του ινοπλισμένου σκυροδέματος με την προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα. Κατ' επέκταση, αναπτύχθηκαν και τα ινοπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με την προσθήκη ινών σε μήτρες διαφόρων τύπων τσιμεντοκονιαμάτων. Έχει αποδειχτεί ότι η συνολική συμπεριφορά του σκυροδέματος και γενικά των προϊόντων τσιμεντοκονιάματος βελτιώνεται σημαντικά μετά την προσθήκη των ινών. Η θετική επιρροή των ινών στις ιδιότητες του σκυροδέματος δεν είναι σημαντική πριν τη ρηγμάτωση, αλλά από το σημείο αυτό και έπειτα η συμπεριφορά του σύνθετου, πλέον, υλικού είναι ουσιαδώς διαφορετική. Οι ίνες «γεφυρώνουν» τις αναπτυσσόμενες ρωγμές, με αποτέλεσμα αυτές να περιορίζονται καθώς απορροφάται μέρος της ενέργειας διάδοσής τους.

Η βελτίωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού βασίζεται κυρίως στην ύπαρξη συνάφειας μεταξύ της ίνας και του τσιμεντοκονιάματος. Πιο συγκεκριμένα, η συνάφεια που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών είναι ο παράγοντας που περιορίζει την εξάπλωση των ρωγμών στη μήτρα του τσιμεντοκονιάματος. Όταν δημιουργείται μια ρωγμή σε δοκίμιο ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, παρατηρούνται δύο φαινόμενα: η σταδιακή απώλεια συνάφειας στη διεπιφάνεια και η ολίσθηση της ίνας κατά το άνοιγμα της ρωγμής. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μέρους της ενέργειας διάδοσης των ρωγμών. Η αντίσταση στην εξάπλωση των ρωγμών εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και της διεπιφάνειας, καθώς και από το μήκος, τον προσανατολισμό, την πυκνότητα κατ' όγκο και τη γεωμετρία των ινών.

Για τη δημιουργία ινοπλισμένου σκυροδέματος ή ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιούνται διάφορα είδη ινών, όπως χαλύβδινες, συνθετικές και ίνες γυαλιού. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση χαλύβδινων ινών. Οι πρώτες χαλύβδινες ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ευθύγραμμες. Από τη δεκαετία του 1970 άρχισε να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο σχεδιασμό των χαλύβδινων ινών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών τύπων που διαφέρουν ως προς το σχήμα, το μέγεθος, τη διατομή και την ποιότητα του υλικού (Naaman 2003). Έτσι, διατίθενται σήμερα ίνες με αγκιστροειδή άκρα, κυματοειδείς, οδοντωτές, με κωνικά ή σφαιρικά άκρα κ.λ.π. Το σχήμα τους έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε σχέση με τις ευθύγραμμες ίνες, καθώς αυξάνεται ο μηχανισμός αγκύρωσης των ινών στο τσιμεντοκονίαμα και, επομένως, η αντίσταση σε εξόλκευση. Οι

χαλύβδινες ίνες μπορεί να έχουν διατομή κυκλική, ορθογωνική, τετραγωνική είτε ακόμη και δρεπανοειδή. Τα μήκη των ινών συνήθως κυμαίνονται από 13 mm έως 76 mm, ενώ η διάμετρος των διατομών τους γενικώς κυμαίνεται από 0.1 mm έως 1.0 mm. Η αντοχή του χάλυβα των ινών μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 350 MPa έως και 2000 MPa. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται κάποιες συνήθειες μορφές χαλύβδινων ινών. Η παρούσα μελέτη αφορά χαλύβδινες ίνες με αγκιστροειδή άκρα.



Σχ. 1.1: Διάφοροι τύποι ινών.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος και σε σχέση με τη σύσταση της μήτρας. Η χρήση λεπτών αδρανών και άμμου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συνολική συμπεριφορά του μίγματος. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί τσιμεντοειδείς μήτρες υψηλής αντοχής, των οποίων η συμπεριφορά έναντι εφελκυσμού βελτιώνεται με την προσθήκη ινών στο μίγμα, όπως συμβαίνει και στο συμβατικό σκυρόδεμα. Σχετικά πρόσφατα αναπτύχθηκαν ινοπλισμένα τσιμεντοκονιάματα υψηλής επιτελεστικότητας (High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites – HPFRCC), τα οποία μπορούν να προσδώσουν αυξημένη αντοχή, δυσκαμψία, απορρόφηση ενέργειας και ικανότητα περιορισμού της εξέλιξης της ρηγμάτωσης.

Οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος είναι σε βιομηχανικά δάπεδα, σε καταστρώματα γεφυρών και οδοστρώματα βαριάς κυκλοφορίας, σε προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία, σε εργασίες σταθεροποίησης πρανών και στην εσωτερική επένδυση σηράγγων με τη μορφή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επίσης, χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές για αντισεισμικές κατασκευές. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επισκευή και αποκατάσταση κατασκευών καθώς και για την ενίσχυσή τους έναντι έκρηξης, πρόσκρουσης και σεισμού. Η χρήση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος για την ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ιδιαίτερα για τις σειсмоγενείς χώρες όπως η Ελλάδα, καθώς ένας μεγάλος αριθμός υπαρχόντων κτιρίων από οπλισμένο

σκυρόδεμα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με παλαιότερους κανονισμούς. Επομένως, είναι πιθανό να στερούνται επαρκούς διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού και να μην ικανοποιούν τα κριτήρια των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Επιπρόσθετα, κυρίως στην περίπτωση των παλαιότερων κτιρίων, τα δομικά υλικά μπορεί να είναι χαμηλής ποιότητας ή να παρουσιάζεται υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Λόγω των παραπάνω, τα κτίρια αυτά ενδέχεται να παρουσιάζουν ανεπάρκεια σε σχέση με την αντοχή, τη δυσκαμψία και την πλαστιμότητα. Η ενίσχυση των δομικών μελών τέτοιου είδους κατασκευών μπορεί να αποτελέσει τη λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα και να αποδειχθεί καθοριστική για την αποφυγή βλαβών εξαιτίας μελλοντικών σεισμικών γεγονότων. Η εφαρμογή μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος αποτελεί μια μέθοδο για την ενίσχυση δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η χρήση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως δομικό υλικό και υλικό ενίσχυσης δομικών μελών συνεπάγεται την απαίτηση για αξιοπιστία και ικανοποιητική επιτελεστικότητα του υλικού αυτού. Επομένως, καθίσταται απαραίτητη η κατανόηση τόσο της συμπεριφοράς του υλικού σε εφελκυσμό, κάμψη και διάτμηση, όσο και των μηχανισμών που την επηρεάζουν. Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή και τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος είναι η αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας, ο τύπος της ίνας και το μήκος της, το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα, ο λόγος μήκους προς διάμετρο της ίνας, η συνάφεια των ινών με το υλικό της μήτρας, η αντοχή των ινών και ο προσανατολισμός τους στο μίγμα. Όταν ένα δοκίμιο ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ρηγματώνεται μετά την εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής της μήτρας, ενεργοποιούνται άμεσα οι ίνες παραλαμβάνοντας τις εφελκυστικές τάσεις. Περιορίζεται έτσι η ανάπτυξη των ρωγμών. Καθώς μεγαλώνει το εύρος της κάθε ρωγμής με την εξέλιξη της φόρτισης, οι ίνες που τη «γεφυρώνουν» εξόλκευονται από την τσιμεντοειδή μήτρα. Επομένως, η συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά τη ρηγμάτωση σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα των ινών του μίγματος. Η συμπεριφορά μιας μεμονωμένης ίνας περιγράφεται από την καμπύλη δύναμης-μετατόπισης που προκύπτει από τη δοκιμή εξόλκευσης της ίνας από την τσιμεντοειδή μήτρα.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι της έρευνας

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που προκύπτει από την προσθήκη χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα σε μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής. Η μελέτη πραγματοποιείται μέσω αριθμητικής προσομοίωσης.

Αρχικά, η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού προσεγγίζεται μέσω της δοκιμής εξόλκευσης μεμονωμένης χαλύβδινης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής, με τη βοήθεια ακριβούς τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος. Για τη μόρφωση του προσομοιώματος αυτού αξιοποιούνται δεδομένα από πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης ευθύγραμμης χαλύβδινης ίνας από την τσιμεντοειδή μήτρα. Τα

αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του τρισδιάστατου προσομοιώματος αξιολογούνται μέσω της σύγκρισής τους με τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης ινών με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής. Όλες οι πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης πραγματοποιήθηκαν από τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μιχάλη Ζυγομαλά στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, μετά από κατάλληλες αλλαγές, χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς ινών που εξολκεύονται με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού σε σχέση με το επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής, αλλά και για την εκτίμηση της απόκρισης σε εξόλκευση ινών με διαφορετικές γεωμετρίες.

Στη συνέχεια, διερευνάται η συμπεριφορά σε κάμψη δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα μέσω κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι περιπτώσεις δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα χωρίς συμβατικό οπλισμό, δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, καθώς και δοκός οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) που χρησιμοποιείται ως δοκίμιο αναφοράς. Επιπλέον, προσομοιώνεται αριθμητικά η συμπεριφορά σε κάμψη δοκών Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Σημειώνεται ότι τα αριθμητικά προσομοιώματα όλων των προαναφερθέντων περιπτώσεων αξιολογούνται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα πειραματικά που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές κάμψης που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από τον Καθηγητή κ. Φίλιππο Περδικάρη και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Θεοχάρη Παπαθεοχάρη.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα που εξάγονται από την αριθμητική προσομοίωση των ινοπλισμένων δοκών και των δοκών που ενισχύονται με ινοπλισμένο μανδύα, πραγματοποιείται εφαρμογή της ενίσχυσης των μελών μιας κατασκευής Ο/Σ με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, έναντι σεισμού. Η εφαρμογή πραγματοποιείται με τη βοήθεια προγραμμάτων στατικής ανάλυσης κατασκευών ευρείας χρήσης και δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ορθή προσομοίωση του σύνθετου υλικού στα προγράμματα αυτά.

Στόχος της μελέτης που πραγματοποιείται είναι η ανάπτυξη αξιόπιστων αριθμητικών προσομοιωμάτων για την ανάλυση των επιμέρους προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα, ο πρώτος στόχος είναι η μόρφωση ενός ακριβούς αριθμητικού προσομοιώματος για τη δοκιμή εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα από τη μήτρα τσιμεντοκονιάματος. Το αριθμητικό αυτό προσομοίωμα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα μη-γραμμικά φαινόμενα που κυριαρχούν στο φυσικό πρόβλημα και να είναι ικανό να περιγράψει τη συμπεριφορά του συστήματος ίνας και μήτρας σε όλα τα στάδια της εξόλκευσης, καθώς και όλους τους μηχανισμούς που την καθορίζουν. Επίσης, θα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της εξόλκευσης ινών, τόσο κάθετα στην επιφάνεια της θεωρούμενης ρωγμής, όσο και με κάποια γωνία προσανατολισμού σε σχέση με αυτή. Επόμενο στόχο της παρούσας

διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος για χρήση στην ανάλυση δομικών μελών. Η προτεινόμενη μέθοδος θα πρέπει να μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς, τόσο δομικών μελών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, όσο και μελών Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες από το σύνθετο υλικό. Επίσης, τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμών κάμψης δοκών που μορφώνονται με βάση την προτεινόμενη μέθοδο, θα πρέπει να είναι ικανά να περιγράψουν έντονα μη-γραμμικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα την απώλεια της συνεισφοράς των ινών λόγω της σταδιακής εξόλκευσής τους από τη μήτρα, αλλά και να αναπαράγουν την εικόνα της ρηγμάτωσης που εμφανίζεται στα αντίστοιχα πειραματικά δοκίμια. Επόμενος στόχος είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την προσομοίωση του σύνθετου υλικού σε ευρείας χρήσης λογισμικά στατικής ανάλυσης κατασκευών, με στόχο τη χρήση του είτε για την κατασκευή νέων δομικών μελών, είτε για την ενίσχυση υφιστάμενων (π.χ. με τη μορφή μανδύων).

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Το κύριο μέρος της διατριβής αναπτύσσεται μέσα από επτά κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται μια εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση που αφορά τόσο παλαιότερες, όσο και πιο πρόσφατες ερευνητικές εργασίες πάνω σε κάθε επιμέρους αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, η βιβλιογραφία που παρατίθεται αφορά κυρίως εργασίες δημοσιευμένες σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά που πραγματεύονται τη δοκιμή εξόλκευσης μεμονωμένων ινών κάθετων ή με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού σε σχέση με την επιφάνεια της θεωρούμενης ρωγμής, τη μελέτη της συμπεριφοράς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και των παραγόντων που την επηρεάζουν και τέλος, τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης δομικών μελών με διαφόρων τύπων μανδύες. Επίσης, το Κεφάλαιο αυτό συμπεριλαμβάνει τα σημεία συνεισφοράς της παρούσας διατριβής στο πεδίο του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Στο Κεφάλαιο 3 παρατίθενται συνοπτικά στοιχεία για τη σημασία της εφαρμογής της μη-γραμμικής ανάλυσης και περιγράφονται οι τύποι της μη-γραμμικότητας που συναντώνται στα προβλήματα που αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής. Επίσης, παρατίθενται οι μέθοδοι και οι αλγόριθμοι επίλυσης που υιοθετούνται για το χειρισμό των ισχυρών μη-γραμμικοτήτων των συναντώμενων προβλημάτων. Τέλος, περιγράφονται οι τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη μόρφωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Το Κεφάλαιο 4 πραγματεύεται την αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής. Αρχικά, μελετάται η δοκιμή εξόλκευσης ινών κάθετων στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής, μέσω αριθμητικών προσομοιωμάτων που μορφώνονται με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Μορφώνονται λεπτομερή τρισδιάστατα προσομοιώματα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα του φυσικού προβλήματος, όπως η συνάφεια μεταξύ της ίνας και της μήτρας στα πρώτα στάδια της

φόρτισης, οι συνθήκες επαφής και τριβής μεταξύ των δύο σωμάτων, η πλαστικοποίηση της χαλύβδινης ίνας και η ρηγμάτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Οι ιδιότητες της διεπιφάνειας μεταξύ της ίνας και της τσιμεντοειδούς μήτρας που εισάγονται στο αριθμητικό προσομοίωμα βασίζονται στα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης χαλύβδινων ευθύγραμμων ινών από τη μήτρα τσιμεντοκονιάματος. Ακολουθώντας, μελετάται η επιρροή διαφορετικών γεωμετριών της χαλύβδινης ίνας στις καμπύλες δύναμης – μετατόπισης που προκύπτουν από αντίστοιχα αριθμητικά προσομοιώματα της δοκιμής εξόλκευσης. Αποδεικνύεται έτσι, η σημαντικά ανώτερη συμπεριφορά σε εξόλκευση των ινών με διπλά κεκαμμένο άκρο έναντι εκείνων με μονό κεκαμμένο άκρο. Στη συνέχεια, προτείνεται ένα απλοποιημένο δισδιάστατο προσομοίωμα, μέσω του οποίου μπορούν να εξαχθούν, σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα, αποτελέσματα παρόμοια εκείνων του αντίστοιχου ακριβέστερου τρισδιάστατου προσομοιώματος. Τέλος, μορφώνονται τα τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα ινών που εξολκούνται με γωνίες προσανατολισμού 15° , 30° , 45° και 60° σε σχέση με την επιφάνεια της θεωρούμενης ρωγμής, με στόχο τη διερεύνηση της επιρροής της γωνίας προσανατολισμού της ίνας στη δοκιμή εξόλκευσης.

Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει την αριθμητική προσομοίωση δοκιμών κάμψης δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Το σύνθετο υλικό προκύπτει από την προσθήκη χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα σε τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής. Θεωρούνται δύο διαφορετικοί τύποι ινοπλισμένων δοκών. Ο πρώτος τύπος δεν περιλαμβάνει συμβατικό οπλισμό, ενώ ο δεύτερος τύπος οπλίζεται ταυτόχρονα με διαμήκεις ράβδους και συνδετήρες. Μελετάται επιπλέον και μια συμβατική δοκός Ο/Σ, που χρησιμοποιείται ως δοκίμιο αναφοράς. Όλα τα προαναφερθέντα δοκίμια αρχικά υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων, υπό στατική μονοτονική και στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η καμπτική συμπεριφορά των δοκών προσομοιώνεται μέσω δισδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, στα οποία η συνεισφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος λαμβάνεται υπόψη μέσω δύο επάλληλων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο αντιπροσωπεύει την τσιμεντοειδή μήτρα, ενώ το δεύτερο προσομοιώνει ξεχωριστά τη συνεισφορά των χαλύβδινων ινών. Τα προτεινόμενα αριθμητικά προσομοιώματα μορφώνονται έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη τα μη-γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο αντίστοιχο φυσικό πρόβλημα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά, με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας και της αξιοπιστίας των προτεινόμενων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Στο Κεφάλαιο 6 διερευνάται, μέσω αριθμητικής προσομοίωσης, η καμπτική συμπεριφορά συμβατικών δοκών Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Αφού έχει διαπιστωθεί η ορθότητα της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης μέσω των απλούστερων αριθμητικών προσομοιωμάτων των ινοπλισμένων δοκών του Κεφαλαίου 5, μορφώνονται τα πιο σύνθετα προσομοιώματα δοκών που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής μελετώνται οι περιπτώσεις δοκών Ο/Σ με ή χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, που ενισχύονται με μανδύα

ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος οπλισμένο με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό ή με δομικό πλέγμα. Από το συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων προέκυψαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων (στατική μονοτονική και στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα των προαναφερθέντων δοκιμίων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά για να διαπιστωθεί η ορθότητα της μεθόδου προσομοίωσης. Επίσης, συγκρίνονται οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης των ενισχυμένων δοκών με τις αντίστοιχες καμπύλες της συμβατικής δοκού αναφοράς, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης μέσω των υπό μελέτη λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Επιπρόσθετα, εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τον τύπο οπλισμού του μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθεται παράδειγμα εφαρμογής αντισεισμικής ενίσχυσης μελών μιας κατασκευής Ο/Σ με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, με τη χρήση κοινού προγράμματος στατικής ανάλυσης. Αρχικά, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ορθή προσομοίωση του σύνθετου υλικού με τέτοιου είδους λογισμικά, καθώς θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σωστά η συνεισφορά των ινών και το φαινόμενο της μείωσης της αντοχής του ενισχυμένου μέλους λόγω της σταδιακής εξόλκευσης των ινών. Μετά την αξιολόγηση των τεχνικών προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε ευρείας χρήσης λογισμικά ανάλυσης κατασκευών, ακολουθεί η εφαρμογή της ενίσχυσης με μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, των μελών ενός υπάρχοντος κτιρίου Ο/Σ και εφαρμόζονται κάποιες πρακτικές λύσεις για το πρόβλημα του συνυπολογισμού της σταδιακής απώλειας της συνεισφοράς των ινών.

Τέλος, το Κεφάλαιο 8 αφιερώνεται στη σύνοψη των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη παρούσα ερευνητική εργασία. Επίσης, συνοψίζονται τα πρωτότυπα σημεία της διατριβής. Η διατριβή ολοκληρώνεται με την παράθεση τριών Παραρτημάτων, στα οποία περιγράφονται οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται για τον υπολογισμό των τιμών κάποιων παραμέτρων για τη μόρφωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων συμπεριφοράς δομικών μελών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών έχει διεξαχθεί παγκοσμίως σημαντική έρευνα σχετικά με τις ιδιότητες του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Πολλοί ερευνητές μελέτησαν τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά τη ρηγμάτωση και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, μέσω της δοκιμής εξόλκευσης μιας μεμονωμένης ίνας από την τσιμεντοειδή μήτρα. Καθώς οι πρώτες ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ευθύγραμμες και ο κύριος μηχανισμός που διέπει τη συμπεριφορά μιας ευθύγραμμης ίνας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης είναι η συνάφεια μεταξύ ίνας και μήτρας, διάφοροι μελετητές επιχείρησαν να διερευνήσουν πειραματικά, αριθμητικά αλλά και αναλυτικά τις ιδιότητες της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών. Μετά την εμφάνιση και χρήση ινών με βελτιωμένο σχήμα, αντικείμενο μελέτης υπήρξε η απόδοση των ινών αυτών κατά τη δοκιμή εξόλκευσης και κατ' επέκταση, η συνεισφορά τους στη συνολική συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Θεωρώντας έναν συγκεκριμένο τύπο χαλύβδινων ινών σε τσιμεντοειδή μήτρα και για δεδομένο ογκομετρικό ποσοστό των ινών αυτών στο μίγμα, οι ιδιότητες του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά τη ρηγμάτωση εξαρτώνται από τον τυχαίο προσανατολισμό των ινών στη μήτρα. Διάφοροι ερευνητές μελέτησαν, είτε πειραματικά, είτε αναλυτικά, την εξόλκευση ινών με διάφορες γωνίες προσανατολισμού σε σχέση με το επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής.

Παράλληλα με τη μελέτη της δοκιμής εξόλκευσης, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες σχετικά με τη χρήση ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος για τη βελτίωση της καμπτικής συμπεριφοράς δομικών μελών. Οι μελέτες αυτές είναι κυρίως πειραματικές, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευτεί επίσης, αναλυτικής και αριθμητικής φύσης ερευνητικές εργασίες.

Στο κεφάλαιο αυτό, εκτός από την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας με αντικείμενο τα προαναφερθέντα, παρατίθενται και βιβλιογραφικές αναφορές που σχετίζονται με την εφαρμογή διαφόρων τύπων μανδύων για την ενίσχυση δομικών μελών, καθώς η παρούσα διατριβή μελετά το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και ως υλικό για τη δημιουργία λεπτών μανδύων ενίσχυσης μελών έναντι σεισμού.

2.2 Δοκιμή εξόλκευσης ινών κάθετων στο επίπεδο της ρωγμής

Σημαντικός αριθμός πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης ινών, τόσο ευθύγραμμων όσο και με βελτιωμένο σχήμα, έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν, με σκοπό τη μελέτη της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας αλλά και τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των ινών στο ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Οι Naaman και Najm (1991) διεξήγαγαν μεγάλο αριθμό πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης χαλύβδινων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα. Συμπεριέλαβαν στις δοκιμές αυτές διάφορες παραμέτρους,

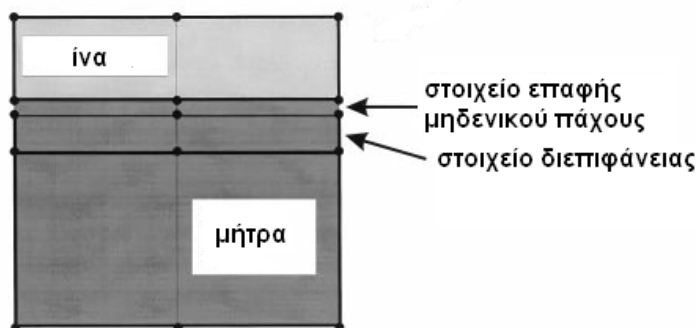
όπως διαφορετικούς τύπους ινών (ευθύγραμμες λείες, παραμορφωμένου σχήματος και αγκιστροειδείς), διαφορετικές τσιμεντοειδείς μήτρες χαμηλής, μεσαίας και υψηλής αντοχής και μήτρες είτε χωρίς ίνες, είτε με διάφορα ποσοστά ινών κατ' όγκο στο μίγμα. Επίσης, για τις ευθύγραμμες λείες ίνες θεώρησαν πέντε διαφορετικές διαμέτρους και τρία διαφορετικά μήκη της ίνας μέσα στη μήτρα. Από τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης που προέκυψαν από τις δοκιμές εξόλκευσης συμπεράναν ότι οι αγκιστροειδείς και παραμορφωμένου σχήματος ίνες επέδειξαν μεγαλύτερη αντίσταση στην εξόλκευση σε σχέση με τις ευθύγραμμες και λείες, λόγω της μηχανικής συνεισφοράς του αγκιστροειδούς άκρου και του παραμορφωμένου σχήματος, αντίστοιχα. Επομένως, η απορρόφηση ενέργειας κατά την εξόλκευση των ινών με βελτιωμένο σχήμα, η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης και η τιμή της ολίσθησης για την οποία εμφανίζεται η μέγιστη δύναμη, είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των ευθύγραμμων λείων ινών. Συγκεκριμένα, η τιμή της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη δύναμη εξόλκευσης για τις αγκιστροειδείς ίνες είναι κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη της αντίστοιχης για μια ευθύγραμμη ίνα. Επομένως, η ενέργεια που απορροφάται έως την επίτευξη της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης για μία αγκιστροειδή ίνα, μπορεί να είναι έως και εκατό φορές μεγαλύτερη από εκείνη μίας ευθύγραμμης ίνας. Αναφορικά με τις ευθύγραμμες λείες ίνες, οι τιμές της διαμέτρου και του μήκους της ίνας μέσα στη μήτρα δεν επηρέασαν τη συμπεριφορά της κατά τη δοκιμή εξόλκευσης. Ακόμη, παρατήρησαν ότι η συνάφεια μεταξύ ίνας και μήτρας αυξάνει, με την αύξηση της αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας. Με τη βοήθεια των παραπάνω παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές εξόλκευσης, εξήγαγαν συμπεράσματα για τις ιδιότητες της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας. Οι Shannag et al. (1997) διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης χαλύβδινων ευθύγραμμων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν το μήκος της ίνας μέσα στη μήτρα, το ποσοστό κατ' όγκο των ινών στο μίγμα, καθώς και το είδος της τσιμεντοειδούς μήτρας. Σημειώνεται ότι τα πειράματα περιλάμβαναν τόσο μήτρα συμβατικού τσιμεντοκονιάματος, όσο και μια ειδικά σχεδιασμένη τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε σε σχέση με τις ιδιότητες της διεπιφάνειας ήταν ότι η χρήση του τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής έχει θετική επίδραση στις δυνάμεις συνάφειας αλλά και στην απορρόφηση ενέργειας κατά τη σταδιακή απώλεια της συνάφειας μεταξύ ίνας και μήτρας. Αυτό οφείλεται στην πιο πυκνή (σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική) μικροδομή της τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής που μελέτησαν.

Παράλληλα με την πειραματική διερεύνηση των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας, πολλοί ερευνητές παρουσίασαν αριθμητικής και αναλυτικής φύσης μελέτες με αντικείμενο τη σχέση συνάφειας-ολίσθησης που εμφανίζεται κατά τη δοκιμή εξόλκευσης. Οι Shannag et al. (1996) πρότειναν μια αναλυτική μέθοδο για την εκτίμηση της ενέργειας που απορροφάται κατά τη διαδικασία απώλειας της συνάφειας μεταξύ ίνας και μήτρας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης, καθώς και των τάσεων τριβής που αναπτύσσονται κατά την ολίσθηση της ίνας. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην χρήση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή εξόλκευσης μιας μεμονωμένης

ευθύγραμμης χαλύβδινης ίνας από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής και το διαχωρισμό της συνεισφοράς της τριβής και της συνάφειας στην καμπύλη αυτή. Οι Naaman et al. (1991) ανέπτυξαν μια αναλυτική μέθοδο για την εκτίμηση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης της εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ίνας από τσιμεντοειδή μήτρα, μέσω της θεώρησης της σχέσης τάσεων συνάφειας-ολίσθησης μεταξύ της ίνας και της μήτρας. Επίσης, αντιμετώπισαν αναλυτικά και το αντίστροφο πρόβλημα κατά το οποίο η σχέση συνάφειας-ολίσθησης εκτιμάται με βάση την πειραματική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης μιας δοκιμής εξόλκευσης. Οι Banholzer et al. (2006) αντιμετώπισαν το ίδιο πρόβλημα προτείνοντας μια αναλυτική μέθοδο για την εκτίμηση της σχέσης των τάσεων συνάφειας και της ολίσθησης, χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης που προέκυψαν από τις δοκιμές εξόλκευσης ευθύγραμμων λείων χαλύβδινων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα και την παράμετρο της διατομής των ινών και του μήκους της ίνας μέσα στη μήτρα. Οι ίδιοι ερευνητές (Banholzer et al. 2005) ανέπτυξαν μια επίσης αναλυτική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης μιας δοκιμής εξόλκευσης χαλύβδινης ίνας από τσιμεντοειδή μήτρα, μέσω μιας θεωρούμενης N-γραμμικής σχέσης των τάσεων συνάφειας με την ολίσθηση, χωρίς περιορισμό στην τιμή του N. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας αναδείχθηκε μέσω της σύγκρισης των αναλυτικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά. Οι Sujivorakul et al. (2000) επέκτειναν την αναλυτική μέθοδο των Naaman et al. (1991) για την εκτίμηση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης της δοκιμής εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ίνας, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί και για την εξόλκευση ινών με αγκιστροειδή άκρα, εισάγοντας στο αναλυτικό προσομοίωμα μη-γραμμικά ελατήρια για την προσομοίωση της συνεισφοράς του αγκίστρου. Ο Chanvillard (1999) ανέπτυξε ένα αναλυτικό μοντέλο για την προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης χαλύβδινων μη-ευθύγραμμων ινών, θεωρώντας την ίνα ως μια διαδοχή από ευθύγραμμα και καμπύλα τμήματα. Το μοντέλο του στηρίχθηκε στην αρχή διατήρησης της ενέργειας και εφαρμόστηκε λαμβάνοντας υπόψη, εκτός από τη σχέση συνάφειας-ολίσθησης που χαρακτηρίζει την εξόλκευση ευθύγραμμων ινών, και φαινόμενα όπως η παραμόρφωση και πλαστικοποίηση της μη-ευθύγραμμης ίνας. Εφάρμοσε το αναλυτικό αυτό μοντέλο σε ευθύγραμμες, ημικυκλικές και κυματοειδείς ίνες και επιβεβαίωσε τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίνοντάς τα με αντίστοιχα πειραματικά.

Οι Mobasher και Li (1995, 1998) προσομοίωσαν τη δοκιμή εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ίνας αριθμητικά. Μόρφωσαν ένα δισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 2.1) εισάγοντας τη διεπιφάνεια μεταξύ ίνας και μήτρας ως ένα γραμμικά ελαστικό σώμα με χαμηλότερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με την ίνα και τη μήτρα. Τόσο η ίνα, όσο και η κυλινδρική μήτρα θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικές. Επίσης, θεώρησαν δύο επιφάνειες επαφής μεταξύ της ίνας και των στοιχείων της διεπιφάνειας. Οι επιφάνειες αυτές αρχικά χαρακτηρίζονται από δυνάμεις συνάφειας, οι οποίες μπορούν να μηδενιστούν κατά την εξόλκευση. Το κριτήριο της απώλειας συνάφειας βασίστηκε σε μια επιφάνεια διαρροής που ορίζεται από τις ορθές και διατμητικές τάσεις της διεπιφάνειας. Μετά το σημείο της διαρροής που αντιπροσωπεύει την απώλεια της συνάφειας, εισήγαγαν

ένα μοντέλο τριβής Coulomb. Μέσω του αριθμητικού προσομοιώματος μελέτησαν την επιρροή του μήκους της ίνας αλλά και της αντοχής της διεπιφάνειας στις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης της δοκιμής εξόλκευσης και τέλος, συνέκριναν τα αριθμητικά αποτελέσματα με πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης της βιβλιογραφίας με στόχο την αξιολόγηση του προτεινόμενου αριθμητικού προσομοιώματος. Οι Tsai et al. (2005) πρότειναν ένα δισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης μιας ίνας χαλκού. Αρχικά, προσομοίωσαν την εξόλκευση μιας ευθύγραμμης ίνας, της οποίας το υλικό θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό ενώ το υλικό της μήτρας θεωρήθηκε ελαστικό για λόγους απλοποίησης. Για την προσέγγιση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας εισήγαγαν στο προσομοίωμα ένα συνδυαστικό μοντέλο συνάφειας και τριβής Coulomb που μπορεί να λαμβάνει υπόψη την απώλεια συνάφειας και την ανάπτυξη τριβής στη διεπιφάνεια. Η αξιοπιστία του αριθμητικού προσομοιώματος αναδείχθηκε μέσω της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά της βιβλιογραφίας και στη συνέχεια το προτεινόμενο αριθμητικό προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης ινών με πεπλατυσμένα άκρα.

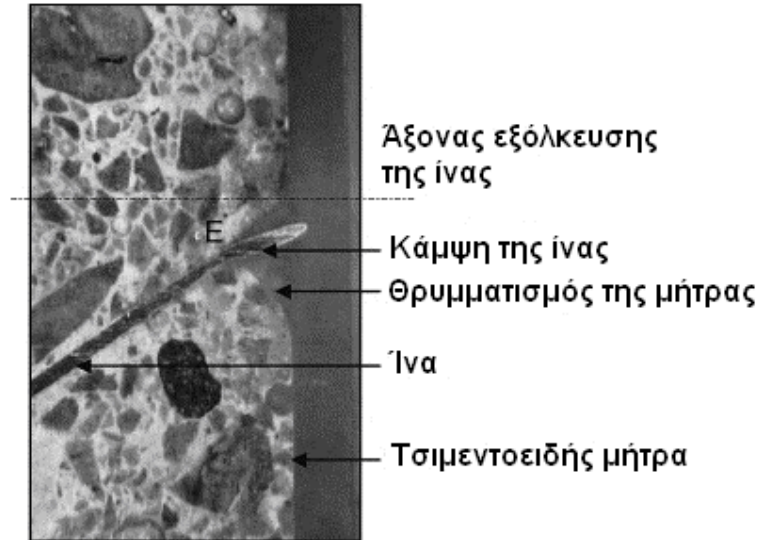


Σχ. 2.1: Σχηματική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων του αριθμητικού προσομοιώματος της εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ίνας από τους Mobasher και Li (1995, 1998).

2.3 Δοκιμή εξόλκευσης ινών με γωνία προσανατολισμού ως προς το επίπεδο της ρωγμής

Καθώς η γωνία προσανατολισμού της ίνας σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα μιας δοκιμής εξόλκευσης, πολλοί είναι οι ερευνητές που μελέτησαν την επιρροή αυτή. Οι μελέτες που αφορούν στη δοκιμή εξόλκευσης, τόσο ευθύγραμμων ινών, όσο και ινών με μηχανικά παραμορφωμένο σχήμα, από τσιμεντοειδή μήτρα είναι κυρίως πειραματικές. Οι Morton και Groves (1974), κατά τις πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης ευθύγραμμων μεταλλικών ινών (χαλύβδινων, χαλκού και νικελίου) με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, παρατήρησαν την κάμψη των ινών και την εμφάνιση θλιπτικών τάσεων στη μήτρα, κοντά στο σημείο εξόδου της ίνας από αυτή. Επίσης, οι Li et al. (1990), πραγματοποιώντας παρόμοια πειράματα δοκιμών εξόλκευσης ευθύγραμμων συνθετικών ινών από τσιμεντοειδή μήτρα, παρατήρησαν θρυμματισμό της μήτρας κοντά στο σημείο εξόδου της ίνας, ενώ ταυτόχρονα ανέφεραν ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης για το εύρος τιμών 0° - 45° και στη συνέχεια, η

τιμή της δύναμης μειώνεται για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης (60° και 75°). Οι Cailleux et al. (2005) διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης ευθύγραμμων χαλύβδινων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα με γωνίες προσανατολισμού 15° , 30° , 45° και 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι μικρομηχανισμοί που εμφανίζονται κατά τη δοκιμή εξόλκευσης λόγω της γωνίας προσανατολισμού των ινών, όπως παρατηρήθηκαν από τους Cailleux et al. (2005). Πιο συγκεκριμένα, διακρίνεται ο θρυμματισμός της μήτρας που συμβαίνει κάθετα στον άξονα της ίνας, καθώς και η κάμψη της ίνας κοντά στο σημείο εξόδου της από τη μήτρα. Ακόμη, παρατήρησαν ότι μετά το θρυμματισμό τμήματος της μήτρας, το σημείο εξόδου (E) της ίνας μετατοπίζεται από τον άξονα της εξόλκευσης και το ελεύθερο μήκος της ίνας αυξάνεται κατά το μήκος του θρυμματισμένου τμήματος της μήτρας. Τέλος, ανέφεραν ότι, για τις συγκεκριμένες δοκιμές, η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης πήρε τις μεγαλύτερες τιμές της για γωνίες προσανατολισμού της ίνας ίσες με 30° - 45° , ενώ για γωνίες μεγαλύτερες των 45° η τιμή της δύναμης μειώθηκε.



Σχ. 2.2: Μηχανισμοί που εμφανίζονται κατά τη δοκιμή λοξής εξόλκευσης ευθύγραμμης ίνας από τσιμεντοειδή μήτρα, όπως παρατηρήθηκαν από τους Cailleux et al. (2005).

Οι Bantia και Trottier (1994) μελέτησαν επίσης πειραματικά τη δοκιμή εξόλκευσης τριών διαφορετικών τύπων χαλύβδινων ινών με μηχανικά παραμορφωμένο σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν ξεχωριστά ίνες με αγκιστροειδή και κωνικά άκρα, καθώς και κυματοειδείς ίνες, για τις οποίες θεώρησαν γωνίες προσανατολισμού 0° , 15° , 30° , 45° και 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης. Επίσης, στα πειράματα διαφοροποίησαν και την παράμετρο της αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας, χρησιμοποιώντας μήτρες συμβατικής, μεσαίας και υψηλής αντοχής. Το γενικό συμπέρασμα που εξήγαγαν από τις συγκεκριμένες πειραματικές δοκιμές ήταν ότι οι ευθύγραμμισμένες με τη διεύθυνση φόρτισης ίνες επέδειξαν ανώτερη συμπεριφορά αναφορικά με τη μέγιστη τιμή του φορτίου και την απορροφώμενη ενέργεια, σε σχέση με τις ίνες στις οποίες εφαρμόζοταν λοξή εξόλκευση. Ακόμη, τα πειράματά τους έδειξαν ότι η χρήση τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής, σε συνδυασμό με μεγάλες τιμές της γωνίας εξόλκευσης και για ίνες με

συγκεκριμένο μηχανικά παραμορφωμένο σχήμα, μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρού τύπου αστοχία της ίνας ή της μήτρας, οδηγώντας σε μείωση της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας κατά την εξόλκευση. Οι Bartos και Duris (1994) διεξήγαγαν αντίστοιχα πειράματα εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με μηχανικά παραμορφωμένο σχήμα από τσιμεντοειδή μήτρα, μελετώντας την επιρροή της γωνίας προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση φόρτισης στις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης. Χρησιμοποίησαν τρεις διαφορετικούς τύπους χαλύβδινων ινών και εξέτασαν γωνίες προσανατολισμού ίσες με 0° , 15° , 30° , 45° και 60° . Τα πειραματικά τους αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας προσανατολισμού από 0° έως 60° , η δε μείωση αυτή αλλά και η γενικότερη συμπεριφορά της ίνας κατά την εξόλκευση διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο της ίνας. Οι Chanvillard και Aitcin (1996) πραγματοποίησαν έναν αριθμό πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης χαλύβδινων κυματοειδών ινών διερευνώντας την επιρροή του μήκους της ίνας, της αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας και της γωνίας προσανατολισμού της ίνας σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης θεωρώντας γωνίες κλίσης 0° και 45° . Παρατήρησαν δύο διαφορετικούς τύπους αστοχίας κατά τις δοκιμές εξόλκευσης, ανάλογα με το συνδυασμό των προαναφερθέντων παραμέτρων: είτε αστόχησε η διεπιφάνεια μεταξύ ίνας και μήτρας και οι ίνες ολίσθησαν και εξολκεύτηκαν πλήρως από τη μήτρα, είτε αστόχησαν οι ίνες σπάζοντας πριν εξολκευθούν. Επίσης, παρατήρησαν ότι στη περίπτωση των ινών που εξολκεύονται κάθετα στην επιφάνεια της θεωρούμενης ρωγμής, η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση της ίνας με γωνία προσανατολισμού 45° . Οι Armelin και Bantia (1997) διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης μιας χαλύβδινης ίνας με αγκιστροειδή άκρα θεωρώντας γωνίες προσανατολισμού των ινών 0° , 22.5° , 45° και 67.5° ως προς τη διεύθυνση φόρτισης. Υπολογίζοντας τις μέσες καμπύλες δύναμης-μετατόπισης των δοκιμών εξόλκευσης για κάθε περίπτωση, παρατήρησαν ότι η μέση τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης πήρε τη μεγαλύτερη τιμή της για γωνία κλίσης ίση με 22.5° , ενώ στην περίπτωση των 45° ήταν ελαφρώς χαμηλότερη σε σχέση με την περίπτωση των 0° . Η μέση τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης πήρε την χαμηλότερη τιμή της για ίνες με γωνία προσανατολισμού 67.5° , ενώ σε κάποιες δοκιμές της περίπτωσης αυτής παρατηρήθηκε θραύση της ίνας. Οι Robins et al. (2002) διερεύνησαν την επιρροή της αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας, του μήκους της ίνας μέσα στη μήτρα και του προσανατολισμού της ίνας, μέσω πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα. Παρατήρησαν ότι η ενέργεια που απορροφάται κατά τη δοκιμή λοξής εξόλκευσης μιας αγκιστροειδούς ίνας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη ενέργεια που απορροφάται όταν η ίδια ίνα εξολκεύεται με γωνία κλίσης 0° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης. Η μεγαλύτερη τιμή της μέγιστης δύναμης εμφανίζεται για γωνίες προσανατολισμού 10° έως 20° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης. Οι Cunha et al. (2007) παρουσίασαν αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα από τσιμεντοειδή μήτρα, στις οποίες μετέβαλλαν τις παραμέτρους του μήκους της ίνας μέσα στη μήτρα και της γωνίας προσανατολισμού της ίνας σε σχέση με τη διεύθυνση φόρτισης. Επίσης, πραγματοποίησαν τα αντίστοιχα πειράματα και για ευθύγραμμες χαλύβδινες ίνες. Τόσο για τις ίνες με

αγκιστροειδή άκρα, όσο και για τις ευθύγραμμες, η μέγιστη δύναμη εξόλκευσης εμφανίστηκε για γωνία προσανατολισμού των ινών ίση με 30° .

Εκτός από την πληθώρα των πειραματικών μελετών της δοκιμής εξόλκευσης κεκλιμένων ευθύγραμμων ινών και ινών με μηχανικά παραμορφωμένο σχήμα, έχουν δημοσιευτεί και κάποιες αναλυτικές μελέτες με στόχο την προσομοίωση των δοκιμών αυτών. Η πρώτη προσπάθεια εκτίμησης της μέγιστης δύναμης «γεφύρωσης» μιας ρωγμής από κεκλιμένη ευθύγραμμη ίνα προέρχεται από τους Morton και Groves (1974), θεωρώντας την ίνα ως μια καμπτόμενη δοκό. Δεν έλαβαν υπόψη όμως την απώλεια συνάφειας και την τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας, ενώ η θεώρηση πλαστικής μήτρας κάνει μη εφαρμόσιμη τη μέθοδο στην περίπτωση ψαθυρής μήτρας. Οι Leung και Li (1992) μελέτησαν αναλυτικά την επιρροή της γωνίας προσανατολισμού ευθύγραμμης ίνας σε τσιμεντοειδή μήτρα στις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εξόλκευση της ίνας αυτής, λαμβάνοντας υπόψη την τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας, το μηχανισμό κάμψης της ίνας και τη δυνατότητα θρυμματισμού της μήτρας στο σημείο εξόδου της ίνας. Αργότερα, οι Cailleux et al. (2005) ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για τη δοκιμή εξόλκευσης από τσιμεντοειδή μήτρα, ευθύγραμμης χαλύβδινης ίνας με γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης. Για τη δημιουργία του μοντέλου τους έλαβαν υπόψη μηχανισμούς όπως η κάμψη της ίνας, η πιθανότητα θρυμματισμού της μήτρας και η συγκέντρωση των δυνάμεων τριβής κοντά στο σημείο εξόδου της ίνας από τη μήτρα. Για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθόδου ενσωμάτωσαν παραμέτρους που προσδιορίστηκαν μέσω πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης ευθύγραμμων κεκλιμένων ή ευθυγραμμισμένων ινών. Πιο πρόσφατα, οι Fantilli και Vallini (2007) πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο για την εκτίμηση της απόκρισης μιας ευθύγραμμης κεκλιμένης ίνας, λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά των χαλύβδινων ινών και της τσιμεντοειδούς μήτρας, όπως και τη σχέση συνάφειας-ολίσθησης που διέπει τη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών. Καθώς όμως δεν υπάρχει γενικός ορισμός για τις ιδιότητες της διεπιφάνειας, όπως ο συντελεστής τριβής και οι τάσεις συνάφειας, θα πρέπει αυτές να προσδιορίζονται για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Οι Cuhna et al. (2007) παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο ικανό να προσομοιώνει με αρκετή ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης χαλύβδινων ινών, ευθύγραμμων και με αγκιστροειδή άκρα, κάθετων και με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής, που οι ίδιοι πραγματοποίησαν. Παρά την καλή συμφωνία των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, το αναλυτικό προσομοίωμα της εξόλκευσης των κεκλιμένων ινών δε λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως η κάμψη και η πλαστικοποίηση της ίνας και ο θρυμματισμός της τσιμεντοειδούς μήτρας κοντά στο σημείο εξόδου της ίνας. Οι Lee et al. (2010) πραγματοποίησαν αρχικά πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης ευθύγραμμων χαλύβδινων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής μελετώντας διάφορες γωνίες προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης. Βασίζόμενοι στα πειραματικά τους αποτελέσματα ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ινών που εξόλκευονται, τόσο παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης, όσο και με γωνία κλίσης ως προς αυτή, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους επιπρόσθετους μηχανισμούς που αναπτύσσονται, όπως ο

θρυμματισμός της μήτρας στο σημείο εξόδου της ίνας. Μελετώντας πειραματικά και θεωρητικά γωνίες προσανατολισμού της ίνας ίσες με 0° , 15° , 30° , 45° και 60° συμπεράναν ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές της για γωνίες προσανατολισμού της ίνας που κυμαίνονται από 30° έως 45° . Οι Laranjeira et al. (2010a) πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς κατά τη λοξή εξόλκευση ευθύγραμμων χαλύβδινων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα. Το μοντέλο τους βασίστηκε σε έναν περιορισμένο αριθμό εισαγομένων παραμέτρων, όπως οι ιδιότητες υλικών ίνας και μήτρας, η γεωμετρία της ίνας, οι συνοριακές συνθήκες (γωνία προσανατολισμού της ίνας και μήκος της ίνας μέσα στη μήτρα) και τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης ινών κάθετων στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής. Ακόμη, επέκτειναν την παραπάνω αναλυτική μέθοδο για την εκτίμηση της απόκρισης σε εξόλκευση κεκλιμένων χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα, βασιζόμενοι σε πειραματικά αποτελέσματα αντίστοιχων ινών που εξολκεύονται κατά τη διεύθυνση της φόρτισης (Laranjeira et al. 2010b).

2.4 Δομικά μέλη από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα

Τις τελευταίες δεκαετίες πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος και διάφορων τύπων ινοπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων για τη βελτίωση της συμπεριφοράς δομικών μελών. Αρχικά, οι μελέτες αυτές ήταν πειραματικού χαρακτήρα, ενώ αργότερα αναπτύχθηκαν αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για την εκτίμηση της συμπεριφοράς δομικών μελών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Οι αριθμητικές μελέτες βασίστηκαν στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί ένα χρήσιμο και αποτελεσματικό εργαλείο για τους ερευνητές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της αριθμητικής προσομοίωσης αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να μειώσει έως ένα βαθμό τον όγκο των απαιτούμενων πειραμάτων (Abdollahi 1996). Σε κάθε περίπτωση, οι πειραματικές δοκιμές είναι απαραίτητες για την πλήρη και αποτελεσματική διερεύνηση οποιουδήποτε δομικού συστήματος. Επίσης, κάθε αναλυτικό ή αριθμητικό προσομοίωμα θα πρέπει να βασίζεται σε αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα. Επομένως, η πειραματική και αριθμητική μελέτη είναι σημαντικό να αλληλοσυμπληρώνονται για τη διερεύνηση ενός φαινομένου (Nethercot 2002, Queiroz et al. 2007). Στη συνέχεια παρουσιάζονται χαρακτηριστικές πειραματικές, αναλυτικές και αριθμητικές μελέτες για την εκτίμηση κυρίως της καμπτικής συμπεριφοράς δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα.

Οι Bentur και Mindess (1983) πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων δοκών από σκυρόδεμα. Οι δοκοί ήταν οπλισμένες είτε με διαμήκειες ράβδους, είτε με κάποιο ογκομετρικό ποσοστό χαλύβδινων ινών, είτε με συνδυασμό των παραπάνω. Από τις πειραματικές καμπύλες δύναμης-μετακίνησης που προέκυψαν, συμπεράναν ότι η ενίσχυση του άοπλου σκυροδέματος με ίνες έχει ως αποτέλεσμα πολύ μικρότερη αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας σε σχέση με την περίπτωση όπλισης με διαμήκειες ράβδους. Η προσθήκη όμως χαλύβδινων ινών σε συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί ακόμα και να διπλασιάσει το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η δοκός. Ακόμη, παρατήρησαν ότι η προσθήκη των ινών σε συμβατικά οπλισμένη δοκό αλλάζει την εικόνα

της ρηγματώσης, αυξάνοντας των αριθμό των δημιουργούμενων ρωγμών, μειώνοντας ταυτόχρονα το μήκος και το εύρος τους. Οι Balaguru et al. (1992) διεξήγαγαν ένα σημαντικό αριθμό πειραμάτων για τη διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος. Μετέβαλλαν τις παραμέτρους του τύπου της ίνας (χαλύβδινες ίνες με αγκιστροειδή άκρα, με παραμορφωμένα άκρα και κυματοειδείς), του μήκους της ίνας (30, 50 και 60 mm), του ογκομετρικού ποσοστού των ινών στο μίγμα (30 έως 120 kg/m³) και του τύπου του σκυροδέματος (συμβατικής και υψηλής αντοχής). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους συμπεράναν ότι οι ίνες με αγκιστροειδή άκρα ήταν πολύ αποτελεσματικές στη βελτίωση της καμπτικής αντοχής των δοκιμίων ακόμα και για τα μικρότερα ογκομετρικά ποσοστά, ενώ για τους άλλους τύπους ινών χρειάζονται μεγαλύτερα ογκομετρικά ποσοστά για την απόκτηση της ίδιας καμπτικής αντοχής. Επίσης, για τις ίνες με αγκιστροειδή άκρα η μεταβολή του μήκους δεν επηρέασε ιδιαίτερα την καμπτική αντοχή του δοκιμίου. Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξαν και οι Banthia και Trottier (1995), οι οποίοι πραγματοποίησαν παρόμοιες πειραματικές δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε ινοπλισμένες δοκούς με σκοπό τη διερεύνηση της καμπτικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Για τη μελέτη τους χρησιμοποίησαν χαλύβδινες κυματοειδείς ίνες δύο διαφορετικών γεωμετριών και ίνες με αγκιστροειδή και κωνικά άκρα, καθώς και διαφορετικής αντοχής τσιμεντοειδείς μήτρες. Το ογκομετρικό ποσοστό των ινών διατηρήθηκε σταθερό. Παρατήρησαν ότι τα δοκίμια με ίνες με μηχανικά παραμορφωμένο σχήμα μόνο στα άκρα τους (όπως οι αγκιστροειδείς) παρουσίασαν μεγαλύτερη καμπτική αντοχή σε σχέση με εκείνα που περιλάμβαναν ίνες μηχανικά παραμορφωμένες σε όλο το μήκος τους (όπως οι κυματοειδείς). Οι Purkiss και Blagojević (1993) διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές κάμψης οπλισμένων δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος, καθώς και συμβατικά οπλισμένων δοκών, με σκοπό τη διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς τους. Παρατήρησαν ότι η προσθήκη χαλύβδινων ινών σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος αυξάνει την καμπτική αντοχή τους και παράλληλα μειώνει το μέγεθος των ρωγμών. Στη συνέχεια, προσπάθησαν να προσδιορίσουν αναλυτικά τη φέρουσα ικανότητα των ίδιων δοκών και σύγκριναν τα αναλυτικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά (Purkiss et al. 1997). Ανέφεραν ότι ενώ οι αναλυτικές καμπύλες μπορούσαν να περιγράψουν ικανοποιητικά τις πειραματικές μέχρι το στάδιο της ρηγματώσης, ακολούθως υπήρχαν αρκετές αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι Tan et al. (1994, 1995) μελέτησαν πειραματικά την επιρροή του ογκομετρικού ποσοστού χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα στη συμπεριφορά δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος με συμβατικό οπλισμό. Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση των ινών είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών μικρότερου εύρους, ενώ όσο μεγαλύτερο ήταν το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα (από 0-2.0%), τόσο μεγαλύτερη ήταν η δυσκαμψία και η αντοχή των αντίστοιχων δοκιμίων. Παράλληλα με τις πειραματικές δοκιμές, ανέπτυξαν μια απλή αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση του βέλους κάμψης των ινοπλισμένων δοκών, την οποία αξιολόγησαν συγκρίνοντας τα αναλυτικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Πολλοί ερευνητές επικεντρώθηκαν στη μελέτη της επιρροής της προσθήκης χαλύβδινων ινών σε τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής και παρατήρησαν ότι η βελτίωση της συμπεριφοράς του λόγω των ινών είναι ανάλογη με εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος (Taylor et al. 1997). Οι Ashour και Wafa (1993) μελέτησαν την επιρροή της προσθήκης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα στην καμπτική συμπεριφορά δοκών οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Οκτώ δοκοί με διαφορετικά ογκομετρικά ποσοστά ινών στο μίγμα (0, 0.5, 1.0 και 1.5%) υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη των ινών βελτίωσε σημαντικά την αντοχή, την πλαστιμότητα και τη δυσκαμψία των δοκών. Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξαν και οι Chunxiang και Patnaikuni (1999) μετά από δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής, στις οποίες προστέθηκαν χαλύβδινες ίνες με πεπλατυσμένα άκρα σε ογκομετρικό ποσοστό 1%. Οι Casanova et al. (1997) διερεύνησαν τη δυνατότητα των χαλύβδινων ινών να αντικαταστήσουν τον εγκάρσιο οπλισμό δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Εκτέλεσαν πειράματα κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς σκυροδέματος υψηλής αντοχής με συμβατικό εγκάρσιο και διαμήκη οπλισμό, όπως και σε δοκούς σκυροδέματος υψηλής αντοχής χωρίς συνδετήρες και θλιβόμενο διαμήκη οπλισμό αλλά με χαλύβδινες ίνες με αγκιστροειδή άκρα σε ποσοστό 1.25% στο μίγμα. Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήγαγαν ήταν ότι ο συνδυασμός σκυροδέματος υψηλής αντοχής και χαλύβδινων ινών προσφέρει πλαστιμότητα και μείωση του εύρους των ρωγμών και ότι η προσθήκη χαλύβδινων ινών σε δοκούς σκυροδέματος υψηλής αντοχής μπορεί να αντικαταστήσει υπό προϋποθέσεις τον οπλισμό διάτμησης. Συγκεκριμένα, για τον τύπο των δοκών που μελέτησαν, η προσθήκη χαλύβδινων ινών σε ποσοστό 1.25% στο μίγμα ή ποσοστό συμβατικού χάλυβα (συνδετήρες και θλιβόμενος οπλισμός) 1% οδηγούν στην ίδια γενική συμπεριφορά. Οι Daniel και Loukili (2002) μελέτησαν πειραματικά την καμπτική συμπεριφορά δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές κάμψης σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής και σε όμοιες δοκούς με την προσθήκη χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα. Οι σημαντικές βλάβες στο σκυρόδεμα λόγω της εναλλασσόμενης φοράς της φόρτισης προκάλεσαν απώλειες τόσο στην πλαστιμότητα, όσο και στη φέρουσα ικανότητα των μελών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κατέδειξαν ότι οι ίνες μπορούν να αυξήσουν τη δυσκαμψία και να βελτιώσουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δομικών μελών.

Όπως είναι προφανές, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών που έχει μελετήσει πειραματικά τη συμπεριφορά δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, κυρίως μέσω δοκιμών κάμψης. Πιο πρόσφατα, ερευνητές ανέπτυξαν αριθμητικά προσομοιώματα με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς ινοπλισμένων δοκών καθώς και για τη διερεύνηση των μηχανισμών που τη διέπουν. Ένα από τα πρώτα αριθμητικά προσομοιώματα δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη αναπτύχθηκε από τους Murugappan et al. (1994). Το ρηγματωμένο ινοπλισμένο σκυρόδεμα λήφθηκε υπόψη ως ένα ορθότροπο υλικό με βάση το μοντέλο διανεμημένης ρωγμής και χρησιμοποιήθηκαν καταστατικές σχέσεις για το

ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε θλίψη και εφελκυσμό. Για την αξιολόγηση του αριθμητικού προσομοιώματος έγινε σύγκριση των αριθμητικά προσδιορισμένων καμπυλών δύναμης-μετακίνησης με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Οι Padmarajaiah και Ramaswamy (2002) μόρφωσαν ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την εκτίμηση της καμπτικής αντοχής δοκού προεντεταμένου ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Αντιμετώπισαν το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ως ένα υλικό για το οποίο εισήγαγαν τις κατάλληλες ιδιότητες. Οι τιμές της μονοαξονικής εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής λήφθηκαν από τις αντίστοιχες δοκιμές που πραγματοποίησαν οι ίδιοι σε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος για τα διαφορετικά ογκομετρικά ποσοστά των ινών που μελέτησαν. Επίσης, χρησιμοποίησαν τροποποιημένο κριτήριο διαρροής William-Warnke για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, για να προσομοιώσουν την ιδιότητα των ινών να περιορίζουν τη διάδοση των ρωγμών μέσω της «γεφύρωσής» τους, προσομοίωσαν τις ίνες μέσω πεπερασμένων στοιχείων δικτύματος κατά μήκος της δοκού. Παράλληλα με την αριθμητική προσομοίωση, πραγματοποίησαν και πειραματικές δοκιμές κάμψης των υπό μελέτη δοκών. Συγκρίνοντας τις αριθμητικές καμπύλες δύναμης-μετακίνησης με τις αντίστοιχες πειραματικές καθώς και την εικόνα των ρηγματώσεων από τις αναλύσεις και τα πειράματα, παρατήρησαν ότι βρίσκονται σε καλή συμφωνία. Επίσης, τα αποτελέσματα της έρευνάς τους ανέδειξαν την ευεργετική επίδραση των ινών στην αύξηση της πλαστιμότητας και της καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Οι Swaddiwudhipong και Seow (2006) δημιούργησαν ένα δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη τεσσάρων σημείων χρησιμοποιώντας λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Για την προσομοίωση του σύνθετου υλικού χρησιμοποίησαν οκτακομβικά στοιχεία επίπεδης έντασης, ενώ για τις ράβδους οπλισμού χρησιμοποίησαν τρικομβικά στοιχεία δικτύματος. Λόγω της συμμετρίας της γεωμετρίας και της φόρτισης, προσομοιώθηκε μόνο η μισή δοκός λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας. Οι ιδιότητες υλικού του ινοπλισμένου σκυροδέματος εισήχθησαν στο αριθμητικό προσομοίωμα μέσω κριτηρίου διαρροής που είχε προταθεί από τους ίδιους συγγραφείς (Seow και Swaddiwudhipong 2005). Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης συγκρίθηκαν στη συνέχεια με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του καταστατικού νόμου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι Özcan et al. (2009) διερεύνησαν, τόσο αριθμητικά, όσο και πειραματικά την καμπτική συμπεριφορά δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Για την αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής κάμψης των ινοπλισμένων δοκών μόρφωσαν ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποίησαν τρισδιάστατα οκτακομβικά στερεά στοιχεία τα οποία περιλάμβαναν το μοντέλο διανεμημένης ρωγμής για την προσομοίωση της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και έναν αλγόριθμο πλαστικότητας για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό θλίψη. Για το διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό της δοκού χρησιμοποίησαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία δοκού. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αντιμετωπίστηκε ως ένα ομοιογενές υλικό, οι ιδιότητες του οποίου καθορίστηκαν από πειραματικές δοκιμές που διεξήγαγαν οι ίδιοι ερευνητές σε δοκίμια του σύνθετου υλικού. Για λόγους μείωσης του υπολογιστικού

κόστους και λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας, προσομοιώθηκε αριθμητικά το ένα τέταρτο του προβλήματος. Τελικά, σύγκριναν την αριθμητική καμπύλη δύναμης-μετακίνησης με την αντίστοιχη της πειραματικής δοκιμής κάμψης της ινοπλισμένης δοκού για να παρατηρήσουν ότι πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους.

2.5 Μανδύες για την ενίσχυση δομικών μελών

Ένας σημαντικός αριθμός υφιστάμενων κατασκευών έχει σχεδιαστεί με βάση παλαιότερους κανονισμούς και για μικρότερα σεισμικά φορτία σε σχέση με τις σύγχρονες κατασκευές. Επομένως, οι κατασκευές αυτές είναι ευάλωτες και επιρρεπείς σε σημαντικές βλάβες κατά τη διάρκεια πιθανού ισχυρού σεισμού. Η χρήση μανδύων για την ενίσχυση δομικών μελών αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική για την βελτίωση της συμπεριφοράς υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μανδύων για την ενίσχυση μελών Ο/Σ και πολλοί ερευνητές μελέτησαν τη συμπεριφορά μελών ενισχυμένων με μανδύες. Η γνώση που έχει προκύψει από την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, έχει αποκρυσταλλωθεί και αποτυπωθεί στις διατάξεις κανονιστικών κειμένων που αφορούν τις επεμβάσεις σε υφιστάμενα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως είναι ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2011).

Η ενίσχυση δομικών μελών με την εξωτερική εφαρμογή ελασμάτων είτε χαλύβδινων είτε ινοπλισμένων πολυμερών είναι μια ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνική που υπήρξε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Η ενίσχυση δοκών Ο/Σ με την εφαρμογή ελασμάτων χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής της δοκού και είναι αρκετά διαδεδομένη λόγω της ευκολίας εφαρμογής, του χαμηλού κόστους, της πρόκλησης ελάχιστης όχλησης κατά την εφαρμογή και της μικρής αύξησης της διατομής του ενισχυόμενου μέλους. Η πιο συνήθης εφαρμογή είναι η επικόλληση των ελασμάτων εξωτερικά στις εφελκόμενες επιφάνειες της δοκού. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την προετοιμασία της επιφάνειας και τη μέθοδο σύνδεσης των ελασμάτων με το υφιστάμενο σκυρόδεμα, που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το μεγάλο βάρος των ελασμάτων, προβλήματα πυραντίστασης, η πιθανή διάβρωση του χάλυβα και η αστοχία της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών με αποκόλληση του ελάσματος και πιθανή απόσχιση της επικάλυψης σκυροδέματος. Ερευνητές μελέτησαν κυρίως πειραματικά τις πιθανές αστοχίες δοκών ενισχυμένων με χαλύβδινα ελάσματα καθώς και τη διατμητική και καμπτική συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκών (Swamy et al. 1987, Jones et al. 1988, Ziraba et al. 1994, Hussain et al. 1995, Adhikary et al. 2000). Απέδειξαν ότι η εφαρμογή χαλύβδινων ελασμάτων σε δοκούς Ο/Σ μπορεί να αυξήσει σημαντικά την δυσκαμψία τους και να μειώσει τη ρηγμάτωση και την παραμόρφωση των μελών, ενώ μπορεί να αυξήσει κατά ένα μικρό ποσοστό (10-15%) την καμπτική αντοχή τους. Στις διατάξεις του Κεφαλαίου 8 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. αναφέρεται ότι η ενίσχυση της εφελκόμενης ζώνης έναντι ορθής έντασης μπορεί να επιτευχθεί με την επικόλληση ελασμάτων από χάλυβα στην εφελκόμενη ζώνη, κυρίως δοκών και πλακών. Επίσης, αναφέρεται ότι εξωτερικά στοιχεία από χάλυβα με τη

μορφή επικολλητών φύλλων μπορούν να εφαρμοστούν για την ενίσχυση ενός στοιχείου Ο/Σ έναντι τέμνουσας. Επίσης, η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας ενός υποστυλώματος μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη επικολλητών κολλάρων από χάλυβα ή ολόσωμου μανδύα από φύλλα χαλύβδινων ελασμάτων.

Η εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) με τη μορφή λεπτών ελασμάτων ή υφασμάτων για την ενίσχυση μελών Ο/Σ έχει αναπτυχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες και αποτελεί μια εναλλακτική λύση εκείνης των χαλύβδινων ελασμάτων. Τα ελάσματα ή υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών αποτελούνται από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδίου και εφαρμόζονται στις επιφάνειες των μελών μέσω εποξειδικών ρητινών. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου ενίσχυσης είναι το μικρό βάρος και πάχος των ελασμάτων με αποτέλεσμα τον εύκολο χειρισμό τους κατά την εφαρμογή και τη μη αύξηση του βάρους και των διαστάσεων του μέλους, η υψηλή αντοχή τους και το γεγονός ότι τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι χημικά αδρανή υλικά με αποτέλεσμα να μη διαβρώνονται. Επίσης, μπορούν να εφαρμοστούν σχετικά εύκολα και γρήγορα προκαλώντας ελάχιστη όχληση. Σημαντικός αριθμός ερευνητών έχει μελετήσει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης δοκών με ινοπλισμένα πολυμερή, τη συμπεριφορά των ενισχυμένων μελών, καθώς και τις πιθανές αστοχίες της ενίσχυσης (Saadatmanesh και Ehsani 1991, Triantafillou και Plevris 1992, Chajes et al. 1994, Norris et al. 1997, Täljsten και Elfgrén 2000, Khalifa και Nanni 2002). Τα ελάσματα ινοπλισμένων πολυμερών μπορούν να αυξήσουν την καμπτική και διατμητική αντοχή δοκών Ο/Σ, καθώς και να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά ως μέθοδος αποκατάστασης δομικών μελών. Πιθανές ανεπιθύμητες αστοχίες είναι η θραύση του ελάσματος, η θραύση του σκυροδέματος λόγω θλίψης και η απώλεια συνάφειας μεταξύ του ελάσματος και του υφιστάμενου σκυροδέματος με αποτέλεσμα την αποκόλληση. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου ενίσχυσης, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα. Κατά την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην κατασκευή (όπως στην περίπτωση πυρκαγιάς), αλλά και στην περίπτωση έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, μειώνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης και επομένως είναι απαραίτητη η εξωτερική προστασία του μανδύα με ειδικά επιχρίσματα, γυψοσανίδες, κ.λ.π. Αναφορικά με τις εποξειδικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών στο σκυρόδεμα, υπάρχουν δυσκολίες και περιορισμοί στην εφαρμογή τους ενώ και το κόστος τους είναι σχετικά υψηλό. Πιθανή λύση στα παραπάνω είναι η αντικατάσταση των εποξειδικών ρητινών με τσιμεντοκονίαμα σε συνδυασμό με ινοπλέγματα που αποτελούν ένα νέο τύπο υφασμάτων (Triantafillou και Paranicolaou 2006). Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Κεφάλαιο 8), ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της εφελκυσμένης ζώνης δοκών και πλακών έναντι ορθής έντασης, με χρήση κατάλληλου συγκολλητικού υλικού (π.χ. εποξειδική κόλλα) για την επικόλλησή τους στο εφελκυσμένο πέλμα του στοιχείου. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν λωρίδες ή ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας στοιχείων από Ο/Σ. Αναφέρεται επίσης, ότι με την προσθήκη επικολλητών κολλάρων από λωρίδες ινοπλισμένων

πολυμερών ή ολόσωμων μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να επιτευχθεί η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας κυρίως υποστυλωμάτων από Ο/Σ.

Η δημιουργία μανδύων Ο/Σ αποτελεί μια ακόμη μέθοδο ενίσχυσης ή αποκατάστασης δομικών μελών από Ο/Σ. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην αύξηση των διαστάσεων της υπάρχουσας διατομής του μέλους με μια νέα στρώση σκυροδέματος, η οποία οπλίζεται με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό και μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με έγχυση είτε με εκτόξευση του σκυροδέματος. Ερευνητές πραγματοποίησαν μελέτες, κυρίως πειραματικές, με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς δομικών μελών ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ, από τις οποίες προέκυψε ότι τα ενισχυμένα μέλη παρουσιάζουν αυξημένη δυσκαμψία, αντοχή και πλαστιμότητα σε σχέση με τα μη-ενισχυμένα (Ersoy et al. 1993, Rodriguez και Park 1994). Το μειονέκτημα των μανδύων Ο/Σ είναι η σημαντική αύξηση των διαστάσεων των μελών, καθώς το πάχος τους κυμαίνεται στα 60-100mm με αντίστοιχη αύξηση της μάζας του μέλους και η τεχνικά δύσκολη εφαρμογή τους. Μάλιστα, εάν δεν προετοιμαστεί σωστά η επιφάνεια του μέλους και δεν υπάρξει κάποιο μέσο σύνδεσης στη διεπιφάνεια μανδύα και μέλους μπορεί να παρατηρηθεί αστοχία λόγω της αποκόλλησης του μανδύα από το αρχικό μέλος (Vandoros και Dritsos 2008). Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Κεφάλαιο 8), η ενίσχυση της εφελκόμενης αλλά και της θλιβόμενης ζώνης δοκών και πλακών έναντι ορθής έντασης μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη νέας στρώσης Ο/Σ στο εφελκόμενο ή στο θλιβόμενο πέλαμα, αντίστοιχα. Επίσης, για την ταυτόχρονη ενίσχυση της εφελκόμενης και θλιβόμενης ζώνης ενός υποστυλώματος προτείνεται η προσθήκη κλειστού μανδύα Ο/Σ που να περιβάλλει ολόκληρη την περίμετρο του στοιχείου. Ακόμη, αναφέρεται ότι η ανεπάρκεια ενός στοιχείου σε τέμνουσα λόγω λοξής θλίψης του κορμού αντιμετωπίζεται με την προσθήκη νέων στρώσεων Ο/Σ, κατά προτίμηση με τη μορφή μανδύα, ενώ και στην περίπτωση ανεπάρκειας οπλισμού διάτμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μανδύες Ο/Σ. Η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας ενός υποστυλώματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής μανδύα Ο/Σ, ενώ και για την αύξηση της δυσκαμψίας ενός δομικού στοιχείου Ο/Σ προτείνεται η προσθήκη νέων στρώσεων σκυροδέματος. Τέλος, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επισημαίνει τη σημασία των κατασκευαστικών μέτρων σύνδεσης στη διεπιφάνεια της νέας στρώσης σκυροδέματος και του υφιστάμενου στοιχείου, που περιλαμβάνουν την επιμελημένη εκτράχυνση της επιφάνειας του στοιχείου (με υδραμμοβολή ή ελαφρό εξοπλισμό αέρος ή ηλεκτρικό βελόνι) και τη χρήση βλήτρων ή/και αγκυρίων.

Ένας άλλος τύπος μανδύα σκυροδέματος είναι το ενισχυμένο τσιμεντοκονίαμα (ferrocement). Πρόκειται για ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από τσιμεντοειδή μήτρα ενισχυμένη με ομοιόμορφο και συνεχές λεπτό δομικό πλέγμα και εφαρμόζεται με τη μορφή λεπτών ελασμάτων στο μέλος Ο/Σ. Καθώς το έλασμα ενισχυμένου τσιμεντοκονιάματος αποτελείται από το ίδιο υλικό με το μέλος Ο/Σ, μπορεί να θεωρηθεί ιδανική εναλλακτική λύση για την ενίσχυση και αποκατάσταση τέτοιων κατασκευών. Χαρακτηριστικό του σύνθετου αυτού υλικού είναι ο υψηλότερος λόγος εφελκυστικής αντοχής – βάρους και η μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, αντοχή, πλαστιμότητα και αντίσταση σε ρηγμάτωση που επιδεικνύει σε σχέση με τα συμβατικά τσιμεντοειδή υλικά.

Επιπρόσθετα, το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου μανδύα είναι ότι οι προαναφερθείσες ευεργετικές ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν μέσω μιας λεπτής στρώσης υλικού, της τάξης των 40 mm, που μπορεί να διαμορφωθεί και να εφαρμοστεί εύκολα σε οποιοδήποτε σχήμα και περίγραμμα χωρίς τη σημαντική αύξηση των διαστάσεων του μέλους (Paramasivam et al. 1998). Πειραματικές μελέτες με στόχο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκών Ο/Σ, ενισχυμένων με στρώσεις ενισχυμένου τσιμεντοκονιάματος (Ong et al. 1992, Paramasivam et al. 1994, Nassif και Najm 2004) έδειξαν ότι οι ενισχυμένες δοκοί παρουσίασαν βελτιωμένη συμπεριφορά, αυξημένη δυσκαμψία και φέρουσα ικανότητα. Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι σε όσες δοκούς εφαρμόστηκε έλασμα ενισχυμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς κατάλληλη προετοιμασία και τράχυνση της επιφάνειάς τους και χωρίς τη χρήση μηχανικών διατμητικών συνδέσμων, εμφανίστηκε αστοχία στη διεπιφάνεια μανδύα-σκυροδέματος με αποτέλεσμα τον πρόωρο διαχωρισμό τους. Επομένως, η εφαρμογή ελασμάτων ενισχυμένου τσιμεντοκονιάματος για την ενίσχυση δομικών μελών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

Με την εμφάνιση των ινοπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων και την εξέλιξη της τεχνολογίας του σκυροδέματος, αναπτύχθηκαν ινοπλισμένα τσιμεντοκονιατά υψηλής αντοχής (HSFRCC – High Strength Fibre Reinforced Cementitious Composites) και υψηλής επιτελεστικότητας (HPFRCC – High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites), τα οποία μπορούν να βρουν εφαρμογή ως μανδύες για την ενίσχυση και αποκατάσταση δομικών μελών Ο/Σ. Χαρακτηριστικό των ινοπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων υψηλής επιτελεστικότητας είναι η κρατυνόμενη συμπεριφορά σε εφελκυσμό μετά την πρώτη ρηγμάτωση και η υψηλή θλιπτική αντοχή. Η χρήση τους μπορεί να προσδώσει στα δομικά μέλη μεγαλύτερη αντοχή, πλαστιμότητα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Naaman και Reinhardt 1996) και λόγω των ιδιοτήτων αυτών είναι ιδανικά για την ενίσχυση κατασκευών Ο/Σ έναντι σεισμού (Parra-Montesinos 2005). Μελετητές διερεύνησαν κυρίως πειραματικά αλλά και αριθμητικά την αποτελεσματικότητα μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής και υψηλής επιτελεστικότητας ως μέσο ενίσχυσης δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος (Shannag και Alhassan 2005, Haddad et al. 2007, Meda et al. 2009, Martinola et al. 2010) και απέδειξαν ότι η εφαρμογή τέτοιων μανδύων βελτιώνει σημαντικά τη γενική συμπεριφορά του ενισχυμένου μέλους, αυξάνοντας σημαντικά την αντοχή, τη δυσκαμψία και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Ακόμη, ανέφεραν ότι πλεονέκτημα των μανδύων αυτών είναι η σχετικά απλή τεχνολογία εφαρμογής τους, καθώς λόγω των εξαιρετικών ρεολογικών ιδιοτήτων του υλικού μπορούν να κατασκευαστούν μανδύες με μικρά πάχη (έως 40 mm) και με μια απλή διαδικασία εκτράχυνσης της επιφάνειας του υφιστάμενου σκυροδέματος επιτυγχάνεται πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ των δύο επιφανειών χωρίς την ανάγκη χρήσης επιπλέον συνδέσμων και συνδετικών υλικών.

Δύο ειδικοί τύποι ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας που χρησιμοποιούνται ως μανδύες για την ενίσχυση δομικών μελών είναι τα σκυροδέματα SIFCON (Slurry Infiltrated Fibre Concrete) (Naaman et al. 1992) και SIMCON (Slurry Infiltrated Mat Concrete) (Oluokun και Haghayeghi 1998, Krstulovic-Opara και Al-

Shannag 1999, Dogan και Krstulovic-Orpara 2003). Για την κατασκευή τόσο του SIFCON, όσο και του SIMCON, απαιτείται η τοποθέτηση των ινών πριν τον εμποτισμό με την ειδική λεπτόκοκκη τσιμεντοειδή μήτρα. Η βασική διαφορά τους είναι ότι το SIFCON παρασκευάζεται με διακριτές ίνες σε μεγάλο ογκομετρικό ποσοστό στο μίγμα (10-15%), ενώ οι ίνες του SIMCON μορφώνονται σε ένα συνεχές πλέγμα με τη μορφή ψάθας. Καθώς ο προσανατολισμός των ινών του πλέγματος είναι ελεγχόμενος, το SIMCON μπορεί να επιδείξει υψηλή εφελκυστική αντοχή και πλαστιμότητα με πολύ μικρότερο ογκομετρικό ποσοστό ινών. Ερευνητές απέδειξαν την αποτελεσματικότητα των υλικών αυτών στην ενίσχυση δομικών μελών έναντι του σεισμού προσφέροντας σημαντική πλαστιμότητα, αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά της, η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης παρουσιάζει και κάποια προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με τη δυσκολία ανάμιξης και σκυροδέτησης (SIFCON) και τον περιορισμό στην τοποθέτηση και εφαρμογή σε περίπτωση περίπλοκων σχηματισμών (SIMCON) (Balaguru και Najm 2004). Μια ακόμη τεχνική ενίσχυσης μελών Ο/Σ που έχει μελετηθεί και προταθεί από ερευνητές είναι η εφαρμογή ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υψηλής επιτελεστικότητας με τη μορφή προκατασκευασμένων λωρίδων (Alaee και Karihaloo 2003, Farhat et al. 2007). Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το υλικό ενίσχυσης έχει παρόμοιες ιδιότητες με το αρχικό υλικό, όπως εφελκυστική αντοχή και δυσκαμψία, με αποτέλεσμα την καλή συνεργασία μεταξύ τους και την αποφυγή πρόωρων αστοχιών της διεπιφάνειας. Επίσης, προσφέρει την ευχέρεια της εφαρμογής των λωρίδων ενίσχυσης στις επιφάνειες του μέλους μέσω διάφορων σχηματισμών, ανάλογα με τις ανάγκες ενίσχυσης και αποκατάστασης. Πειραματικές και αριθμητικές μελέτες έδειξαν ότι η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής μπορεί να προσδώσει σε ενισχυμένες δοκούς βελτιωμένη καμπτική και διατμητική συμπεριφορά αλλά είναι σημαντικό οι χαλύβδινες ίνες να είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στον όγκο του μανδύα. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκατασκευασμένες επιφάνειες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με χαλύβδινες ίνες ως μανδύες για την ενίσχυση δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος, βελτιώνοντας την αντοχή και πλαστιμότητά τους (Ilki et al. 2006).

2.6 Συνεισφορά της διατριβής στο πεδίο του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Σχετικά με το αντικείμενο της μελέτης των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μέσω της δοκιμής εξόλκευσης μιας μεμονωμένης ίνας από τσιμεντοειδή μήτρα, η βιβλιογραφική επισκόπηση ανέδειξε την ύπαρξη πληθώρας μελετών πειραματικής αλλά και αναλυτικής φύσης. Αντίθετα, η προσέγγιση του προβλήματος μέσω αριθμητικής προσομοίωσης αποδείχθηκε αρκετά περιορισμένη, τόσο για την περίπτωση της εξόλκευσης ινών κάθετων στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής, όσο και για τις ίνες που εξολκεύονται με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού ως προς το επίπεδο της ρωγμής. Μάλιστα, τα αριθμητικά προσομοιώματα που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία αφορούν κυρίως απλοποιημένα δισδιάστατα προσομοιώματα της δοκιμής εξόλκευσης ινών κάθετων στο επίπεδο της ρωγμής. Σε αυτά τα αριθμητικά προσομοιώματα δίνεται έμφαση στην προσομοίωση και τη μελέτη της διεπιφάνειας

μεταξύ ίνας και μήτρας, ενώ υιοθετούνται απλοποιητικές παραδοχές σε σχέση με τις ιδιότητες των υλικών, όπως για παράδειγμα ελαστική μήτρα. Επομένως, είναι σημαντική η ανάπτυξη ενός λεπτομερούς και ακριβούς τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος της δοκιμής εξόλκευσης μιας ίνας με αγκιστροειδή άκρα από τσιμεντοειδή μήτρα. Επίσης, έχει ιδιαίτερη αξία το γεγονός ότι το προσομοίωμα που προτείνεται λαμβάνει υπόψη όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται στο φυσικό πρόβλημα και επομένως μπορεί να αποδώσει συνολικά τη συμπεριφορά του συστήματος ίνας-μήτρας σε όλα τα στάδια της εξόλκευσης. Ταυτόχρονα, καθώς ενσωματώνονται οι ιδιότητες των υλικών με ακρίβεια, το προσομοίωμα μπορεί να αναπαράγει τα πεδία τάσεων και παραμορφώσεων που οφείλονται στην πλαστικοποίηση της χαλύβδινης ίνας και τη ρηγμάτωση και σύνθλιψη (αστοχία λόγω θλίψης) της τσιμεντοειδούς μήτρας. Επίσης, το αριθμητικό προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς σε εξόλκευση χαλύβδινων ινών διαφορετικών σχημάτων, με απαραίτητη προϋπόθεση τη λεπτομερή προσομοίωση της γεωμετρίας της ίνας. Επιπρόσθετα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι για τον προσδιορισμό παραμέτρων απαραίτητων για την μόρφωση του αριθμητικού προσομοιώματος χρησιμοποιούνται αποτελέσματα που προκύπτουν από κατάλληλες πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης των χαλύβδινων ινών από την τσιμεντοειδή μήτρα.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση ανέδειξε την ύπαρξη περιορισμένων αριθμητικών προσομοιωμάτων και για τη διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς δομικών μελών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Στις περισσότερες αριθμητικές μελέτες που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία, το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα αντιμετωπίζεται ως ένα ομοιόμορφο υλικό και προτείνονται καταστατικά μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του. Στοιχεία για την ανάπτυξη αυτών των καταστατικών νόμων λαμβάνονται από πειραματικές δοκιμές σε δοκίμια του σύνθετου υλικού. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένας διαφορετικός τρόπος αριθμητικής προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Η συνεισφορά της τσιμεντοειδούς μήτρας στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά από αυτή των χαλύβδινων ινών, καθώς προσομοιώνονται μέσω δύο διαφορετικών επάλληλων στρώσεων πεπερασμένων στοιχείων, για τα οποία υιοθετούνται οι κατάλληλοι καταστατικοί νόμοι. Η διακριτή προσομοίωση της συνεισφοράς της τσιμεντοειδούς μήτρας και των ινών δίνει τη δυνατότητα στο μελετητή - ερευνητή να διεξάγει αριθμητικές δοκιμές μεταβάλλοντας παραμέτρους όπως το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης κάθε πιθανής ανομοιογενούς κατανομής των χαλύβδινων ινών καθ' ύψος της διατομής ενός δομικού μέλους. Η προτεινόμενη μέθοδος προσομοίωσης του σύνθετου υλικού μπορεί να εφαρμοστεί, τόσο στην περίπτωση μελών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όσο και στην περίπτωση ινοπλισμένων μανδύων ενίσχυσης. Σε κάθε περίπτωση, η αξιοπιστία της αποδεικνύεται μετά από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιωμάτων με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής διερευνάται η αποτελεσματικότητα ενός συγκεκριμένου τύπου μανδύα για την ενίσχυση μελών Ο/Σ. Πρόκειται για λεπτούς μανδύες πάχους 35 mm, που αποτελούνται από το συγκεκριμένο τύπο ινοπλισμένου

τσιμεντοκονιάματος που μελετάται. Μέσω της πειραματικής αλλά και της αριθμητικής μελέτης αναδεικνύεται η θετική επιρροή της ενίσχυσης με τους μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στην αντοχή, τη δυσκαμψία και τη γενικότερη συμπεριφορά των δοκών Ο/Σ υπό στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη κάμψη. Μάλιστα, καθώς η χρήση αυτών των μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος αποσκοπεί κυρίως στην ενίσχυση μελών υφιστάμενων κατασκευών έναντι σεισμού, έχει ιδιαίτερη αξία για το μελετητή η δυνατότητα εισαγωγής του σύνθετου υλικού σε ευρεία χρήση λογισμικά στατικής ανάλυσης κατασκευών. Για το λόγο αυτόν, προτείνεται μια μέθοδος για την ορθή προσομοίωση του σύνθετου υλικού σε τέτοιου είδους λογισμικά. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται για την ενίσχυση έναντι σεισμού μελών μιας υφιστάμενης κατασκευής Ο/Σ με τους υπό μελέτη μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Παράλληλα, μέσω του παραδείγματος, αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης τεχνικής ενίσχυσης.

3 ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διατριβής, δημιουργούνται αριθμητικά προσομοιώματα της δοκιμής εξόλκευσης χαλύβδινης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής, καθώς και αριθμητικά προσομοιώματα δοκιμών κάμψης διάφορων τύπων δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, καθώς και δοκών Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Η αριθμητική προσομοίωση των προαναφερθέντων προβλημάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Η επίλυση των υπό μελέτη προβλημάτων πραγματοποιείται με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού μη-γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων MSC-MARC (MSC VolA 2010). Στη συνέχεια του Κεφαλαίου παρατίθενται συνοπτικά τα θεωρητικά στοιχεία για τους τύπους μη-γραμμικότητας που συναντώνται καθώς και για τις μεθόδους μη-γραμμικής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται.

3.2 Μη-γραμμική ανάλυση

Πολλές φορές, για την επίλυση ενός δομικού προβλήματος επιλέγεται η γραμμική ελαστική ανάλυση, προσφέροντας το πλεονέκτημα των απλοποιημένων υπολογισμών και της γρήγορης εύρεσης λύσης. Για την εφαρμογή της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης γίνεται η παραδοχή γραμμικά ελαστικού νόμου για τα υλικά, με αποτέλεσμα να αρκεί η γνώση του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου του Poisson ν των υλικών των στοιχείων μιας κατασκευής. Επίσης, η γραμμική ελαστική ανάλυση έχει το σημαντικό πλεονέκτημα του μικρού υπολογιστικού κόστους, καθώς προκύπτουν λύσεις σε μικρό χρονικό διάστημα ακόμα και για κατασκευές με ιδιαίτερα σύνθετες γεωμετρίες, ενώ ισχύει και η αρχή της επαλληλίας, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται επιπλέον χρόνος για την επίλυση των συνδυασμών των διάφορων περιπτώσεων φόρτισης.

Παρόλα αυτά, για την ακριβή περιγραφή της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών πρέπει να συνυπολογιστούν και τα διάφορα μη-γραμμικά φαινόμενα που τη διέπουν (π.χ. η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των πλάστιμων υλικών και η ρηγμάτωση και θραύση των ψαθυρών υλικών). Επομένως, είναι επιβεβλημένη η χρήση μεθόδων μη-γραμμικής ανάλυσης, οι οποίες μπορεί να επιβαρύνουν την επίλυση ενός προβλήματος με σημαντικό υπολογιστικό κόστος, όμως έχουν τη δυνατότητα να αποδώσουν με ακρίβεια το πραγματικό φαινόμενο. Γενικά, τα αίτια στα οποία οφείλεται η μη-γραμμική συμπεριφορά ενός φορέα μπορούν να ενταχθούν στις παρακάτω τρεις κύριες κατηγορίες:

- Μη-γραμμικότητα υλικού
- Γεωμετρική μη-γραμμικότητα

- Μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες.

3.2.1 Μη-γραμμικότητα υλικού

Η μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή η μη-γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι μια συνήθης αιτία μη-γραμμικής συμπεριφοράς ενός φορέα, καθώς στην πράξη, τα δομικά υλικά μετά από ένα τμήμα γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς πλαστικοποιούνται ή/και θραύονται. Για την περιγραφή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς ενός υλικού είναι απαραίτητη η υιοθέτηση ενός κριτηρίου διαρροής, του νόμου ροής και ενός νόμου κράτυνσης (Bathe 1996).

Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κριτήριο διαρροής για τα μέταλλα είναι το κριτήριο von Mises, σύμφωνα με το οποίο η διαρροή επέρχεται όταν η ισοδύναμη τάση που είναι ίση με:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (3.1)$$

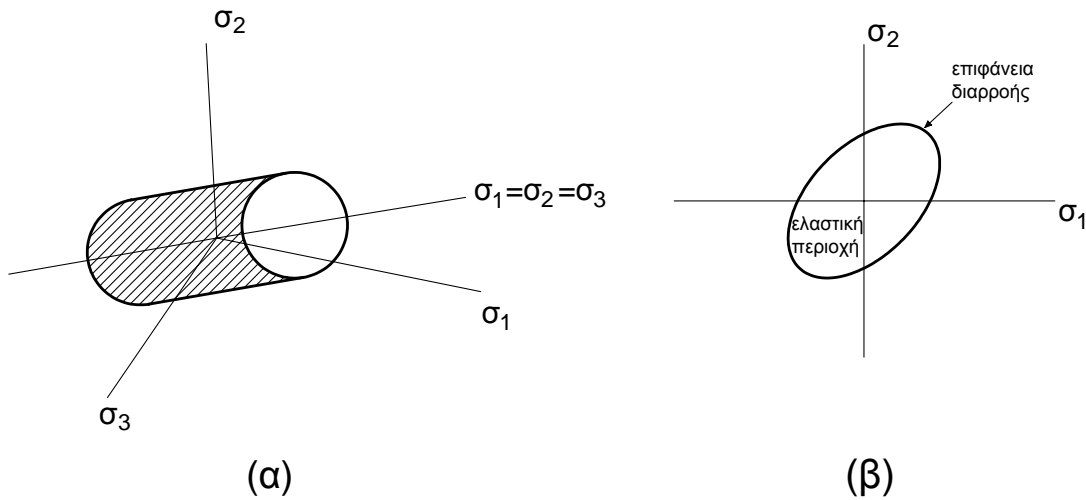
όπου σ_1 , σ_2 και σ_3 είναι οι κύριες τάσεις στις τρεις διευθύνσεις, υπερβαίνει την τάση διαρροής του υλικού.

Το κριτήριο διαρροής von Mises απεικονίζεται στο χώρο ως κύλινδρος. Η επιφάνεια διαρροής είναι μια κυλινδρική επιφάνεια ευθυγραμμισμένη κατά μήκος του άξονα $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1α σε τρισδιάστατη απεικόνιση, ενώ στο Σχήμα 3.1β φαίνεται η προβολή της στο επίπεδο $\sigma_1 - \sigma_2$. Το πεδίο των τάσεων μέσα στην επιφάνεια διαρροής είναι ελαστικό, ενώ οποιαδήποτε τάση πέρα από αυτή την επιφάνεια προκαλεί διαρροή του υλικού.

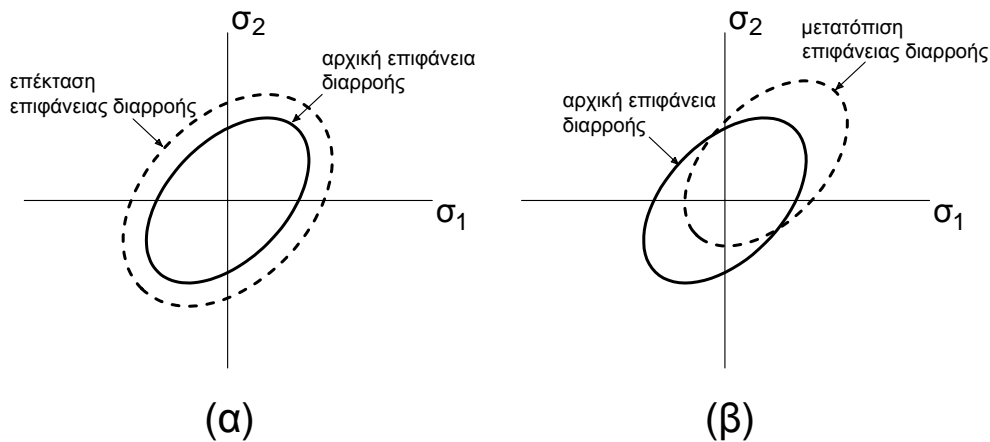
Το κριτήριο διαρροής καθορίζει πότε θα αρχίσει η διαρροή ενός υλικού, αλλά δεν περιγράφει την πλαστική συμπεριφορά του υλικού μετά τη διαρροή. Αυτή καθορίζεται μέσω του νόμου ροής, ο οποίος συσχετίζει τη μικροαύξηση της τάσης (incremental stress) με τη μικροαύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης (incremental plastic strain) στην ανελαστική περιοχή και προσδιορίζει τη διεύθυνση της πλαστικής παραμόρφωσης. Τυπικά, ο νόμος ροής καθορίζει ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια διαρροής.

Ο νόμος κράτυνσης περιγράφει πώς μεταβάλλεται το αρχικό κριτήριο διαρροής με τις διαδοχικές πλαστικές παραμορφώσεις και πώς μεταβάλλεται η επιφάνεια διαρροής με την πλαστική ροή. Ακόμη, προσδιορίζει και τις συνθήκες διαρροής του υλικού στην περίπτωση αναστροφής της φόρτισης. Οι κυριότεροι νόμοι κράτυνσης είναι ο ιστροπικός και ο κινηματικός. Ένας ισότροπος νόμος κράτυνσης ισοδυναμεί με μία ομοιόμορφη επέκταση ή συρρίκνωση της αρχικής επιφάνειας διαρροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2α. Αντίθετα, η κινηματική κράτυνση περιγράφει τη μεταφορά της αρχικής επιφάνειας διαρροής σε μία νέα θέση χωρίς μεταβολή του σχήματος και του μεγέθους της (Σχήμα 3.2β). Ουσιαστικά, ο κινηματικός νόμος κράτυνσης περιγράφει το γνωστό φαινόμενο

Bauschinger και παίζει σημαντικό ρόλο κατά την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών και κυρίως των μετάλλων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχ. 3.1: Σχηματική απεικόνιση κριτηρίου διαρροής von Mises.

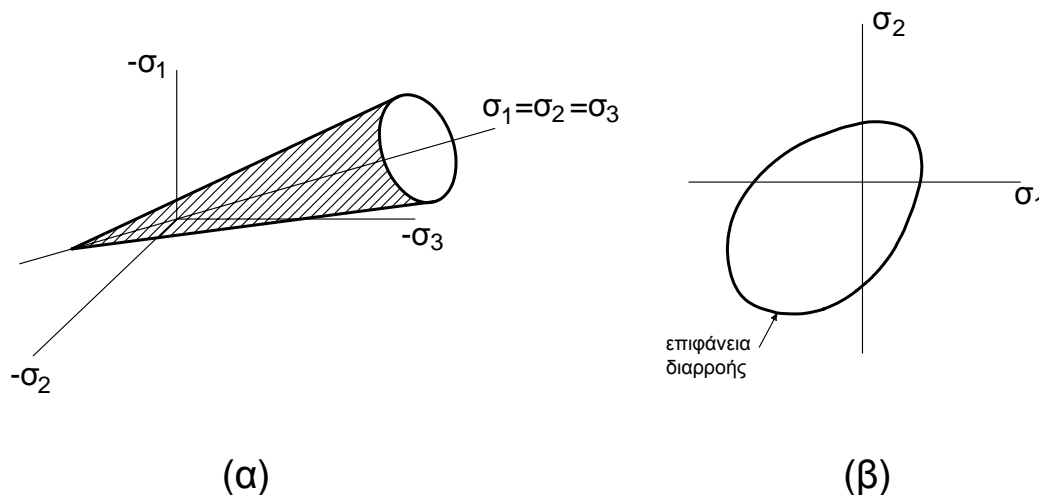


Σχ. 3.2: Νόμοι κράτνσης: α) ισότροπος και β) κινηματικός.

Στην παρούσα διατριβή υιοθετείται το κριτήριο διαρροής von Mises για το χάλυβα τόσο των ινών, όσο και του σπλισμού των δοκών, σε συνδυασμό με κινηματικό νόμο κράτνσης, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο Bauschinger κατά την αντιστροφή της φόρτισης.

Για το σκυρόδεμα και την τσιμεντοειδή μήτρα υιοθετείται το κριτήριο διαρροής Drucker-Prager που απεικονίζεται στο χώρο ως ένας κανονικός κώνος ευθυγραμμισμένος στον άξονα $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3α. Το ελλειψοειδές σχήμα του Σχήματος 3.3β αποτελεί την απεικόνιση της επιφάνειας διαρροής Drucker-Prager στο επίπεδο, ως

τομή του κώνου με το επίπεδο $\sigma_1 - \sigma_2$. Σημειώνεται, ότι πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αναλύσεις με την υιοθέτηση διαφορετικών κριτηρίων διαρροής που διατίθενται στο χρησιμοποιούμενο λογισμικό μη-γραμμικής ανάλυσης MSC-MARC, κατάλληλα για υλικά όπως το σκυρόδεμα, όπως για παράδειγμα το κριτήριο Buyukozturk. Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι δεν υπήρχε ουσιαστική διαφοροποίηση σε αυτά και αποφασίστηκε τελικά η υιοθέτηση του κριτηρίου διαρροής Drucker-Prager.



Σχ. 3.3: Σχηματική απεικόνιση κριτηρίου διαρροής Drucker-Prager.

Για την προσομοίωση της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και της τσιμεντοειδούς μήτρας ακολουθείται η μέθοδος της διανεμημένης ρωγμής. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ιδέα ότι, ιδιαίτερα στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, αναπτύσσονται πολλές μικρές ρωγμές, οι οποίες ενώνονται για να σχηματίσουν μία ή και περισσότερες κύριες ρωγμές σε προχωρημένο στάδιο της διαδικασίας φόρτισης (de Borst et al. 2004). Με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο, η ρηγμάτωση περιγράφεται μέσω της αλλαγής των καταστατικών νόμων του υλικού στα σημεία ολοκλήρωσης (Gauss points) των πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε μια ρωγή που σχηματίζεται σε ένα από αυτά να είναι ισοδύναμη με έναν άπειρο αριθμό μικρορηγματώσεων διανεμημένων σε όλο τον όγκο που αντιστοιχεί στο στοιχείο αυτό. Πλεονέκτημα της μεθόδου της διανεμημένης ρωγμής αποτελεί το γεγονός ότι δεν απαιτείται επαναδιακριτοποίηση του φορέα, όπως για παράδειγμα στη μέθοδο της διακριτής ρωγμής, ενώ δεν προκύπτουν περιορισμοί στον αριθμό των αναπτυσσόμενων ρωγμών και στη διεύθυνση διάδοσής τους. Επομένως, η μέθοδος είναι κατάλληλη για την προσομοίωση της ρηγμάτωσης δοκών οπλισμένου σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος, καθώς στις περιπτώσεις αυτές εμφανίζεται σημαντικός αριθμός ρωγμών, των οποίων η θέση και η διεύθυνση διάδοσης δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές. Γενικά, μια ρωγή δημιουργείται όταν ο συνδυασμός των τάσεων ικανοποιήσει κάποιο δεδομένο κριτήριο, για παράδειγμα όταν η μέγιστη κύρια τάση σε κάποιο σημείο φτάσει την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Μετά από την εμφάνιση της ρωγμής, η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι οι συνολικές παραμορφώσεις $\Delta \epsilon$ αναλύονται σε άθροισμα των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης $\Delta \epsilon^{cr}$ και των

παραμορφώσεων του μη-ρηγματωμένου σκυροδέματος που υπάρχει μεταξύ των ρωγμών $\Delta\epsilon^{co}$ (de Borst και Nauta 1985, Rots 1991):

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon^{cr} + \Delta\epsilon^{co}. \quad (3.2)$$

3.2.2 Γεωμετρική μη-γραμμικότητα

Η γεωμετρική μη-γραμμικότητα εμφανίζεται όταν οποιαδήποτε αλλαγή στη γεωμετρία μιας κατασκευής επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά της (Cook 1995, Bathe 1996). Συγκεκριμένα, εάν οι μετακινήσεις, δηλαδή οι μετατοπίσεις και οι στροφές ενός φορέα είναι μεγάλες, τότε οι εξισώσεις ισορροπίας για το φορέα αυτόν γίνονται μη-γραμμικές. Επίσης, παύει να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων του φορέα. Οι κατηγορίες των γεωμετρικά μη-γραμμικών προβλημάτων είναι οι εξής:

- Μεγάλες μετατοπίσεις / μεγάλες στροφές / μικρές παραμορφώσεις
- Μεγάλες μετατοπίσεις / μικρές στροφές / μικρές παραμορφώσεις
- Μεγάλες μετατοπίσεις / μεγάλες στροφές / μεγάλες παραμορφώσεις.

Για ένα πρόβλημα που περιλαμβάνει σημαντικές μεταβολές της γεωμετρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υλική μόρφωση ή μόρφωση κατά Lagrange για την περιγραφή της παραμόρφωσης του φορέα. Η μόρφωση κατά Lagrange διακρίνεται σε δύο τύπους: στην ολική μόρφωση κατά Lagrange (Total Lagrange formulation) και στην προσαρμοστική μόρφωση κατά Lagrange (Updated Lagrange formulation). Στην ολική μόρφωση κατά Lagrange οι εξισώσεις ισορροπίας υπολογίζονται με βάση την αρχική, απαραμόρφωτη κατάσταση του φορέα, που θεωρείται κατάσταση αναφοράς. Κατά την προσαρμοστική μόρφωση κατά Lagrange, οι εξισώσεις ισορροπίας υπολογίζονται με βάση κάποια γνωστή παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα, η οποία ενημερώνεται διαρκώς καθώς εξελίσσονται οι υπολογισμοί.

Τα προβλήματα που αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής μορφώνονται με βάση τη θεώρηση των μεγάλων παραμορφώσεων. Επίσης, επιλέγεται η προσαρμοστική μόρφωση κατά Lagrange για τη διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας.

3.2.3 Μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες

Η μη-γραμμική συμπεριφορά ενός φορέα μπορεί να οφείλεται και στη μεταβολή των συνοριακών συνθηκών κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η μεταβολή των συνθηκών επαφής μεταξύ δύο σωμάτων ή δύο τμημάτων του ίδιου σώματος είναι μία συνήθης πηγή μη-γραμμικότητας σε πολλά προβλήματα της πράξης (Cook 1995, Bathe 1996). Έτσι, κατά τη φόρτιση, δύο σώματα που δεν βρίσκονται σε επαφή μπορεί λόγω μετακίνησης να έρθουν σε επαφή, ή δύο σώματα που βρίσκονται σε επαφή μπορεί να αποχωριστούν, ή δύο σώματα που βρίσκονται σε επαφή μπορεί να ολισθήσουν το ένα σε σχέση με το άλλο, με ταυτόχρονη ανάπτυξη δυνάμεων τριβής.

Η μη-γραμμικότητα που προέρχεται από την επαφή δύο σωμάτων αποτελεί σημαντικό μέρος του προβλήματος της εξόλκευσης της χαλύβδινης ίνας από την τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής. Αναλυτική παρουσίαση των θεωρούμενων συνθηκών επαφής και τριβής θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο Κεφάλαιο.

3.3 Μέθοδος μη-γραμμικής ανάλυσης

Οι εξισώσεις ισορροπίας ενός μη-γραμμικού προβλήματος είναι γενικά της μορφής

$$f - p = 0, \quad (3.3)$$

όπου f είναι οι επιβεβλημένες δυνάμεις και p οι εσωτερικές δυνάμεις του συστήματος. Λόγω της μη-γραμμικότητας των εξισώσεων ισορροπίας, ακολουθείται μια διαδικασία επαυξητικής μορφής για την επίλυσή τους. Στις επαυξητικές μεθόδους η εξωτερική φόρτιση επιβάλλεται με τη μορφή «επαυξήσεων του φορτίου», οι οποίες είναι αρκετά μικρές έτσι ώστε η συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος να θεωρείται γραμμική μέσα σε κάθε βήμα επαύξεσης. Έτσι, για κάθε βήμα επαύξεσης του φορτίου n , η εξίσωση (3.3) μπορεί να γραφτεί με τη μορφή

$$\Delta f^n - \Delta p^n(d^n) = 0, \quad (3.4)$$

όπου d^n η μετατόπιση στο βήμα n . Για τη βελτίωση της ακρίβειας της επαυξητικής μεθόδου και προκειμένου να ικανοποιείται η ισορροπία των εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων του συστήματος σε κάθε στάδιο της βηματικής διαδικασίας, θα πρέπει να εφαρμόζεται παράλληλα και μια επαναληπτική μέθοδος (Cook 1995). Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη επαναληπτική μέθοδος είναι η γενικευμένη μέθοδος Newton-Raphson.

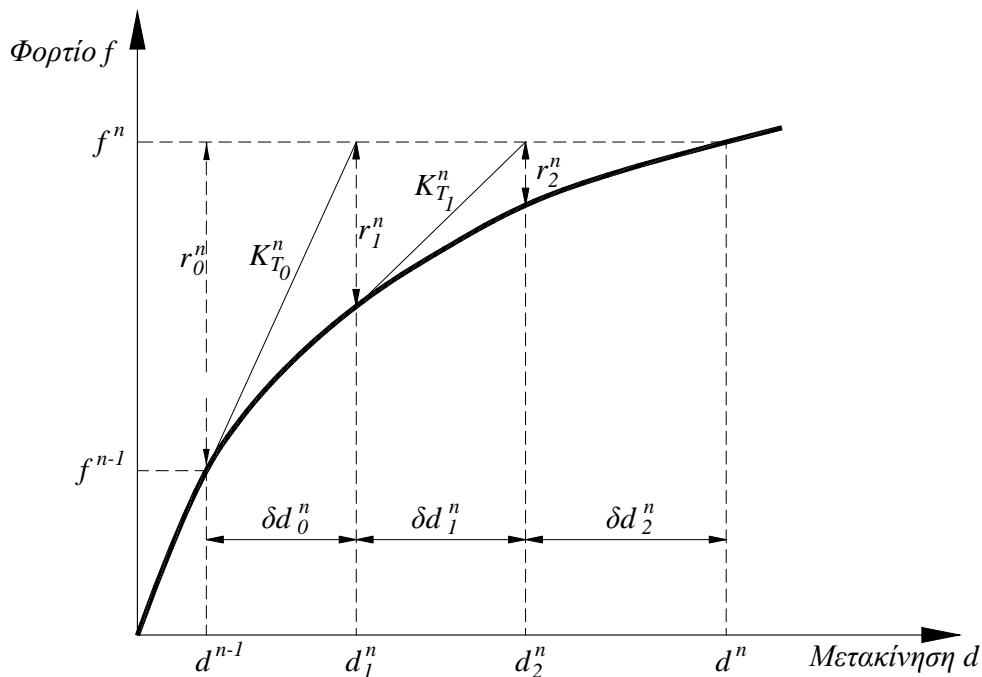
Στόχος της επαναληπτικής μεθόδου είναι η εξάλειψη, σε κάθε επαυξητικό βήμα, του υπολοίπου r που αποτελεί τη διαφορά μεταξύ των εξωτερικών φορτίων f και των εσωτερικών δυνάμεων p , έτσι ώστε να ικανοποιείται η ισορροπία. Η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson περιγράφεται από την εξίσωση:

$$r(d_i^n) = K_T^n \delta d_i^n, \quad (3.5)$$

όπου K_T είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας, ο δείκτης n αντιπροσωπεύει το επαυξητικό βήμα και ο δείκτης i το επαναληπτικό βήμα. Λύνοντας την εξίσωση (3.5) ως προς τη μετατόπιση του επαναληπτικού βήματος δd_i^n και προσθέτοντάς τη στην τρέχουσα μετατόπιση, η βελτιωμένη προσέγγιση της λύσης στο τέλος κάθε επανάληψης θα προκύπτει ως εξής:

$$d_{i+1}^n = d_i^n + \delta d_i^n, \quad (3.6)$$

Για την περίπτωση όπου έχει επιτευχθεί προσεγγιστικά η ισορροπία μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων p^{n-1} και των εξωτερικών δυνάμεων f^{n-1} στο επαυξητικό βήμα $n-1$ και επιδιώκεται η επίτευξη της ισορροπίας στο επαυξητικό βήμα n , η επαναληπτική διαδικασία της γενικευμένης μεθόδου Newton-Raphson παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 3.4.



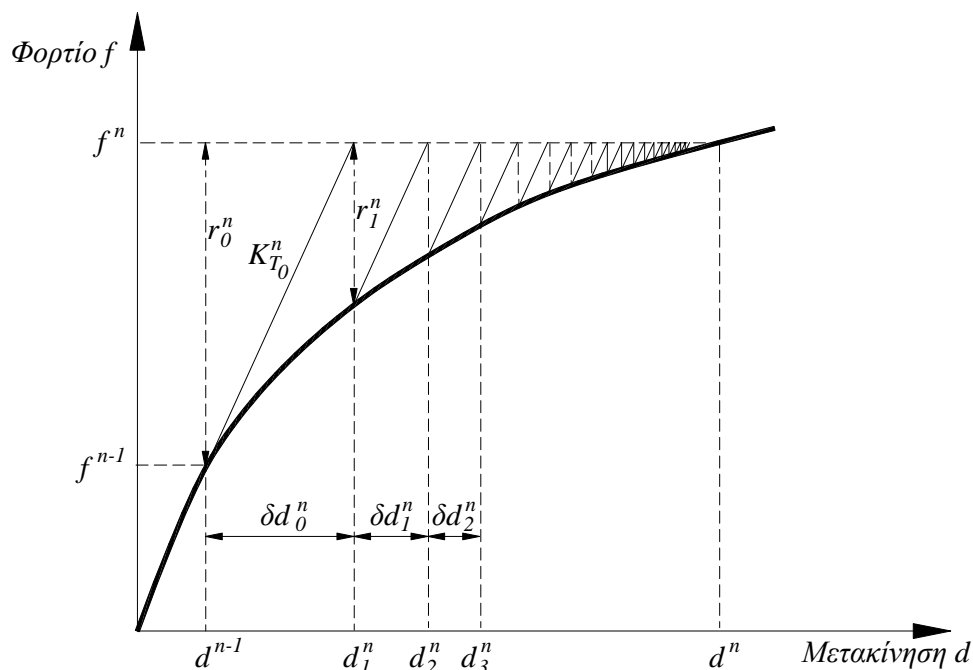
Σχ. 3.4: Η γενικευμένη μέθοδος Newton-Raphson.

Η γενικευμένη μέθοδος Newton-Raphson χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση συστημάτων μη-γραμμικών εξισώσεων. Μπορεί, όμως, να θεωρηθεί «ακριβή» από άποψη υπολογιστικού κόστους, καθώς απαιτείται ο επαναπροσδιορισμός και η αντιστροφή του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας σε κάθε επαναληπτικό βήμα. Μια παραλλαγή της γενικευμένης μεθόδου που έχει προταθεί με σκοπό την παράκαμψη της δυσκολίας αυτής είναι η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson, που απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 3.5. Στη μέθοδο αυτή, το μητρώο δυσκαμψίας διατηρείται σταθερό σε κάθε επαναληπτικό βήμα και δεν υπολογίζεται εκ νέου καθ' όλη τη διάρκεια επαύξησης του φορτίου, όπως φαίνεται και στη γραφική απεικόνιση της μεθόδου. Παρόλα αυτά, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, η τροποποιημένη μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε σχετικά αργή σύγκλιση, καθώς μπορεί να χρειαστεί η εκτέλεση πολύ περισσότερων επαναληπτικών βημάτων για μία επαύξηση του φορτίου.

Για την επίλυση των αριθμητικών προβλημάτων που μελετώνται στην παρούσα διατριβή και για το χειρισμό των μη-γραμμικοτήτων τους, αποφασίστηκε να εφαρμοστεί η γενικευμένη μέθοδος Newton-Raphson. Η επαναληπτική αυτή μέθοδος αποδείχθηκε αποδοτικότερη λόγω των ισχυρών μη-γραμμικοτήτων των θεωρούμενων προβλημάτων.

Κάθε επαναληπτική μέθοδος πρέπει να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με κάποιον τύπο κριτηρίου σύγκλισης, έτσι ώστε να εξακριβώνεται σε κάθε επαναληπτικό βήμα το κατά πόσο η τρέχουσα λύση βρίσκεται κοντά στην ακριβή λύση του προβλήματος. Καθώς στους αριθμητικούς υπολογισμούς η κατάσταση ισορροπίας δεν μπορεί να επιτευχθεί απόλυτα, στόχο αποτελεί η επίτευξη μιας κατάστασης στην οποία το σφάλμα είναι αρκετά

μικρό βάσει του κριτηρίου σύγκλισης. Η επιλογή του κριτηρίου σύγκλισης και της επιθυμητής ακρίβειας είναι ιδιαίτερα σημαντική και κρίσιμη για την επίτευξη ακριβούς και υπολογιστικά οικονομικής λύσης.



Σχ. 3.5: Η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson.

Τα κριτήρια σύγκλισης αφορούν μετακινήσεις, παρασιτικές δυνάμεις ή ενέργειες. Για την επίλυση των υπό μελέτη προβλημάτων επιλέγεται κριτήριο σύγκλισης βασισμένο στις παρασιτικές δυνάμεις. Γενικά, τα κριτήρια αυτά θεωρούνται αξιόπιστα καθώς ελέγχουν το κατά πόσο ικανοποιείται η ισορροπία στο τρέχον βήμα επαύξησης του φορτίου. Το κριτήριο σύγκλισης εκφράζεται με τη μορφή κάποιας νόρμας, συνήθως της Ευκλείδειας και ορίζεται ως εξής:

$$\|f - p\| < \varepsilon \|f\| \quad (3.7)$$

όπου f και p είναι οι επιβεβλημένες και οι εσωτερικές δυνάμεις του συστήματος αντίστοιχα, $f - p$ είναι το διάνυσμα των παρασιτικών δυνάμεων και ε η επιθυμητή ακρίβεια, η οποία τίθεται ίση με μια τιμή της τάξης του 0.01 για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται.

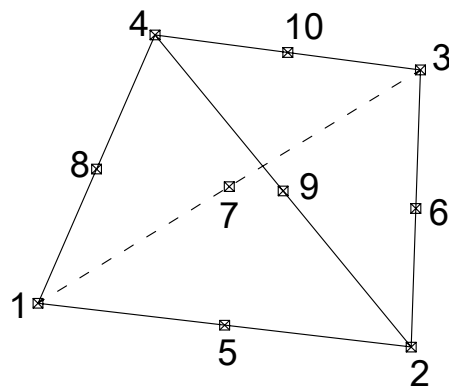
3.4 Τύποι χρησιμοποιούμενων Πεπερασμένων Στοιχείων

Καθώς η επίλυση των υπό μελέτη προβλημάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, η επιλογή των τύπων των Πεπερασμένων Στοιχείων (Π.Σ.) που χρησιμοποιούνται για τη μόρφωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων του κάθε προβλήματος παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο. Έτσι, η

παράγραφος αυτή αφιερώνεται στην περιγραφή όλων των τύπων Π.Σ. που χρησιμοποιούνται στη παρούσα διατριβή.

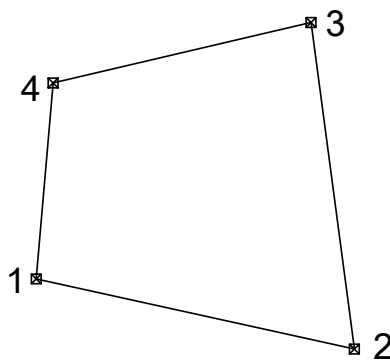
3.4.1 Π.Σ. αριθμητικών προσομοιωμάτων δοκιμής εξόλκευσης ινών από τσιμεντοειδή μήτρα

Το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής μορφώνεται με τη χρήση του Π.Σ. 127 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού μη-γραμμικής ανάλυσης MSC-MARC (MSC VolB 2010). Η διακριτοποίηση τόσο της τσιμεντοειδούς μήτρας, όσο και της χαλύβδινης ίνας πραγματοποιείται με τη χρήση του στοιχείου αυτού. Πρόκειται για ένα 2ης τάξης ισοπαραμετρικό τρισδιάστατο τετράεδρο τυχαίας γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Το στοιχείο αποτελείται από έξι ακμές που περιγράφονται από τους τέσσερις κόμβους, έναν σε κάθε κορυφή, ενώ διαθέτει έξι επιπλέον κόμβους, έναν στο μέσο κάθε ακμής. Κάθε κόμβος διαθέτει τρεις καθολικούς μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση στην x διεύθυνση), 2=v (μετατόπιση στην y διεύθυνση) και 3=w (μετατόπιση στην z διεύθυνση). Επίσης, το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί συναρτήσεις παρεμβολής δευτέρου βαθμού, διαθέτει τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης κατά Gauss και μπορεί να δεχθεί καταστατικές σχέσεις διαφόρων μορφών.



Σχ. 3.6: Σχηματική απεικόνιση του τρισδιάστατου πεπερασμένου στοιχείου 127 που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση της ίνας και της μήτρας.

Για το αντίστοιχο δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, η διακριτοποίηση τόσο της μήτρας, όσο και της ίνας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πεπερασμένου στοιχείου 11 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC. Πρόκειται για ένα τυχαίας γεωμετρίας τετράπλευρο ισοπαραμετρικό τετρακομβικό στοιχείο, που προορίζεται για εφαρμογές επίπεδης παραμόρφωσης. Οι τέσσερις κόμβοι του στοιχείου αριθμούνται κατά την αντι-ωρολογιακή φορά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Κάθε κόμβος διαθέτει δύο καθολικούς μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση στην x διεύθυνση) και 2=v (μετατόπιση στην y διεύθυνση). Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί γραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής, χωριστά ως προς x και y. Η δυσκαμψία του στοιχείου προκύπτει από την ολοκλήρωση κατά Gauss σε τέσσερα σημεία. Επίσης, σημειώνεται ότι υποστηρίζει μη-γραμμικούς νόμους υλικού.

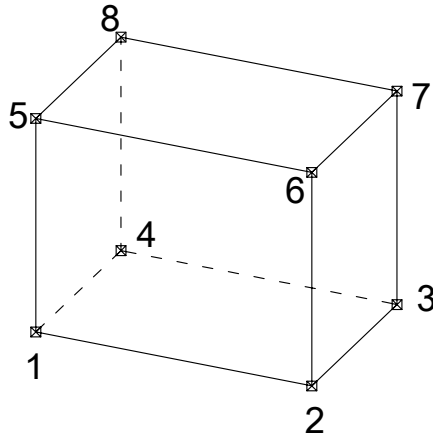


Σχ. 3.7: Σχηματική απεικόνιση του δισδιάστατου πεπερασμένου στοιχείου 11 που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση της ίνας και της μήτρας.

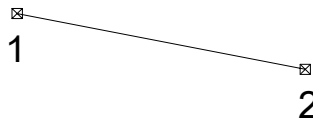
3.4.2 Π.Σ. αριθμητικών προσομοιωμάτων δοκιμών κάμψης δοκών

Για τη μόρφωση του τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος δοκού Ο/Σ χρησιμοποιούνται δύο τύποι πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιείται το στοιχείο 7 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC. Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο, ισοπαραμετρικό εξάεδρο τυχαίας γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Το στοιχείο διαθέτει οκτώ κόμβους, καθένας από τους οποίους έχει τρεις καθολικούς βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση στην x διεύθυνση), 2=v (μετατόπιση στην y διεύθυνση) και 3=w (μετατόπιση στην z διεύθυνση). Οι κόμβοι αριθμούνται κατά την αντι-ωρολογιακή φορά, ακολουθώντας αυστηρά τη διάταξη του Σχήματος 3.8. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί τριγωνικές συναρτήσεις παρεμβολής και διαθέτει οκτώ σημεία ολοκλήρωσης κατά Gauss για τον υπολογισμό του μητρώου δυσκαμψίας. Επιπλέον, το στοιχείο υποστηρίζει μη-γραμμικούς νόμους υλικού.

Η προσομοίωση του διαμήκου και εγκάρσιου οπλισμού της δοκού Ο/Σ πραγματοποιείται με τη χρήση τρισδιάστατων ραβδωτών δικομβικών στοιχείων δικτύωματος σταθερής διατομής (στοιχείο 9 της βιβλιοθήκης στοιχείων του MSC-MARC). Το στοιχείο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Κάθε κόμβος διαθέτει τρεις καθολικούς μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση στην x διεύθυνση), 2=v (μετατόπιση στην y διεύθυνση) και 3=w (μετατόπιση στην z διεύθυνση). Χρησιμοποιούνται γραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής κατά μήκος του στοιχείου. Το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου μορφώνεται με τη χρήση ενός σημείου ολοκλήρωσης. Επίσης, υποστηρίζει μη-γραμμικούς νόμους υλικού.



Σχ. 3.8: Σχηματική απεικόνιση του πεπερασμένου στοιχείου 7 που χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη προσομοίωση του σκυροδέματος της δοκού.

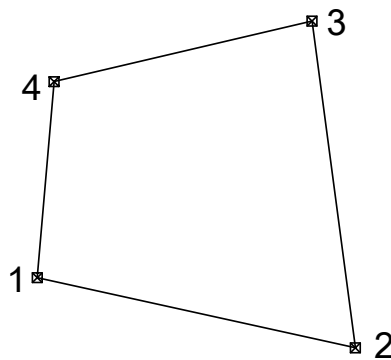


Σχ. 3.9: Σχηματική απεικόνιση του πεπερασμένου στοιχείου 9 που χρησιμοποιείται για τη δισδιάστατη προσομοίωση του σπλισμού της δοκού.

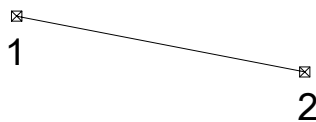
Για τη μόρφωση του αντίστοιχου δισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος της δοκού Ο/Σ χρησιμοποιούνται επίσης, δύο διαφορετικοί τύποι πεπερασμένων στοιχείων. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται δισδιάστατα ισοπαραμετρικά τετρακομβικά στοιχεία επίπεδης τάσης. Πρόκειται για το στοιχείο 3 της βιβλιοθήκης στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC που είναι ένα τυχαίας γεωμετρίας τετράπλευρο (Σχήμα 3.10), του οποίου κάθε κόμβος διαθέτει δύο καθολικούς μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας: $1=u$ (μετατόπιση στην x διεύθυνση) και $2=v$ (μετατόπιση στην y διεύθυνση). Οι κόμβοι του στοιχείου αριθμούνται κατά την αντι-ωρολογιακή φορά. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί γραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής, χωριστά ως προς x και y . Το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου προκύπτει από την ολοκλήρωση κατά Gauss σε τέσσερα σημεία. Επίσης, σημειώνεται ότι το στοιχείο υποστηρίζει μη-γραμμικούς νόμους υλικού.

Στα δισδιάστατα προσομοιώματα, τα Π.Σ. που προσομοιώνουν το διαμήκη και εγκάρσιο σπλισμό της δοκού είναι ευθύγραμμα, δικομβικά στοιχεία δοκού ορθογωνικής διατομής (στοιχείο 5 της βιβλιοθήκης στοιχείων του MSC-MARC). Το στοιχείο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11. Χρησιμοποιεί γραμμική παρεμβολή παράλληλα με το μήκος του και κυβική παρεμβολή στη διεύθυνση κάθετα στον άξονά του. Το μητρώο δυσκαμψίας μορφώνεται με ολοκλήρωση κατά Gauss σε τρία σημεία κατά μήκος του στοιχείου. Καθένας από τους κόμβους του στοιχείου διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας: $1=u$ (μετατόπιση στην x διεύθυνση), $2=v$ (μετατόπιση στην y διεύθυνση) και $3=$ στροφικός βαθμός ελευθερίας. Το στοιχείο υποστηρίζει μη-γραμμικούς νόμους υλικού.

Τέλος, σημειώνεται ότι το στοιχείο 3 χρησιμοποιείται σε όλα τα δισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκών για την προσομοίωση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Έτσι, εκτός από το σκυρόδεμα των δοκών Ο/Σ, χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Επίσης, χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των χαλύβδινων ινών που αντιμετωπίζονται ως ένα ομογενοποιημένο στρώμα υλικού, τόσο στις δοκούς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όσο και στις δοκούς Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Αντίστοιχα, το στοιχείο 5 χρησιμοποιείται σε όλα τα δισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα των υπό μελέτη δοκών για τη διακριτοποίηση του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού, καθώς και του δομικού πλέγματος με το οποίο οπλίζεται συγκεκριμένος τύπος μανδύα ενίσχυσης.



Σχ. 3.10: Σχηματική απεικόνιση του πεπερασμένου στοιχείου 3 που χρησιμοποιείται για τη δισδιάστατη προσομοίωση του σκυροδέματος της δοκού.

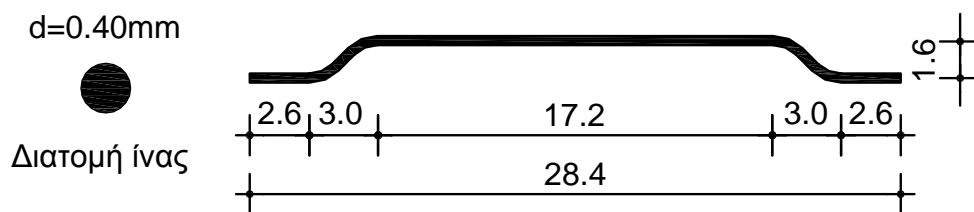


Σχ. 3.11: Σχηματική απεικόνιση του πεπερασμένου στοιχείου 5 που χρησιμοποιείται για τη δισδιάστατη προσομοίωση του οπλισμού της δοκού.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΜΗΤΡΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Κύριος στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής, που αποτελεί και ένα από τα βασικά αντικείμενα της διδακτορικής διατριβής. Σκοπός της αριθμητικής προσομοίωσης είναι η εκτίμηση της γενικότερης συμπεριφοράς του συγκεκριμένου τύπου ινών, καθώς αποτελούν βασική συνιστώσα του υπό μελέτη σύνθετου υλικού. Το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα αποτελείται από τσιμεντοειδή μήτρα με υψηλή θλιπτική αντοχή. Οι μέσες διαστάσεις των ινών από ανοξείδωτο χάλυβα που προστίθενται στο μίγμα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Οι ίνες έχουν αγκιστροειδή άκρα και κυκλική διατομή διαμέτρου 0.4 mm. Η χημική σύσταση των ινών είναι όμοια με την κλάση SS310 του ανοξείδωτου χάλυβα, που διακρίνεται από πολύ υψηλή παραμόρφωση θραύσης. Οι ίνες παράγονται μέσω ψυχρής έλασης και έχουν ονομαστική τάση διαρροής ίση με 1400 MPa.



Σχ. 4.1: Διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων χαλύβδινων ινών (σε mm).

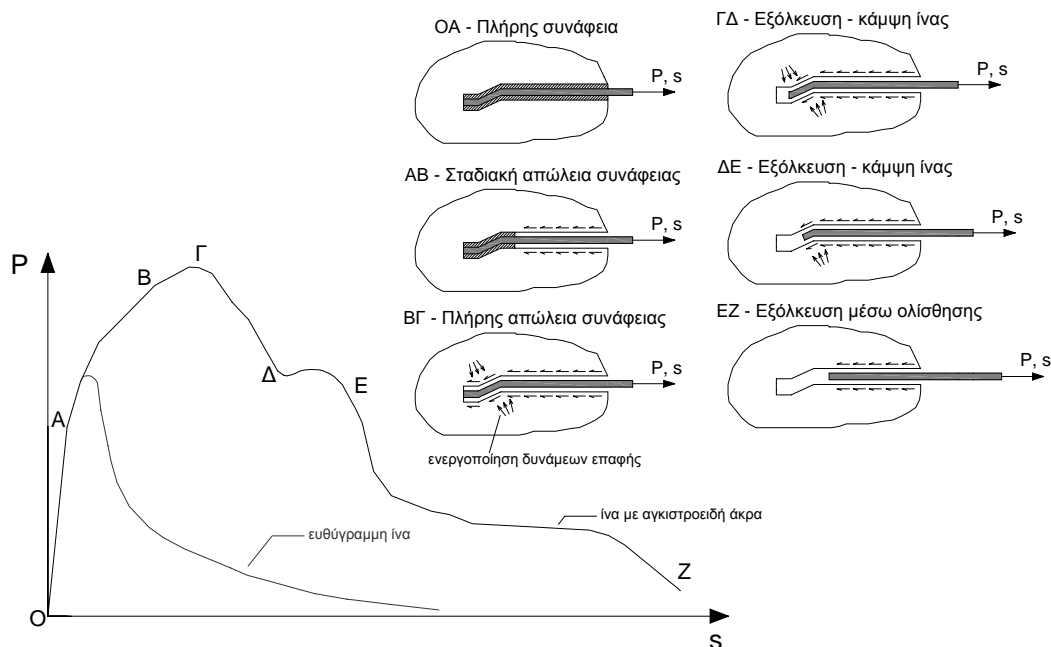
Η αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης των ινών από την τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Δημιουργείται ακριβές τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που λαμβάνει υπόψη τα μη-γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται στο φυσικό πρόβλημα. Λόγω της ανάγκης για την αποτίμηση της ορθότητας και αξιοπιστίας του αριθμητικού προσομοιώματος, πραγματοποιήθηκαν από τον Αναπληρωτή Καθηγητή Μ.Δ. Ζυγομαλά πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Georgiadi-Stefanidi et al. 2010). Τα πειράματα περιλάμβαναν δοκιμές εξόλκευσης των ινών με αγκιστροειδή άκρα από την τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής, καθώς και αντίστοιχες δοκιμές εξόλκευσης ευθύγραμμων χαλύβδινων ινών. Οι ευθύγραμμες ίνες των πειραματικών δοκιμών προήλθαν ουσιαστικά από τις αρχικές ίνες μετά από την αφαίρεση των αγκιστροειδών άκρων τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό παραμέτρων, απαραίτητων για τη δημιουργία όσο

αποκλειστικά στο συνδυασμό των διεπιφανειακών τάσεων λόγω συνάφειας και τριβής που αναπτύσσονται παράλληλα στον άξονα της ίνας και η διάκριση των δύο αυτών διαφορετικών συνιστωσών είναι πολύ δύσκολη κατά τη διαδικασία της αριθμητικής προσομοίωσης της δοκιμής.

4.1.2 Εξόλκευση ινών με αγκιστροειδή άκρα

Η συμπεριφορά μιας ίνας με αγκιστροειδή άκρα κατά την εξόλκευσή της από τσιμεντοειδή μήτρα διέπεται, όπως και στην περίπτωση της ευθύγραμμης ίνας, από τις τάσεις συνάφειας και τριβής που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας. Ο κυρίαρχος όμως μηχανισμός που επηρεάζει την απόκριση της ίνας με αγκιστροειδή άκρα είναι η μηχανική εμπλοκή του αγκιστροειδούς άκρου και η πλαστικοποίησή του κατά τη διάρκεια της εξόλκευσης (Cuhna et al. 2007). Επιπρόσθετα, λόγω αυτής της μηχανικής εμπλοκής, αναπτύσσονται δυνάμεις κάθετες στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας (δυνάμεις άντυγος) με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός επιπλέον μηχανισμού τριβής στις επιφάνειες επαφής. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια λόγω της μηχανικής εμπλοκής του αγκιστροειδούς άκρου είναι διαφορετικής φύσης και προέλευσης από τις τάσεις τριβής που εμφανίζονται στην περίπτωση της εξόλκευσης ευθύγραμμης ίνας και επομένως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά κατά την ανάλυση της δοκιμής εξόλκευσης.

Στο Σχήμα 4.3 (Cuhna et al. 2007) παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη δύναμης-ολίσθησης που προκύπτει από τη δοκιμή εξόλκευσης μιας ίνας με αγκιστροειδή άκρα από τσιμεντοειδή μήτρα, μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη μιας ευθύγραμμης ίνας για λόγους σύγκρισης. Επίσης, απεικονίζονται σχηματικά τα χαρακτηριστικά στάδια της δοκιμής εξόλκευσης.



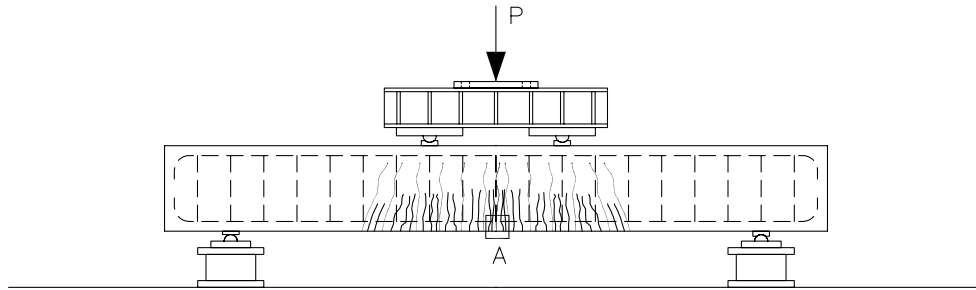
Σχ. 4.3: Τυπική καμπύλη δύναμης-ολίσθησης ίνας με αγκιστροειδή άκρα και σχηματική απεικόνιση των φάσεων εξόλκευσης.

Αρχικά, όπως και στην περίπτωση της ευθύγραμμης ίνας, επικρατούν συνθήκες πλήρους συνάφειας μεταξύ ίνας και μήτρας και η απόκριση του συστήματος είναι ελαστική, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στο γραμμικό κλάδο (ΟΑ) της καμπύλης. Ακολουθεί ο κλάδος (ΑΒ) που αντιστοιχεί στη σταδιακή απώλεια της συνάφειας και καταλήγει στην πλήρη απώλεια της συνάφειας που συμβαίνει στο σημείο Β. Σε αντίθεση με την καμπύλη της ευθύγραμμης ίνας, το διάγραμμα της αγκιστροειδούς ίνας περιλαμβάνει έναν επιπλέον αύξοντα κλάδο (ΒΓ) που οφείλεται στην ενεργοποίηση της μηχανικής αγκύρωσης που προσφέρει το κεκαμμένο άκρο της ίνας. Στη συνέχεια, καθώς η ίνα αρχίζει να ολισθαίνει αναγκάζοντας το αγκιστροειδές άκρο σε σταδιακή παραμόρφωση και πλαστικοποίηση, χάνεται το διπλά κεκαμμένο σχήμα της ίνας και η δύναμη εξόλκευσης αρχίζει να μειώνεται (ΓΔ). Ακολουθεί μία ακόμη αύξηση της δύναμης εξόλκευσης (ΔΕ) καθώς το εναπομένον κεκαμμένο άκρο της ίνας περνά από την τελευταία γωνία του αποτυπώματος της ίνας μέσα στη μήτρα. Τελικά, η ίνα παίρνει ευθύγραμμο σχήμα και ολισθαίνει υπό την επίδραση μόνο τάσεων τριβής, μέχρι την πλήρη εξόλκευσή της (ΕΖ), αντίστοιχα με μία ευθύγραμμη ίνα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των αγκιστροειδών ινών το κεκαμμένο άκρο συνήθως δεν παίρνει απόλυτα ευθύγραμμο σχήμα καθώς εξολκεύεται. Επίσης, η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης που είναι αποθηκευμένη στην ίνα, την πιέζει στα τοιχώματα της μήτρας, με αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων τριβής και την εμφάνιση υψηλότερων παραμενουσών δυνάμεων κατά το τελικό στάδιο της εξόλκευσης.

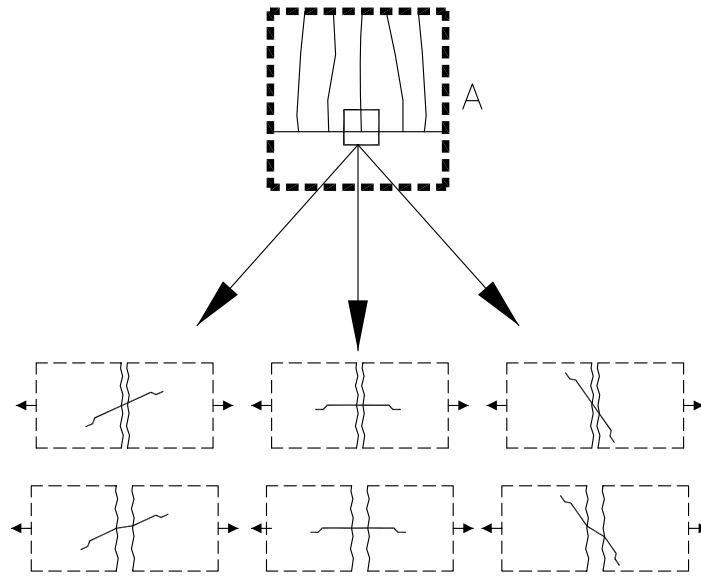
4.1.3 Εξόλκευση ινών με γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης

Ας θεωρηθεί η δοκός του Σχήματος 4.4 από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, που υποβάλλεται σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η δοκός αυτή εμφανίζει κατά την κάμψη πολλές μικρού εύρους και μήκους ρωγμές στην εφελκόμενη περιοχή, κάποιες από τις οποίες θα αναπτυχθούν και θα διευρυνθούν με την αύξηση του φορτίου. Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει σε μεγέθυνση τμήμα της κατώτερης περιοχής της δοκού όπου αναπτύσσονται οι εφελκυστικές τάσεις (περιοχή 'Α'). Μετά την εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής της μήτρας εμφανίζονται οι πρώτες ρωγμές. Σε αυτό το σημείο ξεκινά η ανακατανομή των τάσεων, καθώς οι δυνάμεις που αναλάμβανε η μήτρα μέσω της εφελκυστικής της αντοχής μεταφέρονται πλέον στις χαλύβδινες ίνες. Παρόλο που οι ίνες είναι τυχαία διανεμημένες στο μίγμα και έχουν τυχαίο προσανατολισμό, έχει παρατηρηθεί ότι κοντά στις ακραίες επιφάνειες ενός δομικού μέλους εμφανίζονται φαινόμενα κατευθυντικότητας. Τα φαινόμενα αυτά μαζί με τη διαδικασία της δόνησης κατά τη σκυροδέτηση, οδηγούν τις ίνες σε προσανατολισμό περίπου οριζόντιο κοντά στις εξωτερικές επιφάνειες του μέλους (Dupont και Vandewalle 2005). Βέβαια, αυτά τα φαινόμενα κατευθυντικότητας εξαλείφουν τον τυχαίο προσανατολισμό των ινών μόνο κατά μία από τις τρεις χωρικές διαστάσεις. Οι ίνες παραμένουν τυχαία προσανατολισμένες σε ένα επίπεδο παράλληλο με την αντίστοιχη επιφάνεια του δομικού μέλους. Η συμπεριφορά κατά την εξόλκευση των ινών που είναι προσανατολισμένες κάθετα ή περίπου κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής κυριαρχείται από τη συνάφεια στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας, τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες

επαφής και από τη μηχανική συνεισφορά του αγκιστροειδούς άκρου που κάμπτεται και πλαστικοποιείται καθώς η ίνα ολισθαίνει. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν ήδη περιγραφεί στις προηγούμενες υποπαραγράφους και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6α.



Σχ. 4.4: Απόκριση δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, σε κάμψη.

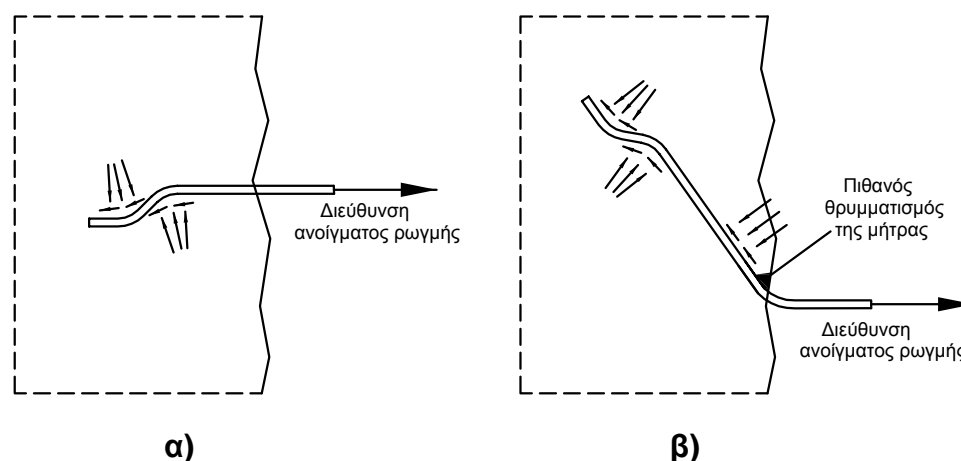


Σχ. 4.5: Μεγέθυνση της ρηγματωμένης περιοχής 'Α' της δοκού του Σχήματος 4.4.

Αντίθετα, οι ίνες που εξολκεύονται με κάποια γωνία σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής παρουσιάζουν μια πιο σύνθετη συμπεριφορά λόγω των πρόσθετων δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται, της κάμψης και πλαστικοποίησης της ίνας κοντά στο σημείο εξόδου της από τη μήτρα και τέλος, λόγω του πιθανού θρυμματισμού της τσιμεντοειδούς μήτρας στο ίδιο σημείο. Οι μηχανισμοί αυτοί απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6β. Εφόσον οι μηχανισμοί που εμφανίζονται κατά την εξόλκευση μιας μεμονωμένης ίνας επηρεάζονται από τη γωνία προσανατολισμού της σε σχέση με την επιφάνεια ρηγμάτωσης, ίνες με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού αναμένεται να παρουσιάσουν διαφορετική συμπεριφορά.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι είναι απαραίτητο στην αριθμητική προσομοίωση να ληφθούν υπόψη όλοι οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται και επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας μεμονωμένης ίνας κατά την εξόλκευσή της από τσιμεντοειδή μήτρα, όπως:

- οι τάσεις συνάφειας στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας στα αρχικά στάδια της φόρτισης,
- οι συνθήκες επαφής μεταξύ ίνας και μήτρας,
- οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες επαφής,
- η πλαστικοποίηση της χαλύβδινης ίνας,
- η πλαστικοποίηση και η πιθανότητα θραύσης της τσιμεντοειδούς μήτρας στις θλιβόμενες περιοχές και η ρηγμάτωση στις εφελκόμενες περιοχές.



Σχ. 4.6: Μηχανισμοί που διέπουν τη συμπεριφορά ινών με αγκιστροειδή άκρα που εξολκεύονται α) κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής και β) με γωνία προσανατολισμού σε σχέση με το επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής.

4.2 Πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται οι πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης χαλύβδινων ευθύγραμμων ινών και ινών με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Καθένα από τα δοκίμια αποτελείται από δύο κυλινδρικούς όγκους τσιμεντοειδούς μήτρας μέσα στους οποίους τοποθετήθηκε συμμετρικά μια μεμονωμένη χαλύβδινη ίνα. Κάθε κύλινδρος είχε διάμετρο 25 mm και μήκος 50 mm. Στη συνέχεια, οι κύλινδροι συνδέθηκαν με τις αρπάγες συσκευής για την εφαρμογή εφελκυστικών δυνάμεων, έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές εξόλκευσης (Σχήμα 4.7).

Κατά την προετοιμασία των δοκιμών προέκυψαν κάποια προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν, τα οποία κυρίως ήταν τα παρακάτω:

- Η σύνθεση της τσιμεντοειδούς μήτρας έπρεπε να είναι σταθερή, έτσι ώστε η ποιότητα και η αντοχή του υλικού να είναι όμοια για όλα τα δοκίμια για να υπάρξουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.
- Η χαλύβδινη ίνα θα έπρεπε να είναι τέλεια τοποθετημένη και ευθυγραμμισμένη κατά τη σκυροδέτηση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Επίσης, ο χειρισμός των

δοκιμίων κατά τη διάρκεια της συντήρησής τους απαιτούσε ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να αποφευχθούν ακόμα και οι ελάχιστες σχετικές μετατοπίσεις του ενός τμήματος της τσιμεντοειδούς μήτρας σε σχέση με το δεύτερο.

- Η ευθυγράμμιση των δύο τμημάτων της τσιμεντοειδούς μήτρας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και η εφαρμογή της δύναμης στον άξονα συμμετρίας ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή μόνο αξονικής δύναμης στο σύστημα μήτρας-ίνας.
- Τέλος, η συσκευή μέτρησης έπρεπε να είναι ακριβής στη μέτρηση μικρών φορτίων, ενώ ταυτόχρονα τα αισθητήρια μέτρησης δύναμης και μετατόπισης έπρεπε να προστατεύονται από τη σχεδόν ακαριαία μετακίνηση κατά τη στιγμή της εξόλκευσης.

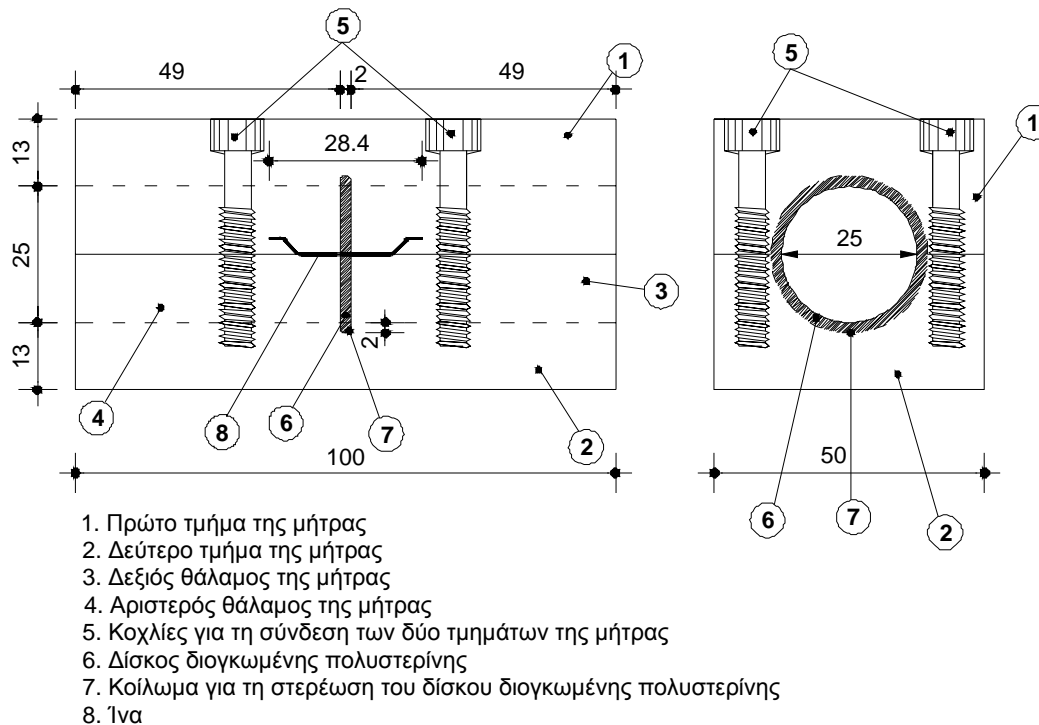


Σχ. 4.7: Η πειραματική διάταξη των δοκιμών εξόλκευσης.

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος της ευθυγράμμισης της ίνας και της σκυροδέτησης της τσιμεντοειδούς μήτρας κατασκευάστηκε μια κατάλληλη διαφανής μήτρα με τη δυνατότητα να χωρίζεται σε δύο διαφορετικά τμήματα (Σχήματα 4.8 και 4.9). Η μήτρα είχε κυλινδρικό σχήμα και μπορούσε να διαιρεθεί σε δύο ξεχωριστούς θαλάμους μέσω ενός δίσκου διογκωμένης πολυστερίνης πάχους 2 mm. Η διαδικασία δημιουργίας περιλάμβανε αρχικά τη σταθεροποίηση της ίνας στο δίσκο διογκωμένης πολυστερίνης με κατάλληλο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη συμμετρία στη γεωμετρία του δοκιμίου. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε ο δίσκος στο μέσο της μήτρας και ενώθηκαν τα δύο ανοιχτά τμήματά της. Ακολούθησε η έγχυση του τσιμεντοκονιάματος στον ένα θάλαμο της μήτρας. Μετά τη σκλήρυνση του πρώτου κυλίνδρου τσιμεντοκονιάματος πραγματοποιήθηκε ανατροπή της μήτρας και σκυροδέτηση του δεύτερου κυλίνδρου. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές μετά από 28 ημέρες συντήρησης. Επίσης, τα δοκίμια ελέγχθηκαν μέσω ακτίνων X για να επιβεβαιωθεί η ορθή τοποθέτηση της ίνας μέσα στους δύο κυλίνδρους τσιμεντοειδούς μήτρας. Τα δοκίμια στα οποία παρατηρήθηκε απόκλιση από την επιθυμητή θέση, απορρίφθηκαν.



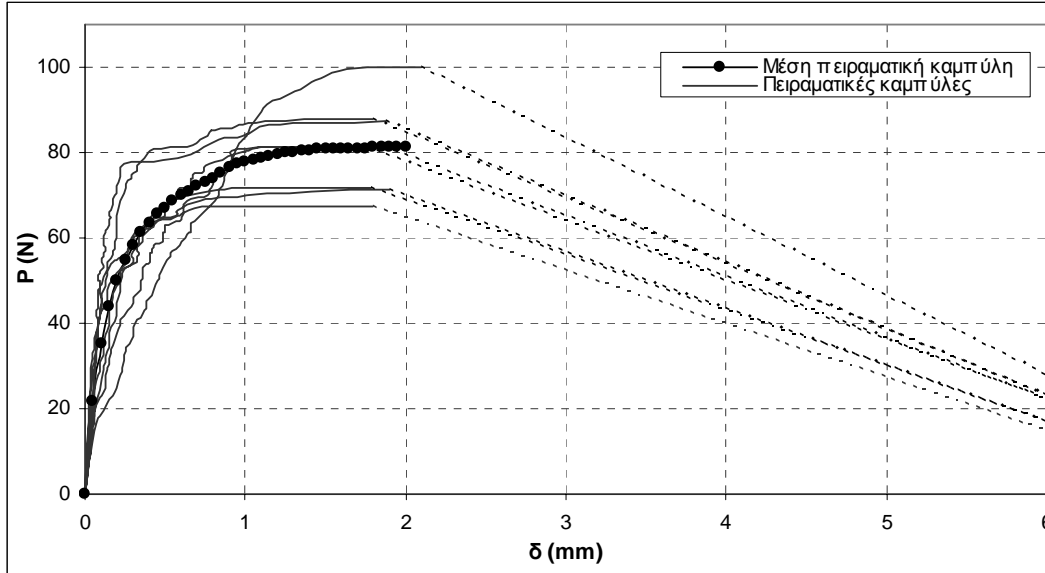
Σχ. 4.8: Τα δύο ανοικτά τμήματα της μήτρας κατασκευής του δοκιμίου.



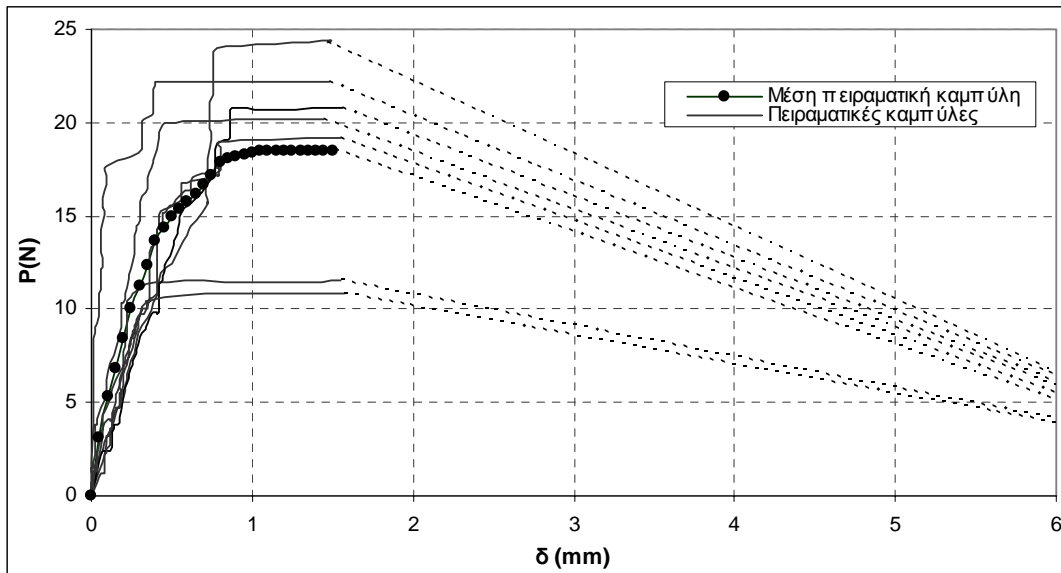
Σχ. 4.9: Σχηματική απεικόνιση της μήτρας κατασκευής του δοκιμίου (διαστάσεις σε mm).

Δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι δοκιμίων. Η πρώτη ομάδα δοκιμίων (Ομάδα Α) περιλάμβανε χαλύβδινες ίνες με αγκιστροειδή άκρα συμμετρικά τοποθετημένες στα δύο κυλινδρικά τμήματα της τσιμεντοειδούς μήτρας. Για τη δεύτερη ομάδα δοκιμίων (Ομάδα Β) αφαιρέθηκαν τα αγκιστροειδή άκρα της ίνας και το εναπομένον ευθύγραμμο τμήμα της τοποθετήθηκε συμμετρικά στα δύο τμήματα της τσιμεντοειδούς μήτρας. Η κάθε ομάδα περιλάμβανε οκτώ δοκίμια και επομένως, πραγματοποιήθηκαν δεκαέξι συνολικά δοκιμές εξόλκευσης. Τα Σχήματα 4.10 και 4.11 παρουσιάζουν τις πειραματικές καμπύλες που

προέκυψαν από τις δοκιμές εξόλκευσης των δοκιμίων της Ομάδας Α και Ομάδας Β αντίστοιχα, μαζί με τις αντίστοιχες μέσες καμπύλες. Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης ακολουθήθηκε διαδικασία επιβαλλόμενης φόρτισης και όχι επιβαλλόμενης μετατόπισης. Επομένως, οι πειραματικές καμπύλες που προέκυψαν δεν είναι σε θέση να περιγράψουν το φθίνοντα κλάδο που αναμένεται να ακολουθήσει τη μέγιστη δύναμη εξόλκευσης. Ο κλάδος αυτός αντιστοιχεί στη σταδιακή εξόλκευση της ίνας από την τσιμεντοειδή μήτρα.



Σχ. 4.10: Πειραματικές καμπύλες και μέση πειραματική καμπύλη της δοκιμής εξόλκευσης για τα δοκίμια της Ομάδας Α (ίνες με αγκιστροειδή άκρα).



Σχ. 4.11: Πειραματικές καμπύλες και μέση πειραματική καμπύλη της δοκιμής εξόλκευσης για τα δοκίμια της Ομάδας Β (ευθύγραμμες ίνες).

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές της δύναμης εξόλκευσης P που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών, καθώς και τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και το συντελεστή μεταβλητότητας για κάθε ομάδα δοκιμίων, όπως προέκυψαν μετά από τη

στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μικρότερος (13%) για τις ίνες με αγκιστροειδή άκρα και μεγαλύτερος (26%) για τις ευθύγραμμες ίνες. Παρόμοιες ή και μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων δοκιμών εξόλκευσης έχουν παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές (Gray 1983, Armelin και Bantia 1997, Robins et al. 2002). Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές της δύναμης εξόλκευσης των δοκιμών με τις ευθύγραμμες ίνες είναι σημαντικά χαμηλότερες από εκείνες των δοκιμών με τις ίνες με αγκιστροειδή άκρα.

Πίνακας 4.1

Μέγιστες τιμές της δύναμης εξόλκευσης P όπως μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ομάδα A (ίνες με αγκιστροειδή άκρα)	max P (N)	Ομάδα B (ευθύγραμμες ίνες)	max P (N)
A ₁	67.807	B ₁	11.495
A ₂	100.027	B ₂	24.396
A ₃	81.290	B ₃	22.168
A ₄	81.265	B ₄	20.800
A ₅	71.579	B ₅	20.142
A ₆	87.771	B ₆	19.155
A ₇	71.073	B ₇	18.623
A ₈	87.151	B ₈	10.837
Μέση τιμή	80.996	Μέση τιμή	18.452
Τυπική απόκλιση	10.738	Τυπική απόκλιση	4.846
Συντελεστής μεταβλητότητας	13%	Συντελεστής μεταβλητότητας	26%

4.3 Το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από τσιμεντοειδή μήτρα

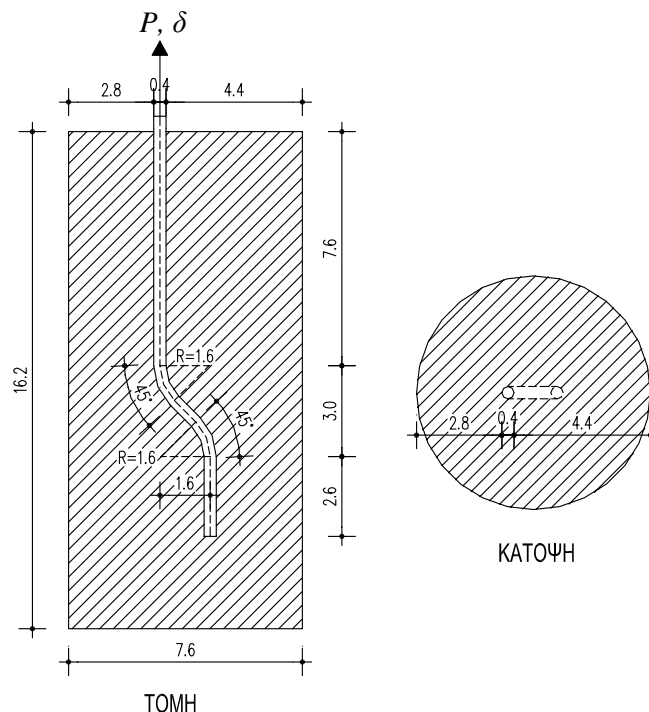
Αντικείμενο της παρούσας ενότητας είναι η περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος της δοκιμής εξόλκευσης μιας μεμονωμένης χαλύβδινης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής. Επίσης παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση.

Η γεωμετρία του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12. Λαμβάνονται υπόψη οι συμμετρίες του φυσικού προβλήματος έτσι ώστε να μειωθεί το μέγεθος του αριθμητικού προβλήματος, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας. Επομένως, μελετάται μόνο το ένα τέταρτο του αρχικού προσομοιώματος, στο οποίο τμήμα της χαλύβδινης ίνας (μισή ίνα κατά διάμετρο και κατά μήκος) βρίσκεται μέσα στην τσιμεντοειδή μήτρα. Θεωρείται ότι η ρωγμή αναπτύσσεται σε διεύθυνση κάθετη στον άξονα της ίνας, οπότε και το φορτίο εφαρμόζεται αξονικά στην ίνα. Για την τσιμεντοειδή μήτρα θεωρείται κυλινδρικός όγκος με διάμετρο αρκετά μεγάλη ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διάμετρος είναι ίση με 7.6 mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάμετρος αυτή λαμβάνεται μικρότερη από τη διάμετρο των κυλίνδρων της τσιμεντοειδούς μήτρας των πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης σε μια προσπάθεια μείωσης του μεγέθους του αριθμητικού

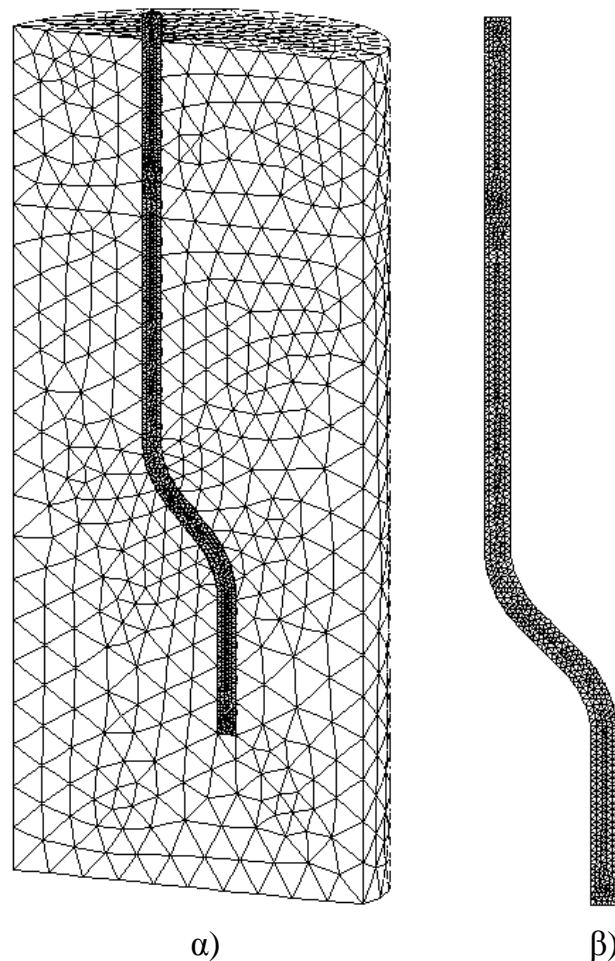
προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση, η μείωση αυτή της διαμέτρου δεν επηρεάζει τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας του προβλήματος θεωρήθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί ένα ρεαλιστικό τρισδιάστατο προσομοίωμα που να λαμβάνει υπόψη όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται και αλληλεπιδρούν κατά την εξόλκευση της ίνας, όπως η συνάφεια στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας και η σταδιακή απώλεια αυτής, οι συνθήκες επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων και οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες επαφής, η πλαστικοποίηση της χαλύβδινης ίνας και η πλαστικοποίηση της μήτρας σε θλίψη και η ρηγμάτωσή της σε εφελκυσμό. Έτσι, μορφώθηκε ένα αριθμητικό προσομοίωμα με τη βοήθεια τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

Το προσομοίωμα μορφώνεται θεωρώντας δύο παραμορφώσιμα σώματα. Το πρώτο αντιπροσωπεύει την τσιμεντοειδή μήτρα και το δεύτερο τη χαλύβδινη ίνα. Η διακριτοποίηση της μήτρας και της ίνας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πεπερασμένου στοιχείου 127 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.6, §3.4.1). Η τσιμεντοειδής μήτρα προσομοιώνεται μέσω 10546 δέκα-κομβικών τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13α. Η χαλύβδινη ίνα προσομοιώνεται μέσω 9894 όμοιων πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 4.13β). Η πυκνή διακριτοποίηση της ίνας κρίθηκε απαραίτητη, τόσο για την απόδοση της γεωμετρίας της, όσο και για την ακριβέστερη δυνατή προσομοίωση της καμπτικής της συμπεριφοράς που κυριαρχεί κατά την εξόλκευση. Συνολικά το προσομοίωμα περιλαμβάνει 34360 κόμβους. Όλοι οι κόμβοι της κατώτερης επιφάνειας του όγκου της μήτρας θεωρούνται παγιωμένοι.



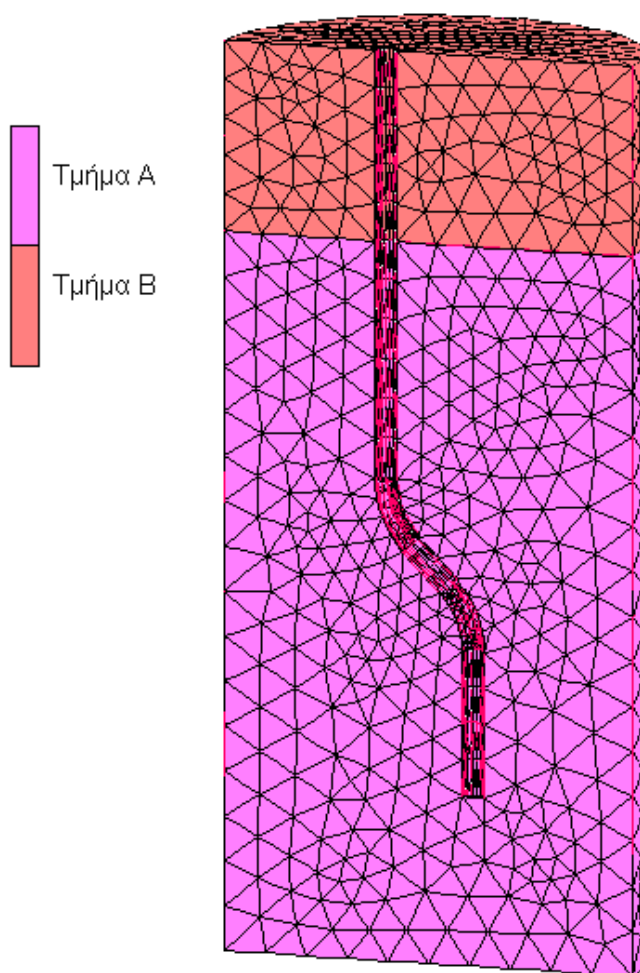
Σχ. 4.12: Η γεωμετρία του θεωρούμενου προβλήματος της δοκιμής εξόλκευσης (διαστάσεις σε mm).



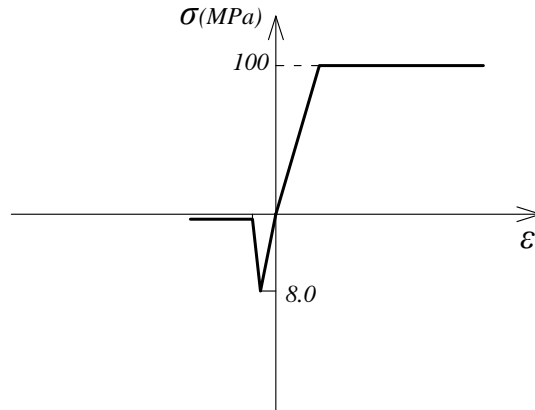
Σχ. 4.13: α) Το τρισδιάστατο προσομοίωμα του θεωρούμενου προβλήματος μετά τη διακριτοποίηση και β) λεπτομέρεια της διακριτοποιημένης ίνας.

Η θλιπτική αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας είναι ίση με 100 MPa και η εφελκυστική αντοχή ίση με 8 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται ίσο με 35.5 GPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.2. Η συμπεριφορά της μήτρας σε θλίψη θεωρείται ελαστοπλαστική ενώ σε εφελκυσμό θεωρείται ότι ρηγματώνεται μετά την εξάντληση της εφελκυστικής της αντοχής. Η απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της μήτρας μετά τη ρηγμάτωση λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός φθίνοντα κλάδου με κλίση $k_s = 10$ GPa. Σχετικά με τη συμπεριφορά της μήτρας σε θλίψη, θεωρούνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με τις συνθήκες περίσφιξης που επικρατούν (Paranikolaou και Karros 2007), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Στο μεγαλύτερο όγκο της μήτρας που περιβάλλει το κεκαμμένο άκρο της ίνας (Σχήμα 4.14 – Τμήμα Α), η ανελαστική της συμπεριφορά περιορίζεται σε μια περιοχή πολύ κοντά στην ίνα και οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σωμάτων κατά την εξόλκευση. Αυτή η περιοχή θεωρείται περισφιγμένη από τον υπόλοιπο όγκο της τσιμεντοειδούς μήτρας και επομένως, για το συγκεκριμένο όγκο τσιμεντοκονιάματος υιοθετείται η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 4.15. Αντίθετα, στο ανώτερο τμήμα της μήτρας που περικλείει αποκλειστικά ένα ευθύγραμμο τμήμα της ίνας (Σχήμα

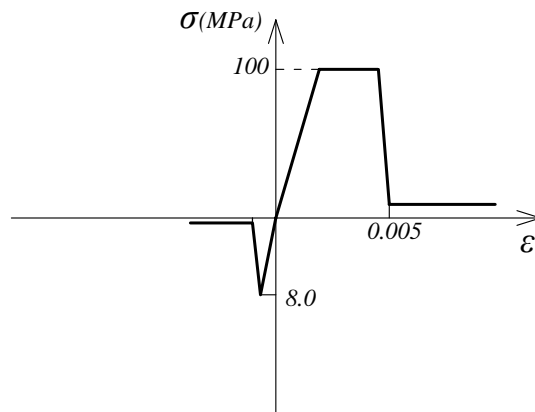
4.14 – Τμήμα Β), η οποιαδήποτε βλάβη αναμένεται να συμβεί κοντά στο σημείο εξόδου της ίνας από τη μήτρα. Στην περίπτωση αυτή η τσιμεντοειδής μήτρα θεωρείται μη-περισφιγμένη και για το συγκεκριμένο όγκο της μήτρας υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 4.16. Η θλιπτική αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας θεωρείται ότι σχεδόν μηδενίζεται για τιμές της παραμόρφωσης μεγαλύτερες από 0.005. Σημειώνεται ότι, καθώς στο συγκεκριμένο πρόβλημα που μελετάται η ίνα εξολκεύεται κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής, δεν αναμένεται αστοχία σε θλίψη της τσιμεντοειδούς μήτρας στην περιοχή εξόδου της ίνας από αυτή. Αντίθετα, θα ακολουθήσουν σε επόμενη παράγραφο προσομοιώματα λοξής εξόλκευσης των ινών. Στα προσομοιώματα αυτά, στην περιοχή εξόδου της ίνας από τη μήτρα, αναμένεται η ανάπτυξη ζωνών ισχυρής σύνθλιψης. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη με μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά της μήτρας στις περιοχές αυτές θα χρησιμοποιηθεί ο καταστατικός νόμος του μη περισφιγμένου υλικού. Έτσι, αποφασίστηκε η διάκριση μεταξύ περισφιγμένης και μη-περισφιγμένης μήτρας να υιοθετηθεί και στο παρόν αριθμητικό προσομοίωμα για να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία μεταξύ των προσομοιωμάτων του Κεφαλαίου αυτού.



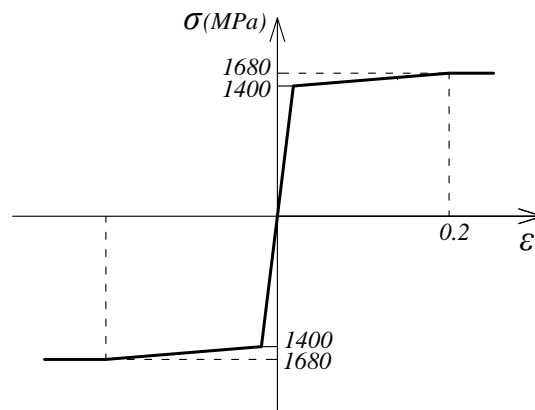
Σχ. 4.14: Σχηματική απεικόνιση της διάκρισης της τσιμεντοειδούς μήτρας σε περισφιγμένη (Τμήμα Α) και μη-περισφιγμένη (Τμήμα Β).



Σχ. 4.15: Η θεωρούμενη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων της περισφιγμένης τσιμεντοειδούς μήτρας.



Σχ. 4.16: Η θεωρούμενη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων της μη-περισφιγμένης τσιμεντοειδούς μήτρας.



Σχ. 4.17: Η θεωρούμενη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων της χαλύβδινης ίνας.

Για τη χαλύβδινη ίνα θεωρείται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με τάση διαρροής ίση με 1400 MPa. Ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που υιοθετείται για την ίνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17. Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται ίσο με 210 GPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.3.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής εξόλκευσης αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας αρχικά διατμητικές τάσεις συνάφειας και στη συνέχεια δυνάμεις τριβής, όπως έχει ήδη περιγραφεί στις υποπαραγράφους 4.1.1 και 4.1.2. Οι δύο αυτοί, διαφορετικής φύσης, μηχανισμοί λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά κατά την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος της εξόλκευσης. Στις ίδιες υποπαραγράφους έχουν επίσης περιγραφεί οι δύο διαφορετικοί τύποι τριβής που αναπτύσσονται κατά την εξόλκευση. Ο κύριος τύπος τριβής εμφανίζεται ως συνέπεια της ανάπτυξης δυνάμεων επαφής (κάθετων στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας). Με τη σειρά τους, οι δυνάμεις αυτές οφείλονται στη μηχανική εμπλοκή του αγκιστροειδούς άκρου της ίνας. Αντίθετα, ο δευτερεύων τύπος τριβής οφείλεται στην τραχύτητα των επιφανειών των δύο υλικών, σε επίπεδο μικροκλίμακας. Λόγω της διαφορετικής φύσης τους, οι δύο αυτοί μηχανισμοί τριβής λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά κατά την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος της εξόλκευσης.

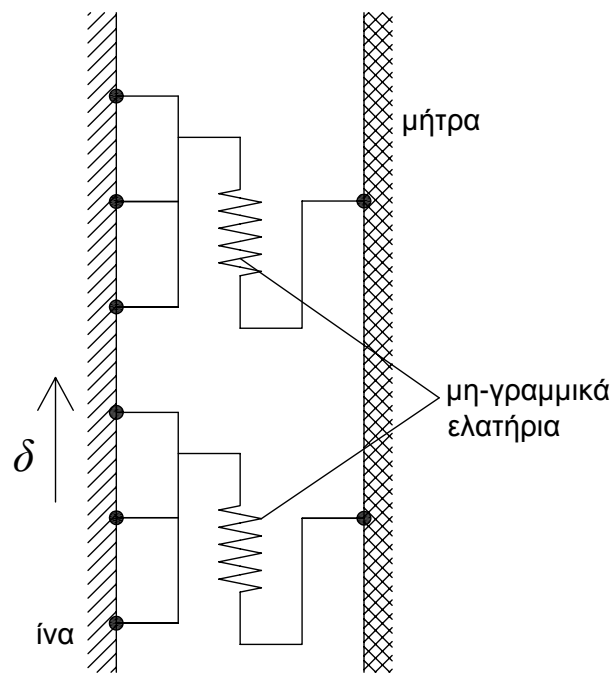
Ο μηχανισμός της συνάφειας μαζί με το δευτερεύοντα τύπο τριβής που αναπτύσσεται κατά τη σταδιακή απώλεια της συνάφειας, λαμβάνεται υπόψη στο αριθμητικό προσομοίωμα με την εισαγωγή στοιχείων διεπιφάνειας. Τα στοιχεία αυτά είναι ουσιαστικά μη-γραμμικά ελατήρια, που διατάσσονται εφαπτομενικά στη διεπιφάνεια (παράλληλα με τον άξονα της ίνας). Ο πρώτος κόμβος του ελατηρίου συνδέεται με έναν κόμβο της ίνας και ο δεύτερος με τον πλησιέστερο κόμβο της μήτρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18.

Η μη-γραμμική συμπεριφορά των στοιχείων διεπιφάνειας εκτιμάται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης ευθύγραμμων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα και συγκεκριμένα με βάση τη μέση πειραματική καμπύλη του Σχήματος 4.11, θεωρώντας ότι οι εφαπτομενικές διεπιφανειακές τάσεις είναι ομοιόμορφα κατανομημένες κατά μήκος της ίνας. Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η μέση πειραματική καμπύλη των δοκιμών εξόλκευσης σε όρους σχετικής μετακίνησης και διεπιφανειακής εφαπτομενικής τάσης. Υπενθυμίζεται ότι η διεπιφανειακή εφαπτομενική τάση περιλαμβάνει δύο συνιστώσες: την τάση συνάφειας και την τάση τριβής που οφείλεται στην τραχύτητα των επιφανειών. Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος δίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις d στη διεπιφάνεια, όπως ακριβώς καταγράφηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης των ευθύγραμμων ινών, από τις οποίες προέκυψε η μέση πειραματική καμπύλη. Στον κατακόρυφο άξονα δίνονται οι τιμές της τάσης τ που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την αναγωγή της δύναμης εξόλκευσης P της μέσης πειραματικής καμπύλης για τις ευθύγραμμες ίνες, σε εφαπτομενική τάση. Για την αναγωγή αυτή, η διεπιφανειακή εφαπτομενική τάση θεωρείται ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια της ευθύγραμμης ίνας και υπολογίζεται από τη σχέση:

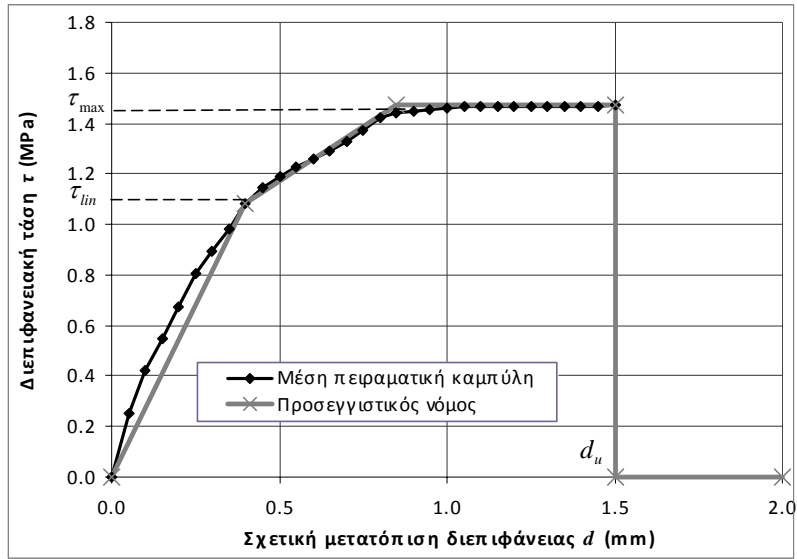
$$\tau = P/2\pi rl, \quad (4.1)$$

όπου $r = 0.2 \text{ mm}$ η ακτίνα της ίνας και $l = 10 \text{ mm}$ το μήκος της ευθύγραμμης ίνας. Έτσι προκύπτει η μέση πειραματική καμπύλη του Σχήματος 4.19, η οποία στη συνέχεια προσεγγίζεται από ένα τρι-γραμμικό διάγραμμα, που περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές τιμές τ_{lin} , τ_{max} και d_u . Η συμπεριφορά του ελατηρίου αρχικά θεωρείται γραμμική μέχρι τη διεπιφανειακή εφαπτομενική τάση τ_{lin} . Για τιμές της τάσης $\tau > \tau_{lin}$,

παρατηρείται μια σημαντική μείωση της δυσκαμψίας μέχρι την τιμή τ_{\max} . Για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών της σχετικής μετατόπισης η τιμή αυτή της διεπιφανειακής επαπτομενικής τάσης παραμένει σταθερή, μέχρι η σχετική μετατόπιση να φτάσει τη χαρακτηριστική τιμή d_u , που αντιστοιχεί στην πλήρη απώλεια της συνάφειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τα πειράματα ακολουθήθηκε η διαδικασία επιβαλλόμενης φόρτισης, με αποτέλεσμα την αδυναμία καταγραφής του φθίνοντα κλάδου που προκύπτει κατά την ολίσθηση της ίνας μετά την πλήρη απώλεια της συνάφειας. Για το λόγο αυτό, προστίθεται ένας κατακόρυφος κλάδος στην καμπύλη που προσεγγίζει τη μέση πειραματική. Ο κλάδος αυτός αντιστοιχεί στο μηδενισμό της διεπιφανειακής επαπτομενικής τάσης για σχετική μετατόπιση μεγαλύτερη της d_u , έτσι ώστε να ολοκληρωθεί ο νόμος που διέπει τη συμπεριφορά των στοιχείων διεπιφάνειας. Με αυτή τη διαδικασία βέβαια, δε λαμβάνεται υπόψη η παραμένουσα τάση τριβής (δευτερεύουσα) που οφείλεται στην τραχύτητα των επιφανειών, η συνεισφορά της οποίας, στην περίπτωση των λείων και ανοξειδωτων χαλύβδινων ιών μικρής διαμέτρου είναι μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σχέση με τη συνεισφορά των υπόλοιπων μηχανισμών που διέπουν την εξόλκευση της ίνας με αγκιστροειδή άκρα, όπως ο κύριος μηχανισμός τριβής που εμφανίζεται λόγω της μηχανικής εμπλοκής μεταξύ της ίνας και της μήτρας και η πλαστικοποίηση λόγω κάμψης του αγκιστροειδούς άκρου της ίνας (Naaman και Najm 1991). Μετά από την πλήρη απώλεια της συνάφειας μεταξύ ίνας και μήτρας, η ανάπτυξη οποιασδήποτε δύναμης τριβής που οφείλεται σε δράση δυνάμεων κάθετων στη διεπιφάνεια λαμβάνεται υπόψη με τον ίδιο τρόπο που λαμβάνονται υπόψη οι δυνάμεις τριβής που εμφανίζονται λόγω της μηχανικής εμπλοκής μεταξύ της ίνας και της μήτρας, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχ. 4.18: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των στοιχείων διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας.



Σχ. 4.19: Τρι-γραμμικό διάγραμμα προσέγγισης της μέσης πειραματικής καμπύλης εξόλκευσης ευθύγραμμων ινών από τσιμεντοειδή μήτρα.

Ο κύριος μηχανισμός τριβής που εμφανίζεται λόγω της μηχανικής εμπλοκής μεταξύ της ίνας και της μήτρας λαμβάνεται υπόψη με τη θεώρηση συνθηκών μονόπλευρης επαφής και τριβής στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων. Για την υλοποίηση της θεώρησης αυτής, η ίνα και η μήτρα ορίζονται ως δύο διαφορετικά παραμορφώσιμα σώματα. Σε κάθε βήμα της ανάλυσης εκτελείται έλεγχος για το εάν τα δύο ανεξάρτητα σώματα βρίσκονται σε επαφή. Πιο συγκεκριμένα, εάν κάποιος κόμβος του πρώτου σώματος έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε σημείο του δεύτερου σώματος, αυτόματα περιορίζεται η δυνατότητα μετακίνησης του κόμβου αυτού στη διεύθυνση κάθετα στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων. Έτσι, αποφεύγεται η διείσδυση του ενός σώματος στο άλλο. Σημειώνεται ότι οι περιοχές όπου υπάρχει ή δεν υπάρχει επαφή μεταξύ των δύο σωμάτων δεν είναι γνωστές από την αρχή, αλλά υπολογίζονται με βάση την κατάσταση των τάσεων και παραμορφώσεων σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Αρχικά, θεωρείται ότι στο σύστημα δεν αναπτύσσονται δυνάμεις επαφής. Αυτές εμφανίζονται μετά το πρώτο βήμα της φόρτισης, ως αποτέλεσμα της μηχανικής εμπλοκής μεταξύ ίνας και μήτρας στην περιοχή των κεκαμμένων άκρων της ίνας. Όταν εμφανίζονται οι δυνάμεις επαφής ενεργοποιείται και ο μηχανισμός της τριβής. Για την τριβή λαμβάνεται υπόψη ένα απλοποιημένο μοντέλο Coulomb. Πρόκειται για το νόμο τριβής Coulomb του Σχήματος 4.20, που μπορεί να περιγραφεί από τις παρακάτω σχέσεις:

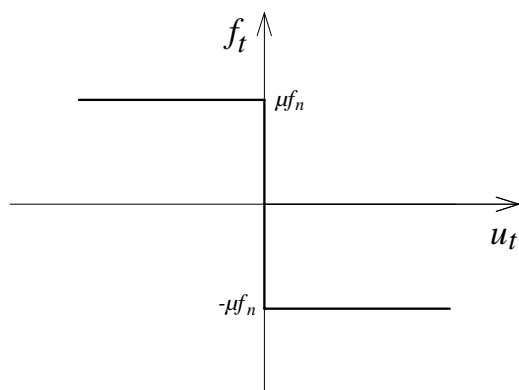
$$\text{Εάν } |f_t| < \mu f_n, u_t = 0 \quad (4.2)$$

$$\text{Εάν } f_t = -\mu f_n \cdot t, u_t > 0 \quad (4.3)$$

$$\text{Εάν } f_t = \mu f_n \cdot t, u_t < 0 \quad (4.4)$$

όπου f_t η εφαπτομενική δύναμη τριβής, f_n η κάθετη στην επιφάνεια επαφής δύναμη, μ ο συντελεστής τριβής, u_t η σχετική μετακίνηση κατά την ολίσθηση και t το εφαπτομενικό στη διεπιφάνεια διάνυσμα (παράλληλο στη διεύθυνση της σχετικής μετακίνησης). Η Σχέση (4.2) περιγράφει την κατάσταση μηδενικής σχετικής μετατόπισης (stick) και

δηλώνει ότι εάν η εφαπτομενική δύναμη τριβής δεν εξισωθεί με τη μέγιστη δύναμη τριβής (γινόμενο του συντελεστή τριβής και της αντίστοιχης ορθής δύναμης), δεν υπάρχει ολίσθηση στη διεπιφάνεια. Οι Σχέσεις (4.3) και (4.4) περιγράφουν την περίπτωση της επαφής με σχετική ολίσθηση (slip) υπό σταθερή δύναμη και δηλώνουν ότι όταν εξισωθεί η τιμή της εφαπτομενικής δύναμης τριβής με τη μέγιστη δύναμη τριβής, εμφανίζεται ολίσθηση (σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο σωμάτων), με φορά αντίθετη από εκείνη της εφαπτομενικής δύναμης τριβής.



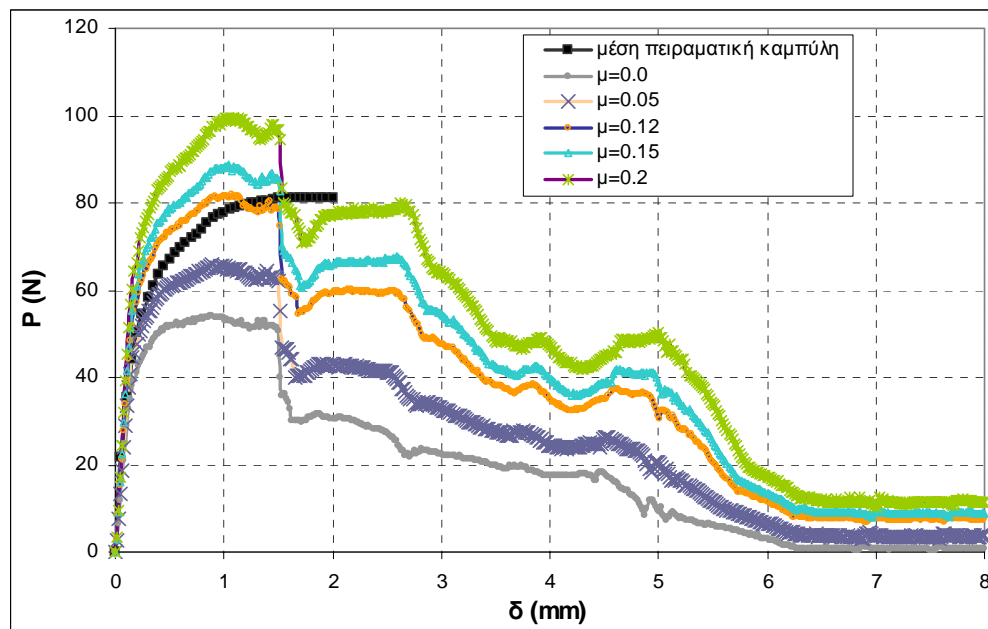
Σχ. 4.20: Νόμος τριβής Coulomb.

Η επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού μη-γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων MSC-MARC (MSC VolA 2010). Η φόρτιση εφαρμόζεται βήμα προς βήμα με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων δ στο άνω άκρο της χαλύβδινης ίνας και στη συνέχεια μετρώνται οι προκύπτουσες δυνάμεις P στα σημεία επιβολής της μετατόπισης. Επιβάλλεται συνολική μετατόπιση ίση με 8 mm με 400 ίσα βήματα φόρτισης.

Σχετικά με το συντελεστή τριβής μεταξύ της χαλύβδινης ίνας και της τσιμεντοειδούς μήτρας, πρέπει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία δίνονται τιμές για τη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος $\mu = 0.5 - 0.7$ (Rabbat και Russel 1985). Βέβαια, η περίπτωση που μελετάται διαφέρει σημαντικά, λόγω της απουσίας αδρανών από την τσιμεντοειδή μήτρα και της λείας επιφάνειας των χαλύβδινων ινών. Σε μελέτη των Cailleux et al. (2005) προσδιορίστηκε συντελεστής τριβής $\mu = 0.3$ μετά από τη σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων δοκιμών εξόλκευσης μιας ίνας που ήταν παρόμοια με τη μελετώμενη. Καθώς όμως η σύνθεση της τσιμεντοειδούς μήτρας στην παρούσα μελέτη είναι διαφορετική, αποφασίστηκε η διεξαγωγή μιας παραμετρικής ανάλυσης σε σχέση με το συντελεστή τριβής, θεωρώντας διαφορετικές τιμές μεταξύ $\mu = 0.0$ και $\mu = 0.2$. Μετά από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης με τη μέση πειραματική καμπύλη της δοκιμής εξόλκευσης ινών με αγκιστροειδή άκρα, θα προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής μ των δύο επιφανειών του συγκεκριμένου προβλήματος. Η περίπτωση του μηδενικού συντελεστή τριβής, αν και μη-ρεαλιστική, λήφθηκε υπόψη με σκοπό τη σύγκριση και τον προσδιορισμό των διαφορών στη γενική συμπεριφορά του συστήματος, που εμφανίζονται στην περίπτωση αυτή σε σχέση με τις περιπτώσεις του μη-μηδενικού συντελεστή τριβής. Έτσι, θα αναδειχθεί και η συνεισφορά

του συντελεστή τριβής στη συνολική συμπεριφορά μιας ίνας με αγκιστροειδή άκρα κατά την εξόλκευσή της από τσιμεντοειδή μήτρα.

Τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης ($P-\delta$) που προκύπτουν από τις παραμετρικές αναλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.21, μαζί με την αντίστοιχη μέση πειραματική καμπύλη. Παρατηρείται ότι η τιμή του συντελεστή τριβής $\mu=0.2$ αντιστοιχεί σε αποτελέσματα με μέγιστη τιμή της δύναμης πολύ κοντά στις υψηλότερες καταγεγραμμένες πειραματικές τιμές (Πίνακας 4.1). Από την άλλη, μέσω του μηδενικού συντελεστή τριβής παράγονται αποτελέσματα με μέγιστη τιμή της δύναμης σημαντικά χαμηλότερη από τις ελάχιστες καταγεγραμμένες πειραματικές τιμές, επιβεβαιώνοντας ότι η περίπτωση αυτή είναι μη ρεαλιστική. Ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή τριβής παράγουν ενδιάμεσες τιμές της μέγιστης δύναμης. Η μέση τιμή της μέγιστης δύναμης των πειραματικών καμπυλών είναι περίπου 81 N και προσεγγίζεται από την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί σε συντελεστή τριβής $\mu=0.12$. Η προκύπτουσα αυτή τιμή του συντελεστή τριβής είναι αρκετά μικρότερη από εκείνες που δίνονται στη βιβλιογραφία, μπορεί όμως να αιτιολογηθεί βάσει της φύσης της επιφάνειας των λείων ανοξείδωτων ινών που χρησιμοποιούνται στις συγκεκριμένες δοκιμές εξόλκευσης. Οι αριθμητικές καμπύλες ακολουθούν το σχήμα αντίστοιχων πειραματικών καμπυλών της διεθνούς βιβλιογραφίας (Naaman et al. 1989, Markovich et al. 2001, Robins et al. 2002, Cuhna et al. 2008).

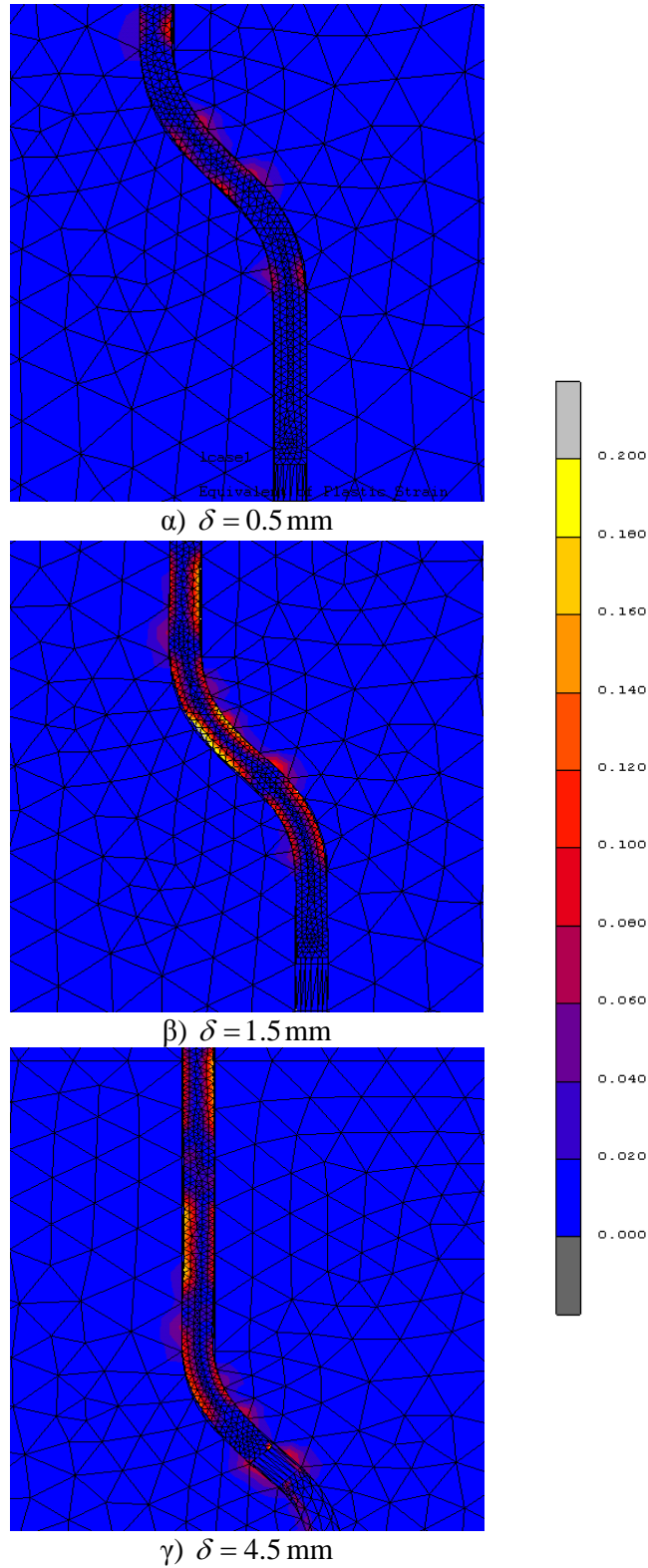


Σχ. 4.21: Σύγκριση καμπυλών δύναμης-μετατόπισης του τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος, για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής, με τη μέση πειραματική καμπύλη.

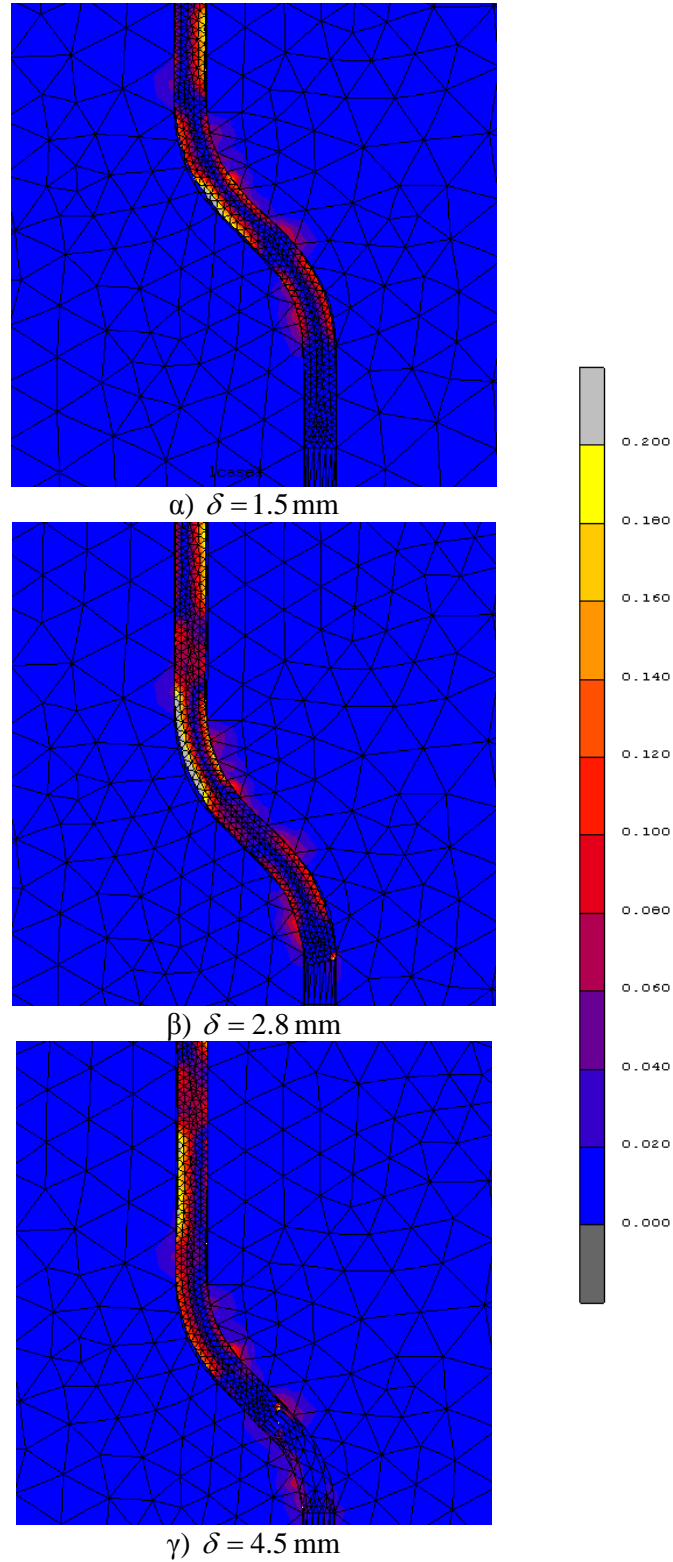
Στη συνέχεια, περιγράφονται διεξοδικά τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο οριακές περιπτώσεις που μελετήθηκαν για $\mu=0.0$ και $\mu=0.2$, με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Αρχικά, μελετάται η περίπτωση όπου $\mu=0.0$. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις της χαλύβδινης ίνας για διάφορες χαρακτηριστικές τιμές της μετατόπισης. Μέχρι τη μετατόπιση των

0.2mm η συμπεριφορά της ίνας είναι σχεδόν γραμμική. Από αυτό το σημείο και έπειτα, η χαλύβδινη ίνα αρχίζει να πλαστικοποιείται (Σχήμα 4.22α). Όπως φαίνεται από την παρατήρηση των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων, τοπικές πλαστικοποιήσεις εμφανίζονται σε διάφορα σημεία του κεκαμμένου άκρου της ίνας, ως αποτέλεσμα της τάσης της να αλλάξει σχήμα προκειμένου να εξολκευθεί από τη μήτρα. Η πλαστικοποίηση της ίνας αντιστοιχεί στη μείωση της επαπτομενικής δυσκαμψίας του συστήματος (κλίση της καμπύλης $P-\delta$). Για μετατόπιση ίση με 1.5 mm (Σχήμα 4.22β), οι δυνάμεις συνάφειας μηδενίζονται και επομένως, παρατηρείται μια σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας. Καθώς η μετατόπιση αυξάνεται, η ίνα σταδιακά κάμπτεται και χάνει το διπλά κεκαμμένο σχήμα της, με αποτέλεσμα η δύναμη P να μειώνεται. Για μετατόπιση ίση με 4.5 mm (Σχήμα 4.22γ), το τμήμα της χαλύβδινης ίνας μεταξύ των δύο κεκαμμένων τμημάτων της είναι σχεδόν πλήρως πλαστικοποιημένο. Η εκτεταμένη αυτή πλαστικοποίηση οφείλεται κυρίως στη συνεχή ανάπτυξη τοπικών πλαστικοποιήσεων στην ίνα, καθώς αυτή περνάει ολισθαίνοντας από τις γωνίες του αποτυπώματός της μέσα στη μήτρα. Στη συνέχεια, η ίνα σταδιακά τείνει να γίνει ευθύγραμμη, η μηχανική εμπλοκή που προσφέρει το αγκιστροειδές άκρο στο σύστημα χάνεται εντελώς, η δύναμη εξόλκευσης μειώνεται και τελικά μηδενίζεται καθώς η ίνα εξολκεύεται από τη μήτρα.

Η περίπτωση που μελετάται για $\mu = 0.2$ περιγράφεται στη συνέχεια. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.21, η καμπύλη $P-\delta$ για $\mu = 0.2$ εμφανίζει παρόμοιο σχήμα με την αντίστοιχη καμπύλη για $\mu = 0.0$ και παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά σημεία που περιγράφηκαν παραπάνω. Παρατηρούνται όμως και κάποιες διαφορές. Στην περίπτωση του συντελεστή τριβής $\mu = 0.2$, λόγω των σημαντικά μεγαλύτερων τιμών της δύναμης, η πλήρης απώλεια της συνάφειας που συμβαίνει για μετατόπιση ίση με 1.5 mm έχει περιορισμένη επίδραση στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα, ενώ στην περίπτωση του μηδενικού συντελεστή τριβής ο μηδενισμός των τάσεων συνάφειας αντιστοιχεί σε περίπου 50% μείωση της δύναμης εξόλκευσης, στην περίπτωση όπου $\mu = 0.2$, μετά την απώλεια συνάφειας η δύναμη εξόλκευσης μειώνεται, διατηρώντας όμως και στη συνέχεια υψηλές τιμές. Στο Σχήμα 4.23α παρουσιάζονται τα αντίστοιχα πεδία πλαστικών παραμορφώσεων και η παραμορφωμένη κατάσταση της ίνας για μετατόπιση ίση με 1.5 mm, για την περίπτωση όπου $\mu = 0.2$. Παρά την πτώση της δύναμης εξόλκευσης σε αυτό το σημείο, η δύναμη αυξάνεται και πάλι αμέσως μετά, λόγω των μηχανισμών επαφής και τριβής. Σημαντική μείωση στη δύναμη εξόλκευσης επέρχεται μετά από τη μετατόπιση των 2.8 mm (Σχήμα 4.23β). Από το σημείο αυτό και έπειτα, η ίνα χάνει το διπλά κεκαμμένο σχήμα του αγκιστροειδούς άκρου της και παραμένει ένα μονό κεκαμμένο τμήμα να ανθίσταται στην εξόλκευση μέσω επαφής και τριβής. Οι τιμές της δύναμης εξόλκευσης αυξάνονται μία ακόμη φορά για μετατόπιση ίση με 4.5 mm (Σχήμα 4.23γ), καθώς η ίνα αλλάζει και πάλι σχήμα μέχρι να γίνει ευθύγραμμη και να εξολκευθεί από την τσιμεντοειδή μήτρα.



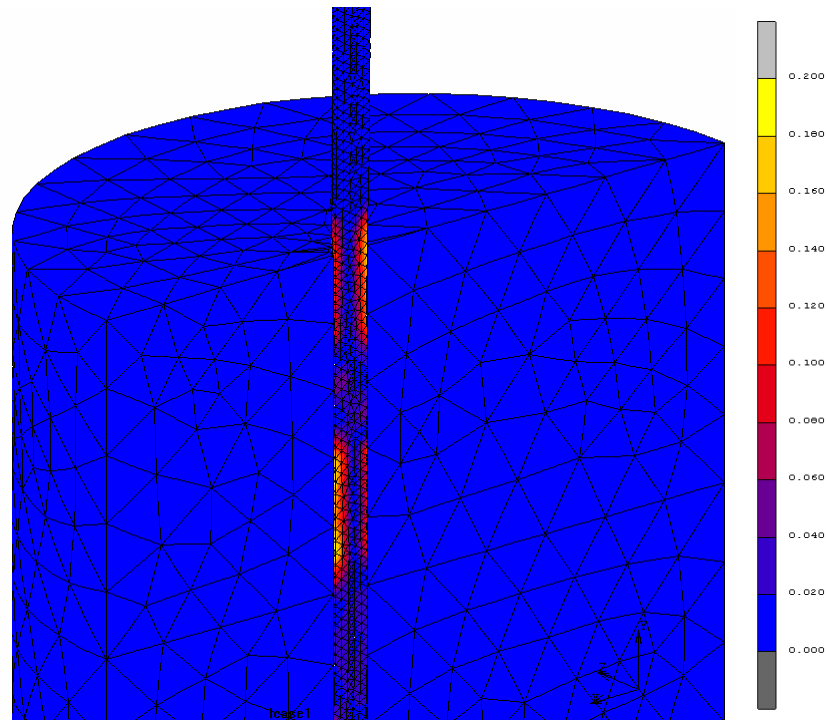
Σχ. 4.22: Παραμορφωμένο σχήμα και πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της χαλύβδινης ίνας για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης δ ($\mu = 0.0$).



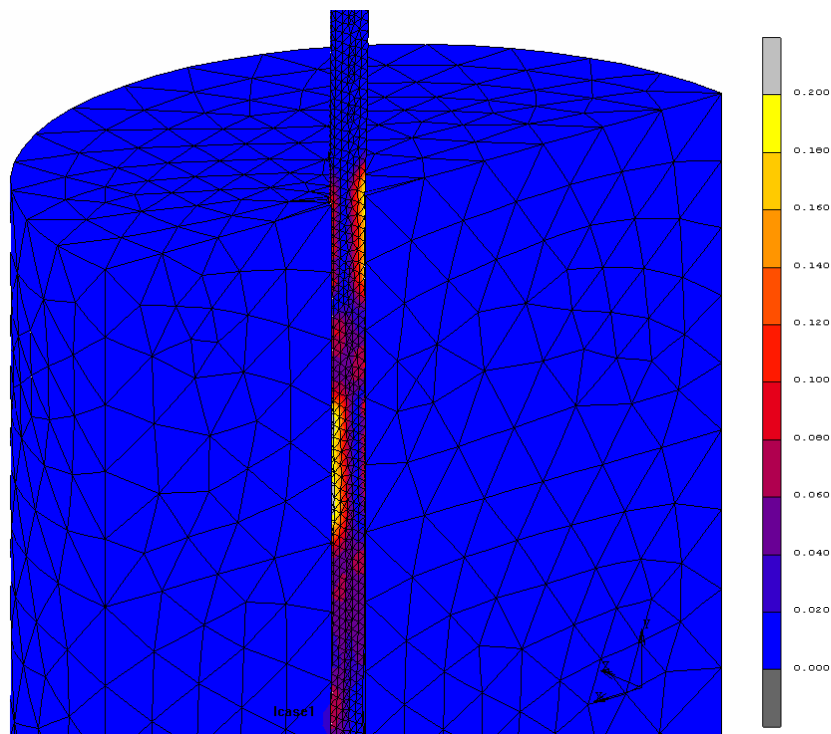
Σχ. 4.23: Παραμορφωμένο σχήμα και πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της χαλύβδινης ίνας για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης δ ($\mu = 0.2$).

Στα Σχήματα 4.24α και 4.24β φαίνονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων και το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της ίνας στο τέλος της φόρτισης ($\delta = 8.0 \text{ mm}$) για τις περιπτώσεις του συντελεστή τριβής $\mu = 0.0$ και $\mu = 0.2$, αντίστοιχα. Φαίνεται και πάλι ότι και στις δύο περιπτώσεις η ίνα έχει πλαστικοποιηθεί σημαντικά λόγω της κάμψης της μέσα στο αποτύπωμα που σχηματίζεται μέσα στη μήτρα. Όμως, η σύγκριση των πεδίων πλαστικών παραμορφώσεων των δύο οριακών περιπτώσεων που μελετώνται καταδεικνύει τις σημαντικά μεγαλύτερες τιμές των παραμορφώσεων της ίνας για συντελεστή τριβής $\mu = 0.2$. Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας και ανθίστανται στην εξόλκευση. Υπό τη δράση των δυνάμεων αυτών, η ίνα επιμηκύνεται καθώς προσπαθεί να ολισθήσει μέσα στο αποτύπωμα της μήτρας, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη στένωση της διατομής της. Στα Σχήματα 4.25α και 4.25β παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα του ακκιστροειδούς άκρου της ίνας στο τελευταίο βήμα της φόρτισης ($\delta = 8.0 \text{ mm}$) για συντελεστή τριβής $\mu = 0.0$ και $\mu = 0.2$, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων φαίνεται η επιμήκυνση της ίνας και η μεγαλύτερη στένωση της διατομής της στην περίπτωση του μη-μηδενικού συντελεστή τριβής. Συγκεκριμένα, το μήκος της ίνας μετά την ευθυγράμμισή της, στην περίπτωση όπου $\mu = 0.2$, είναι κατά 0.18 mm μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μήκος για $\mu = 0.0$. Επίσης, παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις η εμφάνιση παραμένουσας καμπύλωσης στο κατώτερο τμήμα της ίνας. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές (Cunha et al. 2007). Η παραμένουσα αυτή καμπύλωση σε ορισμένα τμήματα της ίνας οδηγεί στην αύξηση των δυνάμεων επαφής και τριβής, με αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμενουσών δυνάμεων κατά το τελικό στάδιο της εξόλκευσης. Οπότε, όσο μεγαλύτερη είναι η θεωρούμενη τιμή του συντελεστή τριβής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της παραμένουσας δύναμης στο τέλος της εξόλκευσης, γεγονός που παρατηρείται μέσω της σύγκρισης των καμπυλών του Σχήματος 4.21 για τις διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής.

Σημειώνεται ότι η ίνα δε μπορεί να εξαντλήσει τη μέγιστη αντοχή της, καθώς ολισθαίνει από τη μήτρα. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή τριβής που εξετάστηκαν. Στην περίπτωση όμως όπου $\mu = 0.2$ το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η ίνα είναι σχεδόν διπλάσιο σε σχέση με την περίπτωση όπου $\mu = 0.0$. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή τριβής που θεωρήθηκαν, δίνουν αποτελέσματα σε ό,τι αφορά στα χαρακτηριστικά των καμπυλών $P - \delta$, στις πλαστικές παραμορφώσεις και στη γενικότερη συμπεριφορά του συστήματος, που είναι πιο κοντά σε εκείνα που προκύπτουν για $\mu = 0.2$ παρά για $\mu = 0.0$. Σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις που ακολουθούν στις επόμενες παραγράφους, θεωρείται συντελεστής τριβής $\mu = 0.12$, καθώς η αριθμητική καμπύλη $P - \delta$ που προέκυψε θεωρώντας την τιμή αυτή, προσεγγίζει περισσότερο τη μέση πειραματική καμπύλη (Σχήμα 4.21).

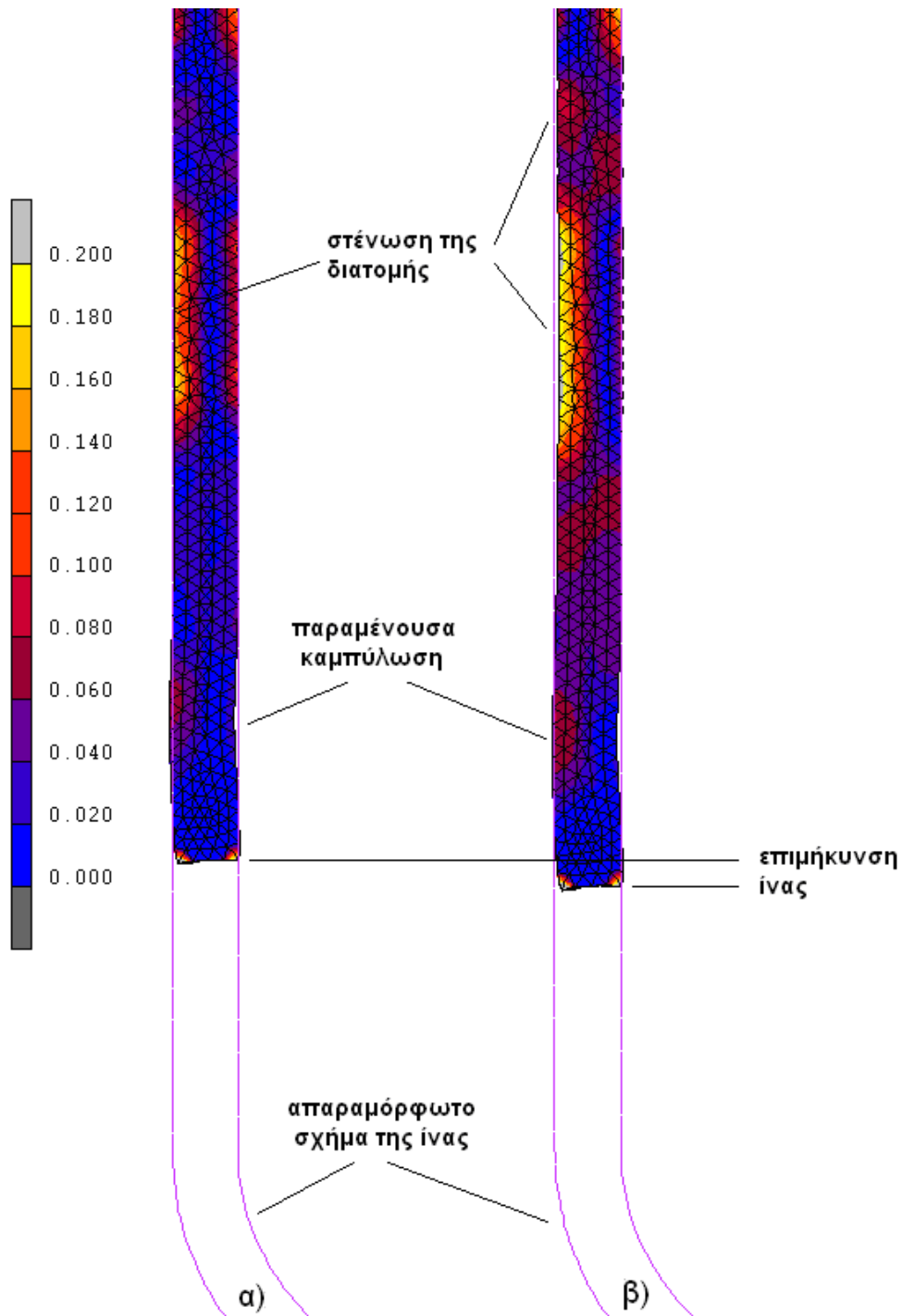


α)



β)

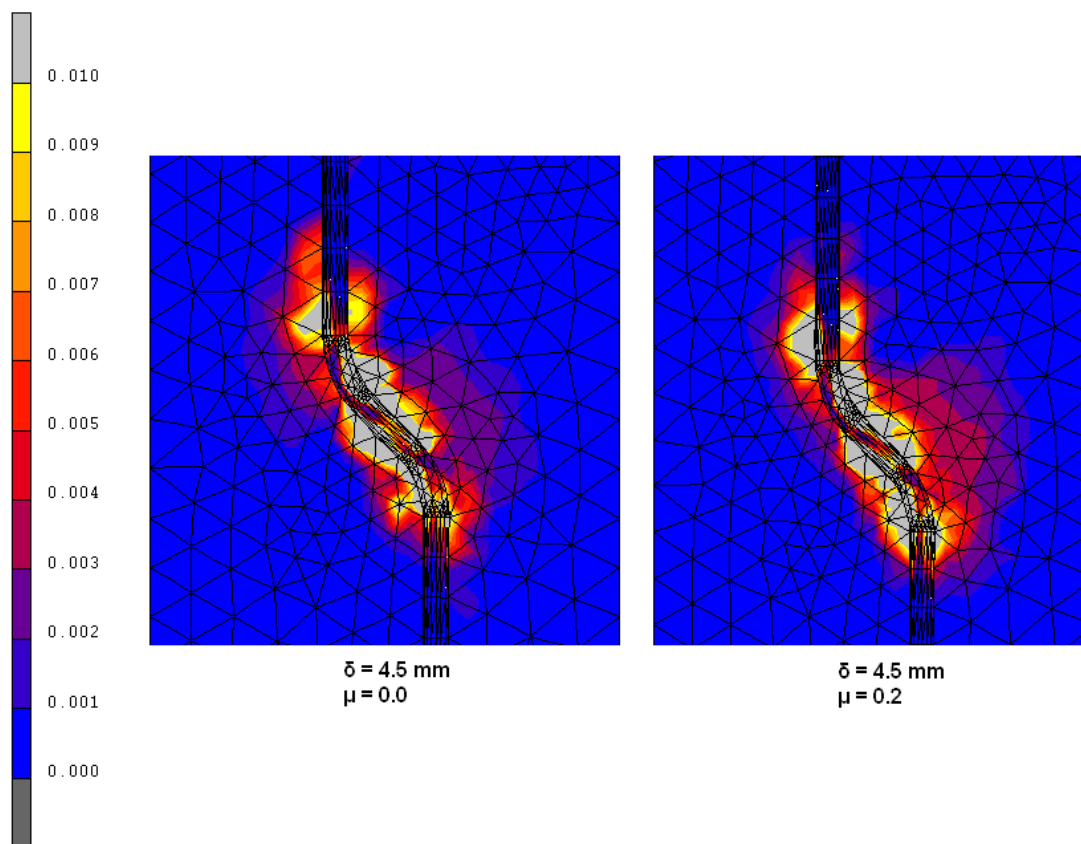
Σχ. 4.24: Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της χαλύβδινης ίνας στο τελευταίο βήμα της φόρτισης ($\delta = 8.0$ mm) και για συντελεστή τριβής α) $\mu = 0.0$ και β) $\mu = 0.2$.



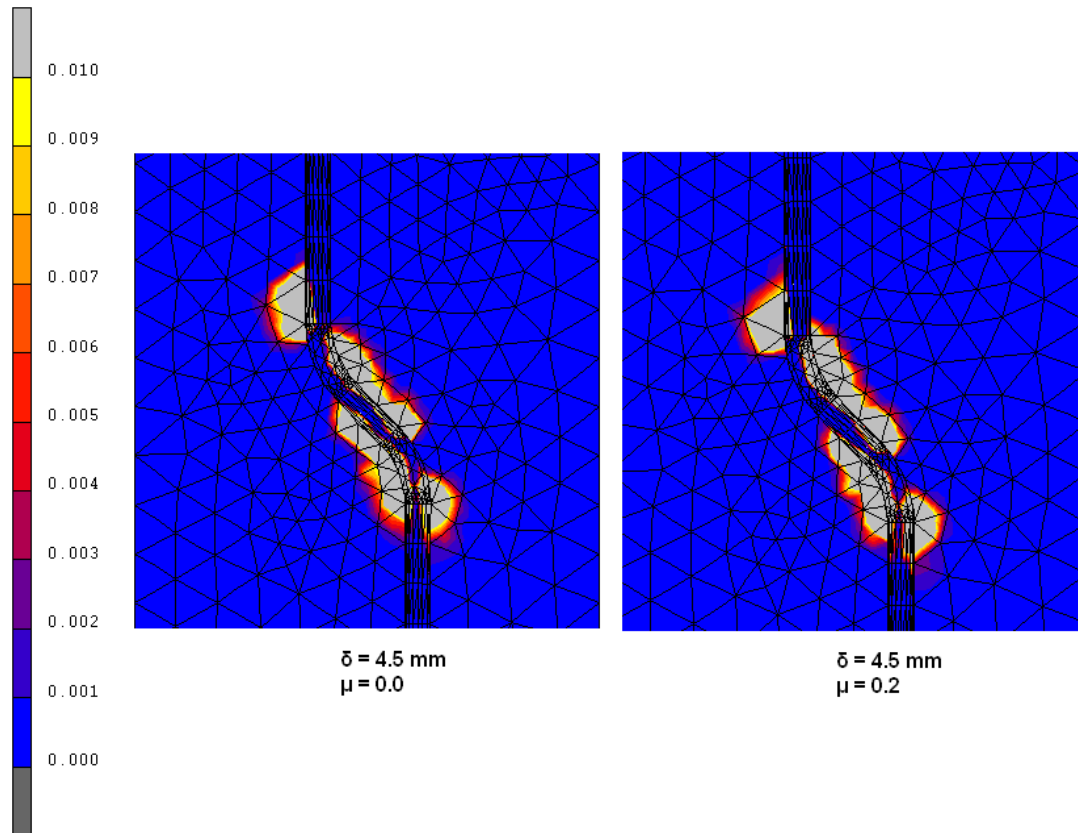
Σχ. 4.25: Το παραμορφωμένο σχήμα του ακιστροειδούς άκρου της χαλύβδινης ίνας στο τελευταίο βήμα της φόρτισης ($\delta = 8.0 \text{ mm}$), για συντελεστή τριβής α) $\mu = 0.0$ και β) $\mu = 0.2$.

Στο Σχήμα 4.26 απεικονίζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης της τσιμεντοειδούς μήτρας, για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 4.5 \text{ mm}$ και για τις δύο περιπτώσεις του συντελεστή τριβής $\mu = 0.0$ και $\mu = 0.2$. Επίσης, στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων της μήτρας για τις δύο περιπτώσεις του συντελεστή τριβής αντίστοιχα και για την ίδια επιβαλλόμενη μετατόπιση.

Παρατηρείται, ότι σε όλες τις περιπτώσεις που μελετώνται, οι βλάβες που εμφανίζονται στην τσιμεντοειδή μήτρα περιορίζονται σε μία στενή περιοχή πολύ κοντά στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας και κυρίως κατά μήκος του αγκιστροειδούς άκρου της ίνας. Η παρατήρηση αυτή ουσιαστικά επιβεβαιώνει ότι η μειωμένη, σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική, διάμετρος του κυλινδρικού όγκου της μήτρας που θεωρήθηκε κατά την ανάλυση, είναι αρκετή ώστε να μην επηρεάζει με κανέναν τρόπο τα αριθμητικά αποτελέσματα. Επίσης, επιβεβαιώνεται και η θεώρηση της περισφιγμένης μήτρας για το μεγαλύτερο τμήμα του κυλινδρικού όγκου της (Τμήμα Α – Σχήμα 4.14), καθώς σημαντικός όγκος «υγιούς» τσιμεντοκονιάματος δημιουργεί συνθήκες περίσφιγξης για το τμήμα εκείνο της τσιμεντοειδούς μήτρας που βρίσκεται πολύ κοντά στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας και υφίσταται τις βλάβες κατά την εξόλκευση της ίνας. Τέλος, συγκρίνοντας τις εικόνες τόσο των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης, όσο και των πλαστικών παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας, παρατηρείται ότι το μέγεθος των παραμορφώσεων δεν διαφοροποιείται σημαντικά με την αύξηση του συντελεστή τριβής. Μάλιστα, η εικόνα των παραμορφώσεων είναι παρόμοια και για τις δύο ακραίες τιμές του συντελεστή τριβής, καθώς σε κάθε περίπτωση η τσιμεντοειδής μήτρα υφίσταται βλάβες στην περιοχή γύρω από το αγκιστροειδές άκρο της ίνας. Οι βλάβες αυτές προκαλούνται από τη διαδικασία κάμψης και ευθυγράμμισης των τμημάτων της ίνας κατά την ολίσθησή της μέσα από τις γωνίες του αποτυπώματός της μέσα στη μήτρα.



Σχ. 4.26: Πεδία παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης της τσιμεντοειδούς μήτρας, για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 4.5 \text{ mm}$ και συντελεστή τριβής $\mu = 0.0$ και $\mu = 0.2$.

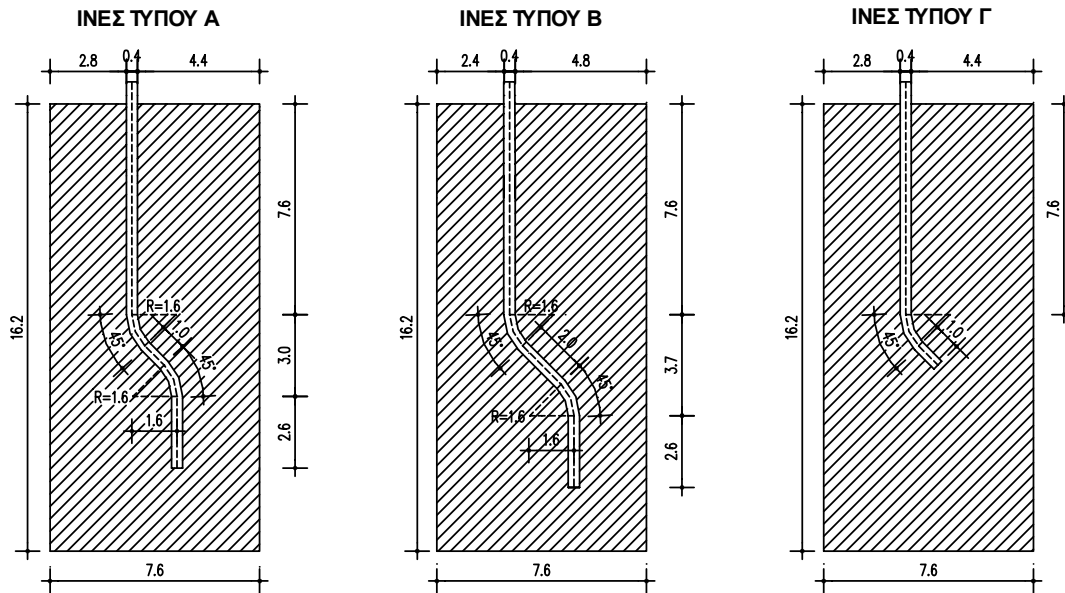


Σχ. 4.27: Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας, για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 4.5 \text{ mm}$ και συντελεστή τριβής $\mu = 0.0$ και $\mu = 0.2$.

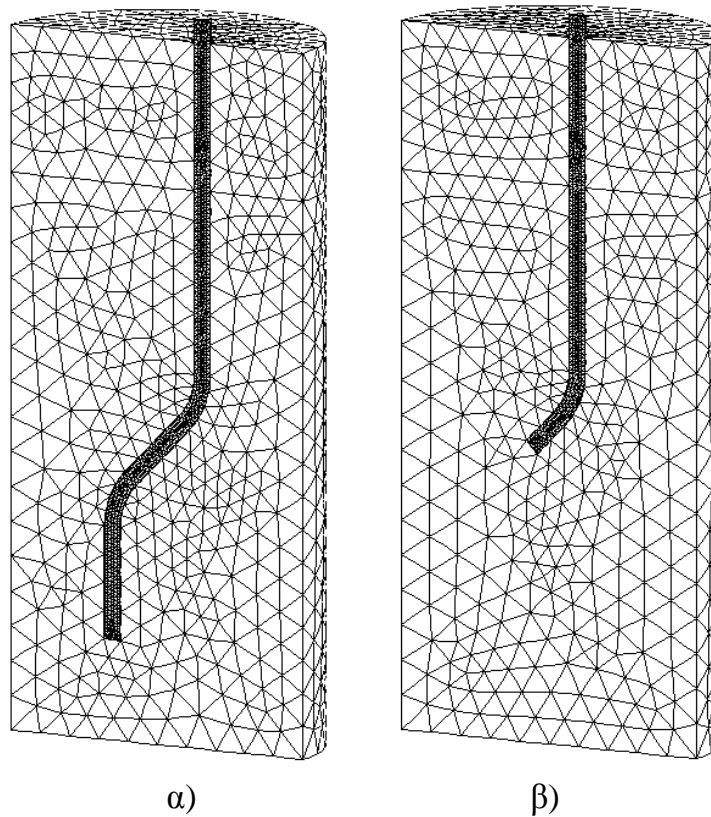
4.4 Αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς διαφορετικών τύπων ινών με αγκιστροειδή άκρα

Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η επιρροή διαφορετικών γεωμετριών της χαλύβδινης ίνας στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώνονται αριθμητικά οι δοκιμές εξόλκευσης ινών με τρεις διαφορετικές γεωμετρίες του αγκιστροειδούς άκρου. Οι ίνες τύπου Α είναι ουσιαστικά οι ίνες που μελετήθηκαν ήδη στην Παράγραφο 4.3. Οι ίνες τύπου Β είναι όμοιες με τις ίνες τύπου Α, με μόνη διαφορά το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος του αγκιστροειδούς άκρου, που βρίσκεται μεταξύ των δύο κεκαμμένων τμημάτων. Στις ίνες τύπου Β το συγκεκριμένο αυτό ευθύγραμμο τμήμα έχει διπλάσιο μήκος σε σχέση με το αντίστοιχο των ινών τύπου Α. Οι ίνες τύπου Γ έχουν μόνο ένα κεκαμμένο τμήμα στο άκρο τους. Οι τρεις διαφορετικές γεωμετρίες των ινών που διερευνώνται απεικονίζονται στο Σχήμα 4.28. Επίσης, στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων για τις ίνες τύπου Β και Γ. Η διαδικασία μόρφωσης των προσομοιωμάτων είναι ακριβώς ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για τις ίνες τύπου Α στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς επίσης και όλες οι θεωρήσεις σε σχέση με τις ιδιότητες των υλικών, τις συνοριακές συνθήκες, τις συνθήκες επαφής και τριβής, τη διαδικασία επιβολής της φόρτισης και τη μέθοδο

επίλυσης, έτσι ώστε τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων να είναι άμεσα συγκρίσιμα. Ο συντελεστής τριβής λαμβάνεται ίσος με 0.12.



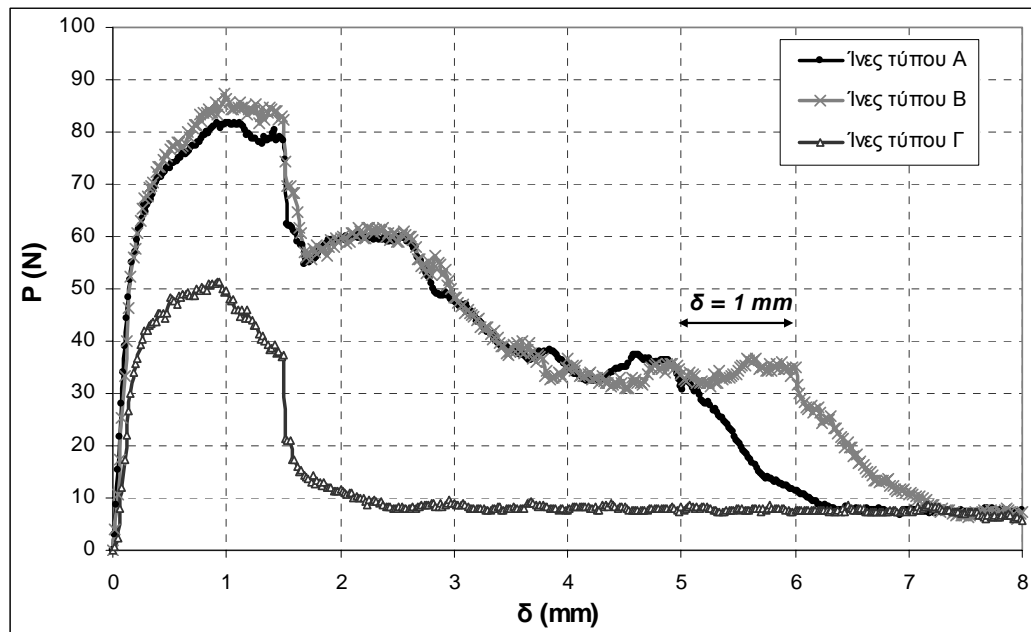
Σχ. 4.28: Οι τρεις τύποι ινών που διερευνώνται (διαστάσεις σε mm).



Σχ. 4.29: Τα τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα μετά τη διακριτοποίηση α) για τις ίνες τύπου Β και β) για τις ίνες τύπου Γ.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες της χαλύβδινης ίνας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.30. Συγκρίνοντας τις καμπύλες $P - \delta$ για τις ίνες τύπου Α και Β φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης εξόλκευσης για την ίνα Β είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη της ίνας Α. Εκτός από αυτή τη διαφορά, το σχήμα των δύο καμπυλών είναι όμοιο. Βέβαια, λόγω του μεγαλύτερου μήκους της ίνας Β, ο μηδενισμός της αντοχής στο τελικό στάδιο της εξόλκευσης επέρχεται για τιμή της μετατόπισης δ που είναι κατά 1 mm περίπου μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για την ίνα Α. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα συμβατό με το γεγονός ότι το μήκος της ίνας Β είναι κατά 1 mm μεγαλύτερο από αυτό της ίνας Α. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.30, οι ίνες τύπου Γ παρουσιάζουν σημαντικά μειωμένη αντίσταση σε εξόλκευση σε σχέση με τις ίνες Α και Β, λόγω του μονού κεκαμμένου άκρου τους. Οι ίνες αυτές χάνουν την αντίστασή τους σχεδόν ταυτόχρονα με την πλήρη απώλεια της συνάφειας για μετατόπιση ίση με 1.5 mm.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι ίνες Α και Β, με διπλά κεκαμμένο αγκιστροειδές άκρο, παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη αντίσταση σε εξόλκευση, η οποία δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις επιμέρους λεπτομέρειες της γεωμετρίας του αγκιστροειδούς άκρου. Αντίθετα, οι ίνες τύπου Γ που διαθέτουν μόνο κεκαμμένο άκρο παρουσιάζουν σημαντικά μειωμένη αντίσταση σε εξόλκευση, λόγω της ελλιπούς αγκύρωσης της ίνας μέσα στη μήτρα και συνεπώς, της ασθενούς μηχανικής εμπλοκής που το μονό κεκαμμένο άκρο μπορεί να προσφέρει στο σύστημα. Επομένως, επιβεβαιώνεται μέσω της ανάλυσης η σημασία της συγκεκριμένης γεωμετρίας της ίνας με το διπλά κεκαμμένο άκρο, για τη συνολική συμπεριφορά της κατά τη δοκιμή εξόλκευσής της από την τσιμεντοειδή μήτρα.



Σχ. 4.30: Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες του αγκιστροειδούς άκρου της χαλύβδινης ίνας.

4.5 Μόρφωση δισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

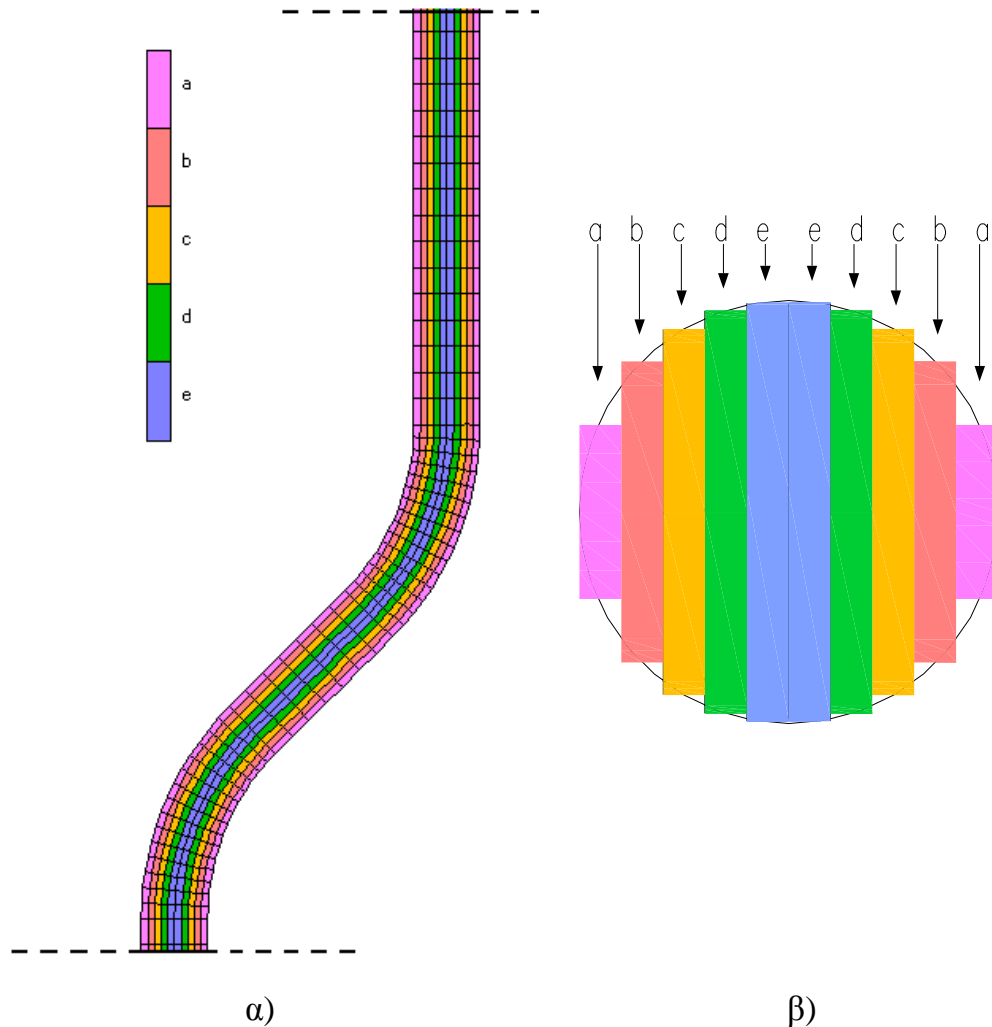
Τα τρισδιάστατα προσομοιώματα που περιγράφονται στις παραπάνω παραγράφους είναι ικανά να παράγουν ακριβή και αξιόπιστα αριθμητικά αποτελέσματα αλλά έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Ο χρόνος των αριθμητικών αυτών αναλύσεων κυμαίνεται από 9 έως και 30 ώρες σε ένα σύστημα SUN X4450 64bit με 8 επεξεργαστές XEON 7220-2.93 GHz και μνήμη 32 GB. Ο χρόνος ανάλυσης όμως δεν είναι ο μοναδικός λόγος για τον οποίο θα ήταν χρήσιμο ένα απλούστερο αριθμητικό προσομοίωμα που θα μπορεί να καταλήξει σε αποδεκτά αποτελέσματα. Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι ο απαιτούμενος χρόνος για τη μόρφωση και τον έλεγχο ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σαν τη συγκεκριμένη, στις οποίες η περίπλοκη γεωμετρία, καθώς και όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα που πρέπει να ληφθούν υπόψη χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Επίσης, σημαντικό παράγοντα αποτελεί και ο χρόνος που απαιτείται για την αποτίμηση και αξιολόγηση του μεγάλου όγκου αποτελεσμάτων που προκύπτει από την ανάλυση ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος.

Όλα τα παραπάνω συνηγορούν στο γεγονός ότι ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα μπορεί να είναι δύσκολο στη μόρφωση και το χειρισμό του, ειδικά στις περιπτώσεις σχεδιασμού μειγμάτων, όπου στόχος της ανάλυσης είναι η γρήγορη λήψη αποφάσεων. Επομένως, είναι επιθυμητή η μόρφωση απλούστερων προσομοιωμάτων, που όμως θα έχουν την ικανότητα να προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη γενική συμπεριφορά του υπό μελέτη προβλήματος και να δίνουν μια ορθή εκτίμηση των αντοχών.

Έτσι, αποφασίστηκε η μόρφωση ενός δισδιάστατου προσομοιώματος, ικανού να δώσει αποτελέσματα παρόμοια με εκείνα του αντίστοιχου τρισδιάστατου. Το δισδιάστατο προσομοίωμα μορφώνεται με πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Το πρόβλημα της συνεκτίμησης της τρίτης διάστασης του προβλήματος αντιμετωπίζεται με την απόδοση διαφορετικών τιμών στο πάχος των επίπεδων στοιχείων. Καθώς από την ανάλυση του τρισδιάστατου προσομοιώματος προέκυψε ότι η συμπεριφορά της χαλύβδινης ίνας είναι κυρίαρχη στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος, αποφασίστηκε να αποδοθεί η γεωμετρία της και στο δισδιάστατο προσομοίωμα, όσο το δυνατό ακριβέστερα.

Η διακριτοποίηση τόσο της μήτρας, όσο και της ίνας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πεπερασμένου στοιχείου 11 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.7, §3.4.1). Η μήτρα διακριτοποιήθηκε μέσω 6016 στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης και η ίνα μέσω 7240 όμοιων στοιχείων. Στα στοιχεία που προσομοιώνουν την τσιμεντοειδή μήτρα δόθηκε πάχος ίσο με 7.6 mm, ίσο δηλαδή με τη διάμετρο του κυλινδρικού όγκου της μήτρας του τρισδιάστατου προσομοιώματος. Για την ακριβέστερη προσομοίωση της καμπτικής συμπεριφοράς της χαλύβδινης ίνας, η διακριτοποίησή της πραγματοποιήθηκε μέσω 10 παράλληλων λωρίδων πεπερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.31α. Σε κάθε μία από αυτές τις λωρίδες στοιχείων δόθηκε διαφορετικό πάχος, έτσι ώστε να προσεγγιστεί γεωμετρικά η κυκλική διατομή της

ίνας μέσω των αντίστοιχων ορθογωνίων που σχηματίζονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.31β. Πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές a, b, c, d και e δόθηκε πάχος $t_a = 0.1636$ mm, $t_b = 0.2838$ mm, $t_c = 0.3453$ mm, $t_d = 0.3807$ mm και $t_e = 0.3952$ mm, αντίστοιχα.

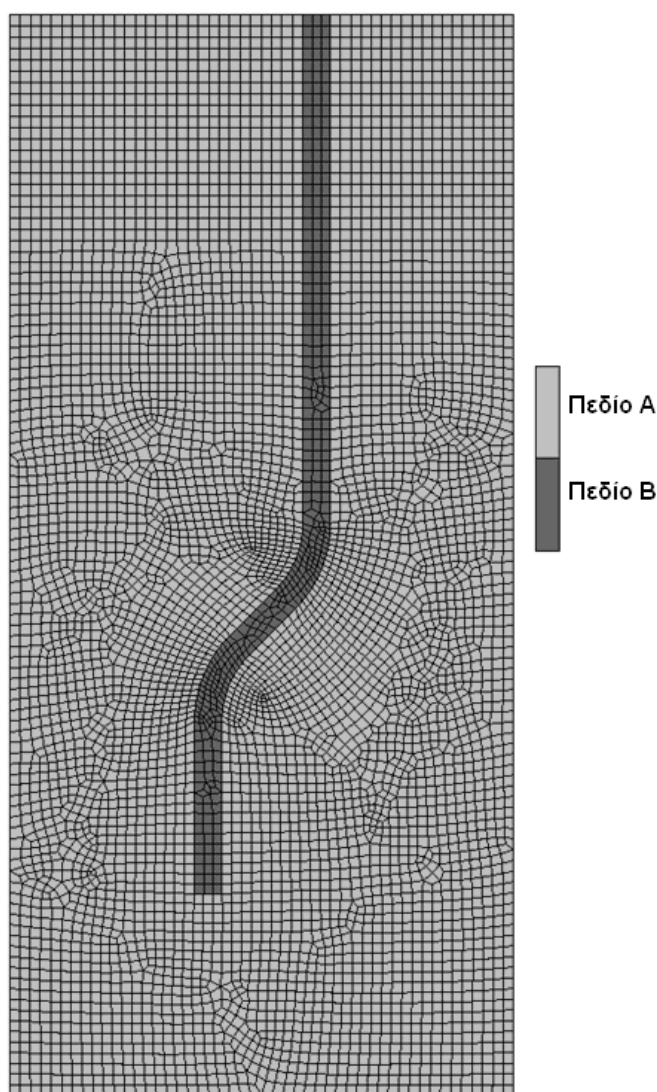


Σχ. 4.31: α) Διακριτοποίηση της χαλύβδινης ίνας και β) υπολογισμός των τιμών του πάχους των πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνουν τη χαλύβδινη ίνα.

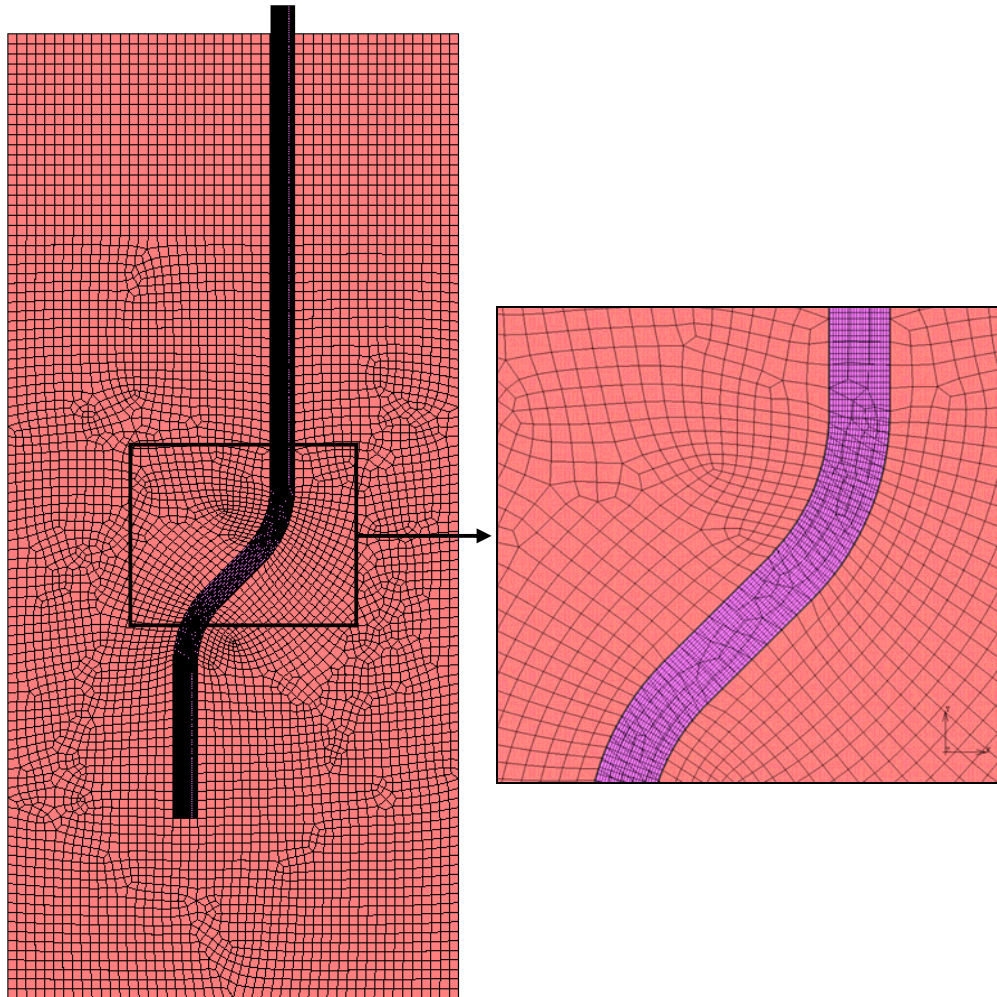
Το δίκτυο των Π.Σ. της χαλύβδινης ίνας επικαλύπτει το αντίστοιχο δίκτυο της τσιμεντοειδούς μήτρας. Επίσης, το δίκτυο των Π.Σ. της μήτρας αποτελείται από δύο επιμέρους πεδία (Σχήμα 4.32). Το Πεδίο Α περιλαμβάνει στοιχεία που βρίσκονται εκτός της επιφάνειας που καταλαμβάνει το πλέγμα των στοιχείων της χαλύβδινης ίνας, ενώ το Πεδίο Β περιλαμβάνει στοιχεία που επικαλύπτονται με το πλέγμα των στοιχείων της ίνας. Στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται το διακριτοποιημένο δισδιάστατο προσομοίωμα του προβλήματος μαζί με λεπτομέρεια που δείχνει την επικάλυψη μεταξύ των δικτύων Π.Σ. Τα στοιχεία του Πεδίου Α της μήτρας και το πλέγμα των στοιχείων της ίνας αποτελούν δύο διαφορετικά παραμορφώσιμα σώματα μεταξύ των οποίων θεωρούνται συνθήκες μονόπλευρης επαφής και τριβής, σε πλήρη αντιστοιχία με το αρχικό τρισδιάστατο προσομοίωμα. Επιπρόσθετα, μεταξύ ίνας και μήτρας εισάγονται στοιχεία διεπιφάνειας

όμοια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του τρισδιάστατου προσομοιώματος, για να ληφθούν υπόψη οι τάσεις συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ των δύο σωμάτων. Ο συντελεστής τριβής λαμβάνεται ίσος με $\mu = 0.12$.

Για το χάλυβα της ίνας υιοθετείται και πάλι ο ελαστοπλαστικός νόμος του Σχήματος 4.17 και οι ιδιότητες υλικού παραμένουν οι ίδιες με εκείνες του τρισδιάστατου προσομοιώματος. Αντίθετα, για την προσομοίωση της τσιμεντοειδούς μήτρας ακολουθείται η απλοποιητική παραδοχή του ελαστικού υλικού. Η φόρτιση εφαρμόζεται βήμα προς βήμα με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων δ στο άνω άκρο της χαλύβδινης ίνας και στη συνέχεια μετρώνται οι προκύπτουσες δυνάμεις P στα σημεία επιβολής της μετατόπισης. Επιβάλλεται συνολική μετατόπιση ίση με 8.0 mm, μέσα από 400 ίσα βήματα φόρτισης, όπως ακριβώς και στο αντίστοιχο τρισδιάστατο προσομοίωμα.



Σχ. 4.32: Η διακριτοποιημένη τσιμεντοειδής μήτρα και ο διαχωρισμός των δύο πεδίων Π.Σ. από τα οποία αποτελείται.

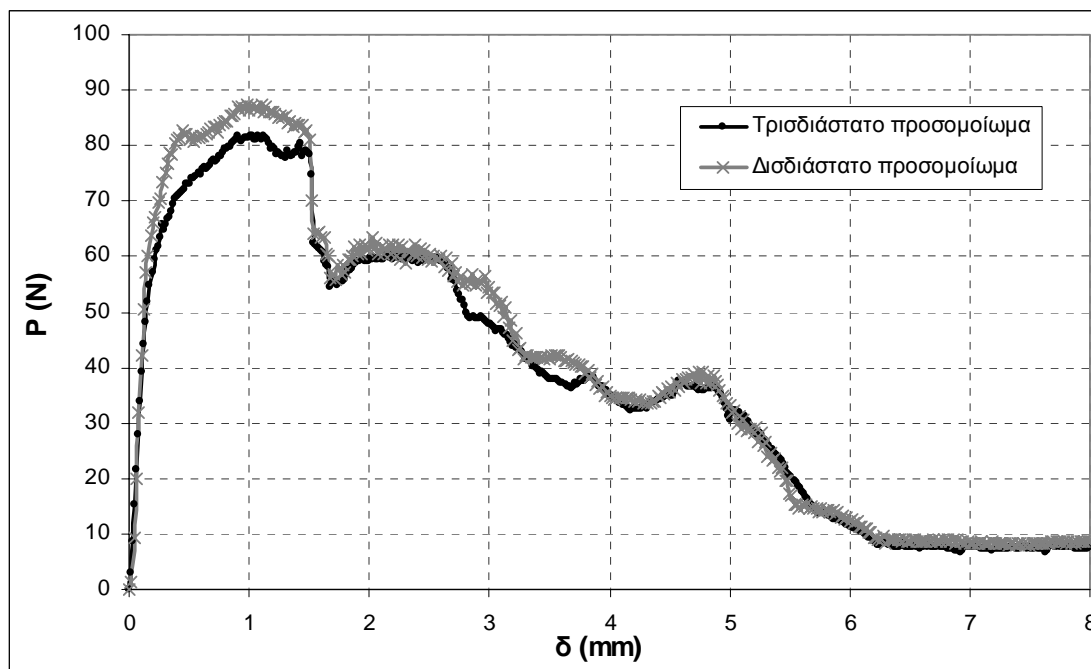


Σχ. 4.33: Τα επικαλυπτόμενα δίκτυα Π.Σ. της χαλύβδινης ίνας και της τσιμεντοειδούς μήτρας.

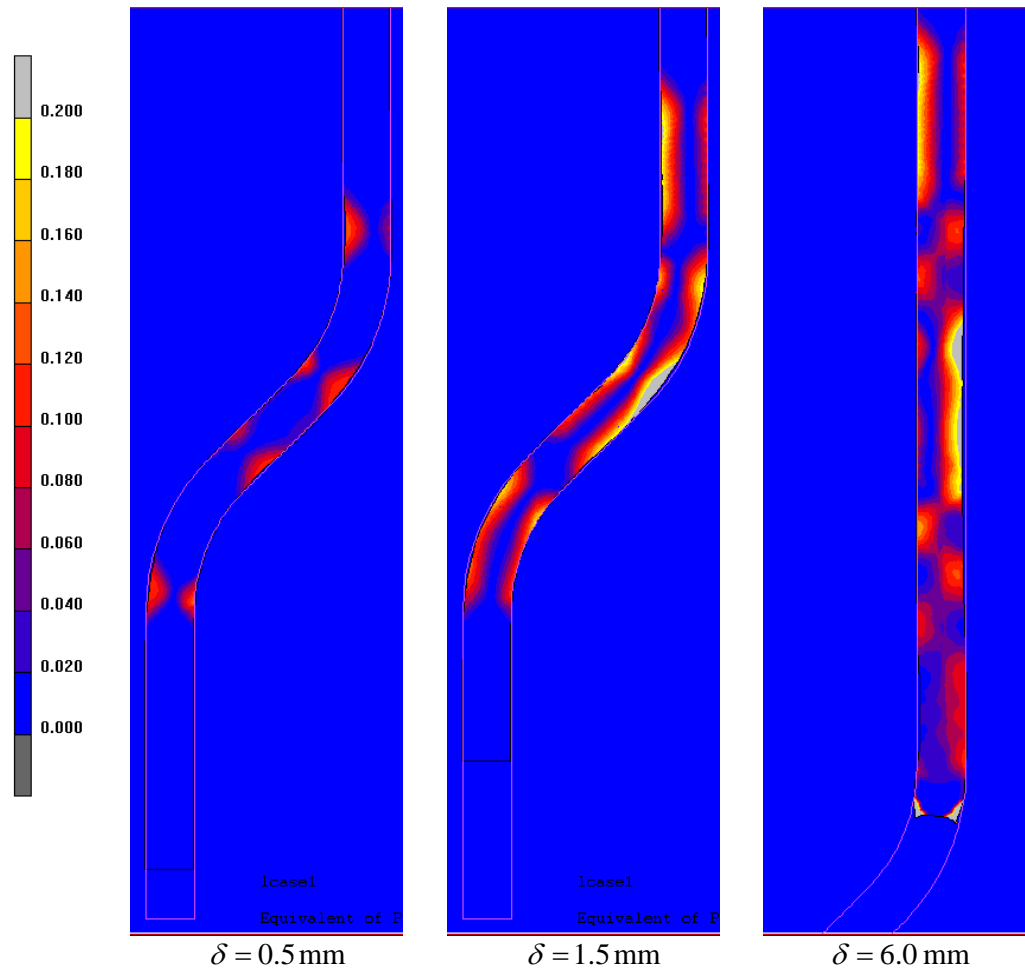
Στο Σχήμα 4.34 γίνεται η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών δύναμης-μετακίνησης που προκύπτουν από το τρισδιάστατο και το δισδιάστατο προσομοίωμα. Επιβεβαιώνεται ότι τα αποτελέσματα που προέρχονται από το απλοποιημένο δισδιάστατο προσομοίωμα είναι σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα του αντίστοιχου, πιο ρεαλιστικού και ακριβέστερου τρισδιάστατου προσομοιώματος. Η καμπύλη $P-\delta$ του δισδιάστατου προσομοιώματος εμφανίζει τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά σημεία με εκείνα που έχουν ήδη περιγραφεί διεξοδικά για την αντίστοιχη καμπύλη του τρισδιάστατου προσομοιώματος. Σημειώνεται ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.34, η τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης είναι κατά 10% μεγαλύτερη στο δισδιάστατο προσομοίωμα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί κυρίως στη θεώρηση ελαστικού υλικού για την τσιμεντοειδή μήτρα, που έχει ως αποτέλεσμα να μη λαμβάνεται υπόψη η μη-γραμμική συμπεριφορά της, δηλαδή η πλαστικοποίηση και η ρηγμάτωσή της.

Στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης δ . Παρατηρείται ότι από τα πρώτα

βήματα της φόρτισης εμφανίζονται τοπικές πλαστικοποιήσεις γύρω από τα κεκαμμένα τμήματα της ίνας, καθώς κάποια από αυτά αναγκάζονται να καμφθούν και άλλα να ευθυγραμμιστούν κατά την ολίσθηση της ίνας μέσα στο αποτύπωμά της στην τσιμεντοειδή μήτρα. Η πλαστικοποίηση της ίνας αντικατοπτρίζεται στη μείωση της δυσκαμψίας στο διάγραμμα $P-\delta$ του Σχήματος 4.34, που συμβαίνει για $\delta = 0.2$ mm περίπου. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνει η φόρτιση, οι πλαστικές παραμορφώσεις στο αγκιστροειδές άκρο της ίνας αυξάνονται καθώς αυτή περνάει από τις γωνίες του αποτυπώματός της μέσα στη μήτρα, μέχρι τη μετατόπιση των 6.0 mm. Στο σημείο αυτό το αγκιστροειδές άκρο της ίνας έχει μετατραπεί σε ευθύγραμμο και είναι σχεδόν πλήρως πλαστικοποιημένο, όπως φαίνεται και στην απεικόνιση του Σχήματος 4.35. Σημειώνεται ότι οι εικόνες των πλαστικών παραμορφώσεων που προκύπτουν από το δισδιάστατο προσομοίωμα της χαλύβδινης ίνας βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με εκείνες που προκύπτουν από το τρισδιάστατο προσομοίωμα, για όλα τα στάδια της εξόλκευσης (Σχήματα 4.22 - 4.25). Επομένως, το απλοποιημένο δισδιάστατο προσομοίωμα που περιγράφεται στην παρούσα παράγραφο, αν και δεν μπορεί να δώσει ρεαλιστικά πεδία τάσεων-παραμορφώσεων για την τσιμεντοειδή μήτρα λόγω της παραδοχής του ελαστικού υλικού, κατορθώνει να προσομοιώσει με ακρίβεια τη συμπεριφορά της αγκιστροειδούς ίνας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης και να παράγει αποτελέσματα που βρίσκονται πολύ κοντά σε εκείνα του αντίστοιχου τρισδιάστατου προσομοιώματος.



Σχ. 4.34: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της τρισδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης.

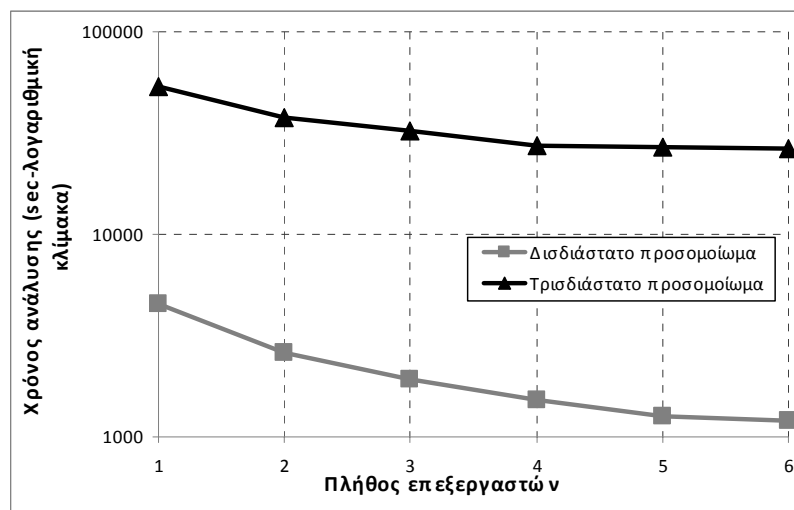


Σχ. 4.35: Παραμορφωμένο σχήμα και πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της δισδιάστατης ίνας για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης δ .

Επίσης, πρέπει, να σημειωθεί το σημαντικό πλεονέκτημα του μικρού υπολογιστικού κόστους που έχει το δισδιάστατο προσομοίωμα έναντι του αντίστοιχου τρισδιάστατου. Πιο συγκεκριμένα, για την ανάλυση του τρισδιάστατου προσομοιώματος στην περίπτωση του συντελεστή τριβής $\mu = 0.12$ απαιτούνται 53251 sec, ενώ για την επίλυση του αντίστοιχου δισδιάστατου προβλήματος απαιτούνται 4520 sec. Οι χρόνοι αυτοί αφορούν την επίλυση των προβλημάτων με τη χρήση ενός μόνο επεξεργαστή του συστήματος SUN X4450, έτσι ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμοι. Επομένως, ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση του δισδιάστατου προσομοιώματος είναι μόλις το 8.5% του χρόνου που απαιτείται για την ανάλυση του αντίστοιχου τρισδιάστατου. Στο υπολογιστικό κόστος θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το γεγονός ότι η μόρφωση του δισδιάστατου προσομοιώματος Π.Σ. αποτελεί μια σχετικά απλή και γρήγορη διαδικασία, κατά την οποία δεν παρουσιάστηκαν δυσκολίες. Αντίθετα, η ακριβής τρισδιάστατη διακριτοποίηση της τσιμεντοειδούς μήτρας και κυρίως της αγκιστροειδούς ίνας είναι πολύ πιο χρονοβόρα και απαιτεί ιδιαίτερη προσπάθεια.

Τέλος, λόγω της υπολογιστικής φύσης του προβλήματος και της σημασίας του υπολογιστικού κόστους, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της

αποτελεσματικότητας της χρήσης περισσότερων του ενός, παράλληλων επεξεργαστών για την ανάλυση τόσο του τρισδιάστατου, όσο και του δισδιάστατου προσομοιώματος. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται ο αλγόριθμος METIS (Karypis και Kumar 1995) που διαμερίζει το χωρίο του προβλήματος σε υποχωρία (domain decomposition). Στο Σχήμα 4.36 παρουσιάζονται οι χρόνοι ανάλυσης σε δευτερόλεπτα, που επιτυγχάνονται με τη χρήση πολλαπλών επεξεργαστών, για το δισδιάστατο και τρισδιάστατο προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης της ίνας. Είναι προφανές ότι σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από το πλήθος των παράλληλων επεξεργαστών που χρησιμοποιούνται, για την επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερος χρόνος σε σχέση με το χρόνο επίλυσης του αντίστοιχου δισδιάστατου. Επίσης, παρατηρείται ότι η αποτελεσματικότητα της χρήσης πολλών επεξεργαστών μειώνεται με την αύξηση του πλήθους τους. Πρακτικά, ο χρόνος ανάλυσης δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, με τη χρήση περισσότερων από τέσσερις επεξεργαστές για το τρισδιάστατο προσομοίωμα και περισσότερων από πέντε για το δισδιάστατο προσομοίωμα. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, αυτό οφείλεται στην περιπλοκότητα που εισάγεται λόγω του αλγορίθμου επαφής. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των υποχωριών στα οποία αναλύεται το αρχικό πρόβλημα, τόσο πιο πιθανό είναι, κόμβοι που κάποια στιγμή θα έρθουν σε επαφή, να ανήκουν σε διαφορετικά υποχωρία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το μέγεθος του συστήματος των εξισώσεων που συνθέτει τα επιμέρους υποσυστήματα στα οποία αναλύεται το αρχικό πρόβλημα.

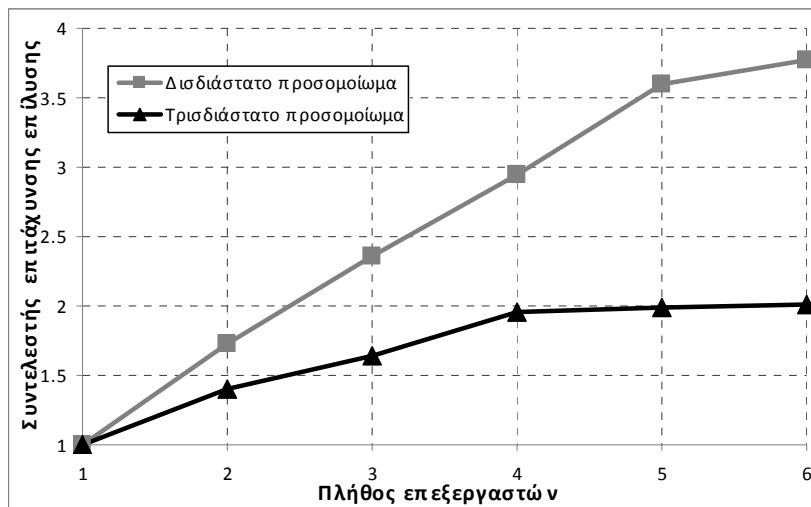


Σχ. 4.36: Σύγκριση του χρόνου ανάλυσης του δισδιάστατου και τρισδιάστατου προσομοιώματος με τη χρήση πολλαπλών επεξεργαστών.

Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζεται ο συντελεστής επιτάχυνσης της επίλυσης για το δισδιάστατο και τρισδιάστατο προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης, όπως μεταβάλλεται σε σχέση με τον αριθμό των επεξεργαστών που χρησιμοποιούνται. Ο συντελεστής επιτάχυνσης της επίλυσης AF_n προκύπτει ως εξής:

$$AF_n = t_n / t_1, \quad (4.5)$$

όπου t_n είναι ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιώντας n αριθμό επεξεργαστών και t_1 είναι ο χρόνος επίλυσης του ίδιου προβλήματος με τη χρήση ενός επεξεργαστή. Από τη σύγκριση των δύο καμπυλών παρατηρείται ότι για κάθε αριθμό χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών, οι συντελεστές επιτάχυνσης της επίλυσης του δισδιάστατου προβλήματος είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους του τρισδιάστατου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, για το δισδιάστατο πρόβλημα επιτυγχάνεται συντελεστής επιτάχυνσης της επίλυσης μεγαλύτερος του 3.5, ενώ για το αντίστοιχο τρισδιάστατο πρόβλημα ο μεγαλύτερος συντελεστής που μπορεί να επιτευχθεί είναι ίσος με 2.0. Μάλιστα, παρατηρείται ότι ο συντελεστής επιτάχυνσης για το τρισδιάστατο προσομοίωμα δεν μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση περισσότερων των τεσσάρων επεξεργαστών. Επομένως, συμπεραίνεται ότι ακόμα και αν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ενός εξελιγμένου υπολογιστικού συστήματος για την επίλυση των προβλημάτων, σημαντικός συντελεστής επιτάχυνσης της επίλυσης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κυρίως απλούστερων προσομοιωμάτων. Το γεγονός αυτό ενισχύει τη λογική της ανάγκης μόρφωσης απλούστερων δισδιάστατων προσομοιωμάτων για την επίλυση ενός σύνθετου προβλήματος, τα οποία όμως θα είναι ικανά να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχ. 4.37: Σύγκριση των συντελεστών επιτάχυνσης επίλυσης του δισδιάστατου και τρισδιάστατου προσομοιώματος με τη χρήση παράλληλων επεξεργαστών.

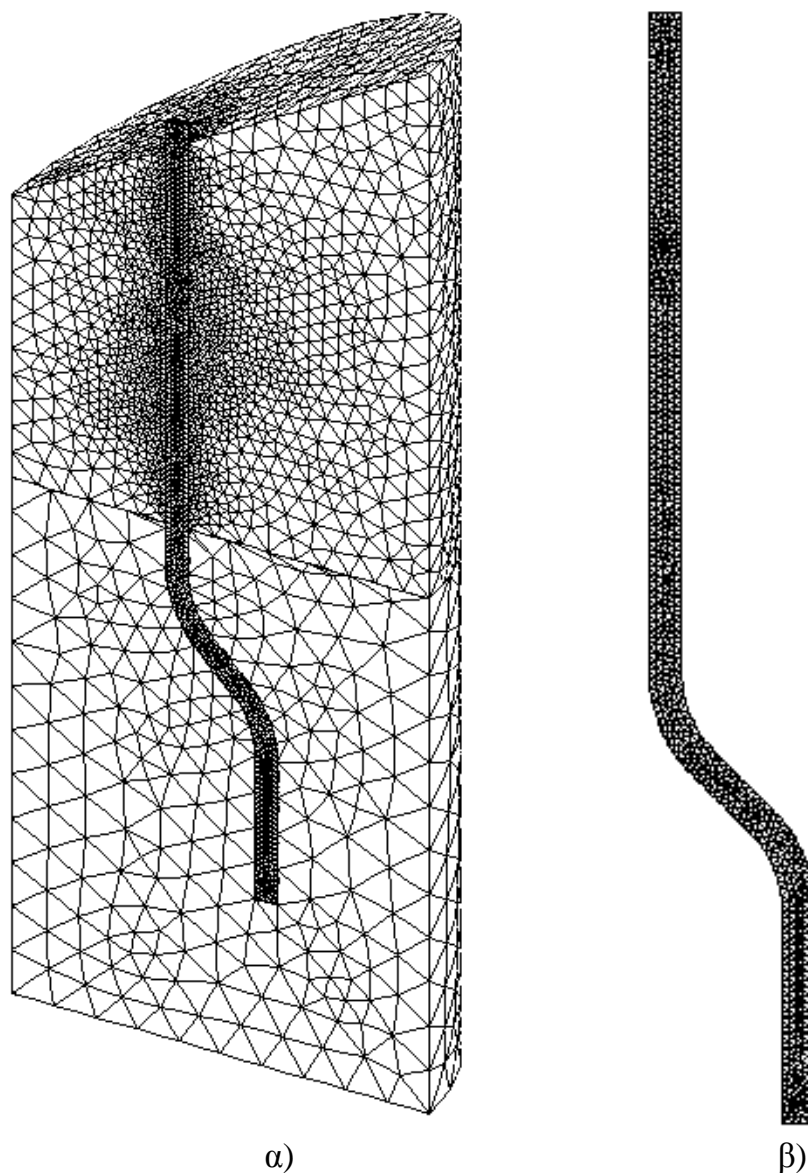
4.6 Αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς ινών με αγκιστροειδή άκρα που εξολκεύονται με διαφορετικές γωνίες φόρτισης

Στην παρούσα παράγραφο διερευνάται αριθμητικά η επιρροή της γωνίας φόρτισης της ίνας στη συμπεριφορά του συστήματος ίνας και μήτρας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης. Για το σκοπό αυτόν δημιουργούνται τα ακριβή τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα των ινών που εξολκεύονται από την τσιμεντοειδή μήτρα με γωνία 15°, 30°, 45° και 60° σε σχέση με τον άξονά τους. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις διάφορες γωνίες εξόλκευσης συγκρίνονται με εκείνα των ινών που εξολκεύονται κάθετα στο επίπεδο της

θεωρούμενης ρωγμής, δηλαδή με γωνία φόρτισης ίση με 0° . Πρόκειται ουσιαστικά για τις ίνες που μελετήθηκαν ήδη στην Παράγραφο 4.3. Η γεωμετρία του προβλήματος όπως διαμορφώνεται για κάθε θεωρούμενη γωνία φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.38. Σημειώνεται ότι η γεωμετρία της τσιμεντοειδούς μήτρας ενσωματώνει την κλίση του επιπέδου της εκάστοτε θεωρούμενης ρωγμής. Στην περίπτωση της ίνας που είναι προσανατολισμένη κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής, η δύναμη εξόλκευσης εφαρμόζεται αξονικά στην ίνα, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις η δύναμη εξόλκευσης εφαρμόζεται με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής. Εφαρμόζεται, δηλαδή, υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα της ίνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.38.

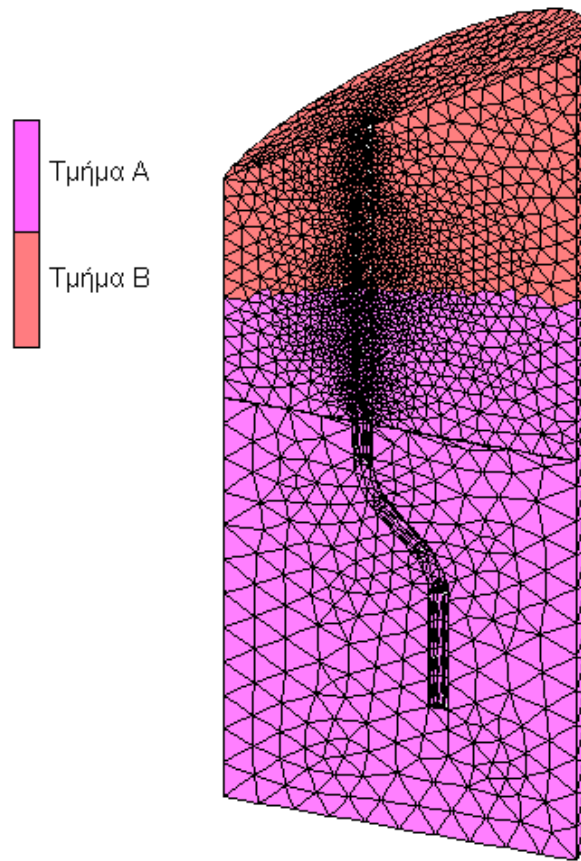
Λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας της μήτρας για κάθε περίπτωση γωνίας φόρτισης της ίνας, μορφώνονται τέσσερα νέα τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα. Η διαδικασία μόρφωσης των νέων αριθμητικών προσομοιωμάτων είναι παρόμοια με εκείνη που ακολουθήθηκε για τις ίνες που εξολκεύονται κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής και περιγράφεται στην Παράγραφο 4.3. Ίδιες παραμένουν επίσης όλες οι θεωρήσεις σε σχέση με τις ιδιότητες των υλικών, τις συνοριακές συνθήκες, τις συνθήκες επαφής και τριβής, τη διαδικασία επιβολής της φόρτισης και τη μέθοδο επίλυσης, έτσι ώστε τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που μελετώνται να είναι άμεσα συγκρίσιμα. Η διακριτοποίηση της μήτρας και της ίνας πραγματοποιείται και πάλι με τη χρήση του πεπερασμένου στοιχείου 127 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.6, §3.4.1). Στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζεται ενδεικτικά το αριθμητικό προσομοίωμα για την περίπτωση της γωνίας φόρτισης 30° μετά τη διακριτοποίηση, μαζί με λεπτομέρεια της διακριτοποιημένης ίνας.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων της λοξής εξόλκευσης ινών, επελέγη να είναι πιο πυκνή η διακριτοποίηση του ανώτερου τμήματος του όγκου της τσιμεντοειδούς μήτρας, που περιλαμβάνει το σημείο εξόδου της ίνας από αυτή, σε σχέση με τον υπόλοιπο όγκο της μήτρας. Αντίθετα, στην περίπτωση της υπό γωνία 0° εξόλκευσης της ίνας, η διακριτοποίηση όλου του όγκου της μήτρας είναι ομοιόμορφη και πιο αραιή (βλ. Σχήμα 4.13, §4.3). Παρόλο που η πυκνότερη διακριτοποίηση του ανώτερου τμήματος της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περισσότερων στοιχείων και την αύξηση του μεγέθους του αριθμητικού προβλήματος, είναι απαραίτητη για την ακριβέστερη προσομοίωση των πιθανών βλαβών στη μήτρα γύρω από το σημείο εξόδου της ίνας. Επίσης, η πυκνότερη αυτή διακριτοποίηση μπορεί να συμβάλει και στη βελτίωση της ευστάθειας του αλγορίθμου επίλυσης, καθώς οι πιθανές βλάβες της μήτρας γύρω από το σημείο εξόδου της ίνας αναμένεται να προκαλέσουν αριθμητική αστάθεια. Σημειώνεται ότι τα δύο διαφορετικής πυκνότητας διακριτοποίησης δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνουν την τσιμεντοειδή μήτρα, ενώνονται μεταξύ τους μέσω κινηματικών συνθηκών, καθώς οι κόμβοι των στοιχείων στο κοινό τους όριο δε συμπίπτουν.



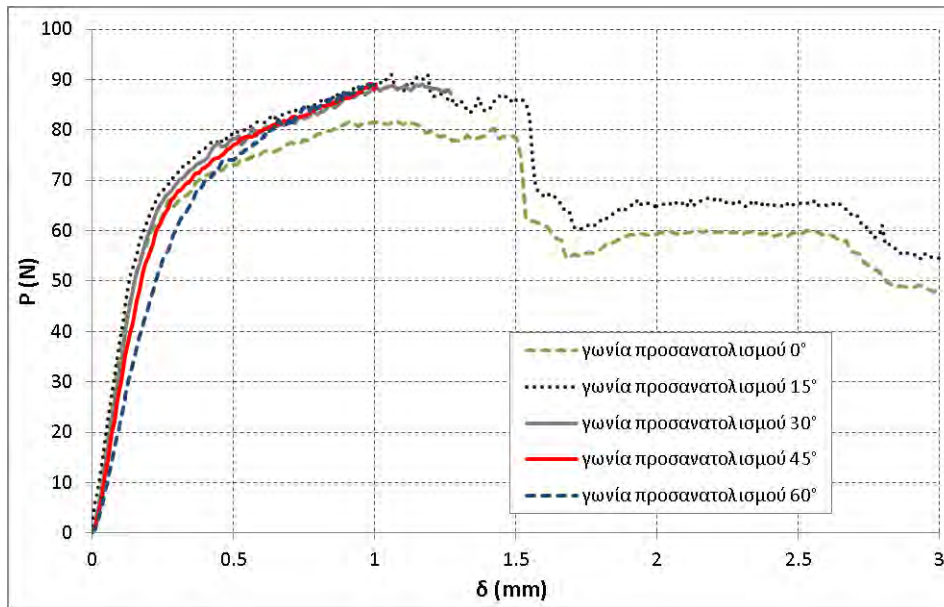
Σχ. 4.39: α) Το τρισδιάστατο προσομοίωμα του θεωρούμενου προβλήματος για γωνία φόρτισης ίση με 30° μετά τη διακριτοποίηση και β) λεπτομέρεια της διακριτοποιημένης ίνας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.40, στα αριθμητικά προσομοιώματα της λοξής εξόλκευσης ινών, το υλικό στο ανώτερο τμήμα της τσιμεντοειδούς μήτρας που είναι πιο πυκνά διακριτοποιημένο και περιλαμβάνει το σημείο εξόδου της ίνας από τη μήτρα (Τμήμα Β) θεωρείται μη-περισφιγμένο. Για το τμήμα αυτό υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 4.16. Αντίστοιχα, το κατώτερο τμήμα της μήτρας (Τμήμα Α του Σχήματος 4.40) περιλαμβάνει τη θεωρούμενη περισφιγμένη τσιμεντοειδή μήτρα, για την οποία υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 4.15. Η αντίστοιχη σχηματική απεικόνιση της διάκρισης της τσιμεντοειδούς μήτρας σε περισφιγμένη και μη-περισφιγμένη για την περίπτωση της εξόλκευσης της ίνας κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14 (§4.3).

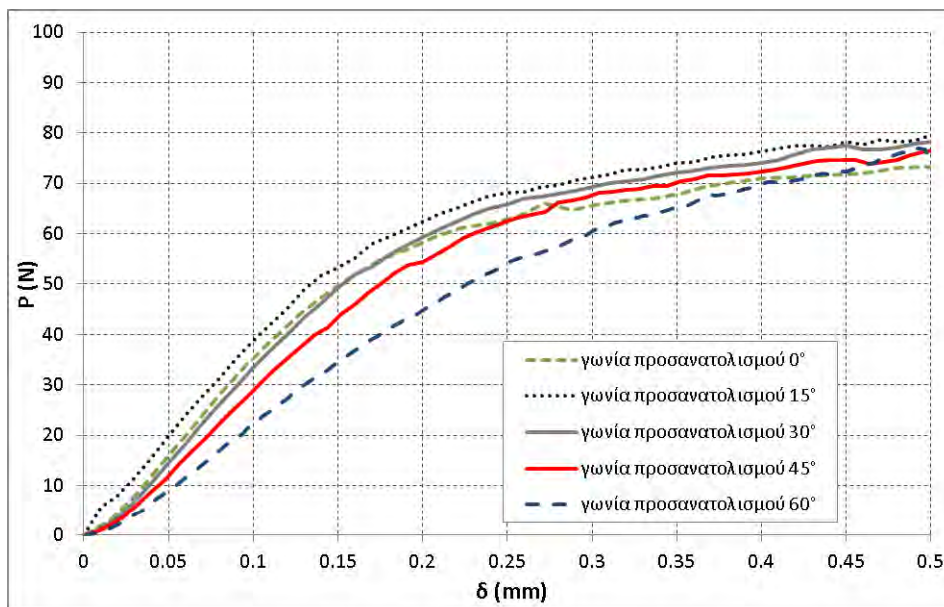


Σχ. 4.40: Σχηματική απεικόνιση της διάκρισης του υλικού της τσιμεντοειδούς μήτρας σε περισιγμένο (Τμήμα Α) και μη-περισιγμένο (Τμήμα Β), για την περίπτωση της εξόλκευσης υπό γωνία.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση ινών που εξολκεύονται με διαφορετικές γωνίες φόρτισης (0° , 15° , 30° , 45° και 60°) παρουσιάζονται και συγκρίνονται στο Σχήμα 4.41. Συγκεκριμένα, στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης όπως προκύπτουν από τα αντίστοιχα τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα, ενώ το Σχήμα 4.42 αποτελεί λεπτομέρεια του Σχήματος 4.41 για μικρές τιμές της μετατόπισης, στο οποίο παρουσιάζεται με ευκρίνεια η αρχική δυστένεια του κάθε συστήματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.41, αποτελέσματα για όλο το εύρος των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων έδωσαν τα αριθμητικά προσομοιώματα για γωνίες φόρτισης της ίνας 0° και 15° . Τα υπόλοιπα αριθμητικά προσομοιώματα δεν ήταν δυνατό να δώσουν αποτελέσματα για τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης μεγαλύτερες του 1.0 mm περίπου, λόγω αριθμητικών ασταθειών που προκάλεσαν τον πρόωρο τερματισμό του αλγορίθμου επίλυσης. Σε κάθε περίπτωση πάντως, μέσω των αποτελεσμάτων, προσδιορίζεται η δυστένεια του συστήματος και προσεγγίζεται η τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης P που είναι ενδεικτική για τη συμπεριφορά του κάθε συστήματος.



Σχ. 4.41: Σύγκριση καμπυλών δύναμης-μετατόπισης των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων εξόλκευσης της ίνας με διαφορετικές γωνίες φόρτισης.



Σχ. 4.42: Λεπτομέρεια του Σχήματος 4.41 για μικρές τιμές της μετατόπισης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, η γενικότερη συμπεριφορά κάθε συστήματος ίνας – μήτρας στο οποίο η ίνα εξολκεύεται με κάποια γωνία φόρτισης, είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά που επιδεικνύει η ίνα που εξολκεύεται κάθετα στο επίπεδο της θεωρούμενης ρωγμής (γωνία φόρτισης 0°) και περιγράφεται στην Παράγραφο 4.3. Έτσι, αρχικά και μέχρι τη μετατόπιση των 0.15 mm, η συμπεριφορά του συστήματος για κάθε περίπτωση είναι σχεδόν γραμμική. Στη συνέχεια, η ίνα αρχίζει να πλαστικοποιείται ως αποτέλεσμα της τάσης της να αλλάζει σχήμα καθώς εξολκεύεται από την τσιμεντοειδή μήτρα. Ταυτόχρονα, το τμήμα της μήτρας που βρίσκεται γύρω από το κεκαμμένο άκρο της ίνας πλαστικοποιείται, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ ίνας και μήτρας. Μετά από τη

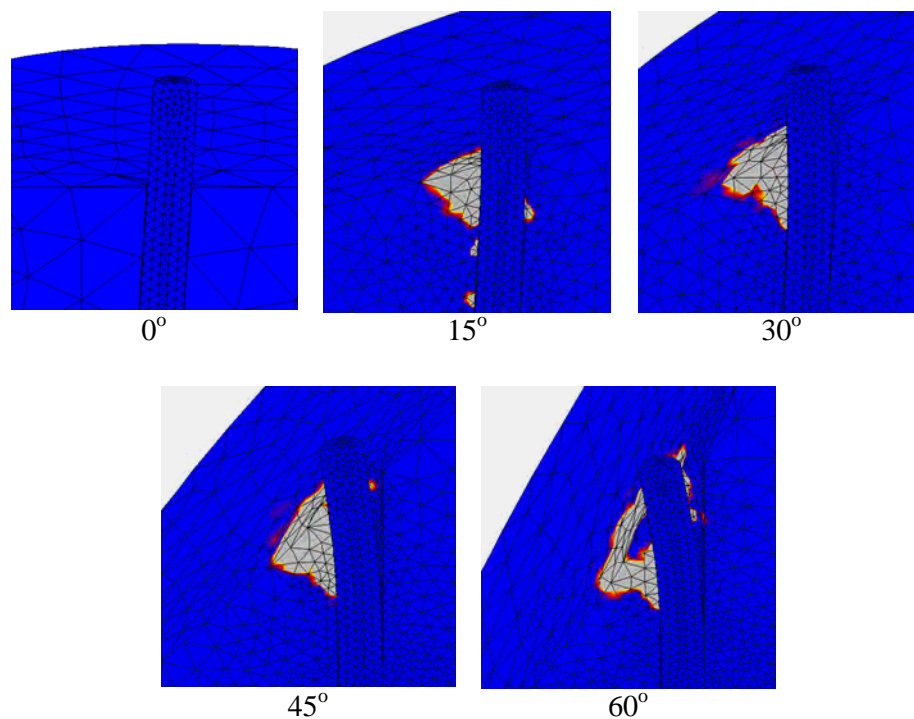
μετατόπιση των 1.5mm, οι τάσεις συνάφειας μηδενίζονται και επομένως, παρατηρείται μια απότομη σημαντική μείωση της δύναμης εξόλκευσης στις καμπύλες $P - \delta$. Στη συνέχεια, η δύναμη P αυξάνεται και πάλι λόγω των μηχανισμών επαφής και τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ ίνας και μήτρας. Τελικά, η μείωση της δύναμης εξόλκευσης ξεκινά μετά από τη μετατόπιση των 2.8 mm, οπότε η ίνα αρχίζει να χάνει σταδιακά το διπλά κεκαμμένο σχήμα της καθώς εξολκεύεται από τη μήτρα.

Από το συγκριτικό διάγραμμα του Σχήματος 4.41 φαίνεται ότι στις περιπτώσεις της λοξής εξόλκευσης ινών, η τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνη που προκύπτει από την ευθύγραμμη εξόλκευση. Επίσης, από το Σχήμα 4.42 γίνεται ξεκάθαρο ότι η αρχική δυστένεια του συστήματος διαφοροποιείται με τη μεταβολή της γωνίας φόρτισης της ίνας. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιωμάτων δείχνουν ότι καθώς η τιμή της γωνίας φόρτισης της ίνας αυξάνεται από 0° σε 15° , αυξάνεται και η δυστένεια των αντίστοιχων συστημάτων. Όμως, για περαιτέρω αύξηση της γωνίας φόρτισης μέχρι την τιμή των 30° η αρχική δυστένεια μειώνεται ελαφρώς. Έτσι, η δυστένεια του συστήματος για γωνία φόρτισης 30° είναι πολύ κοντά σε εκείνη που προκύπτει για γωνία φόρτισης 0° . Για ακόμη μεγαλύτερες γωνίες φόρτισης, η αντίστοιχη δυστένεια μειώνεται αισθητά, καταλήγοντας στη σημαντικά μειωμένη αρχική δυστένεια του συστήματος για γωνία φόρτισης ίση με 60° . Τα παραπάνω οφείλονται στο γεγονός ότι κατά τη λοξή εξόλκευση των ινών η συμπεριφορά του συστήματος επηρεάζεται από πρόσθετους μηχανισμούς, όπως η κάμψη της ίνας κοντά στο σημείο εξόδου της από τη μήτρα και οι πρόσθετες δυνάμεις επαφής και τριβής που αναπτύσσονται εκεί, καθώς και η θραύση της τσιμεντοειδούς μήτρας στην ίδια περιοχή.

Στα Σχήματα 4.43 και 4.44 παρουσιάζονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην τσιμεντοειδή μήτρα, στην περιοχή εξόδου της ίνας από τη μήτρα, για όλες τις περιπτώσεις που μελετώνται, για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις $\delta = 0.25 \text{ mm}$ και $\delta = 0.5 \text{ mm}$ αντίστοιχα. Ειδικότερα, μέσω των σχημάτων αυτών, παρουσιάζεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων για τιμές της παραμόρφωσης που ξεπερνούν την τιμή 0.005, μετά από την οποία αρχίζει η αστοχία σε θλίψη της τσιμεντοειδούς μήτρας λόγω εξάντλησης της θλιπτικής αντοχής της. Σημειώνεται ότι οι τιμές της παραμόρφωσης στις πλαστικοποιημένες περιοχές (που απεικονίζονται με γκρι χρώμα) έχουν ξεπεράσει το όριο του 0.005, έχουν δηλαδή καταστεί πρακτικά ανενεργές. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν την περιοχή της μήτρας που θρυμματίζεται κατά τη δοκιμή εξόλκευσης μιας ίνας με γωνία προσανατολισμού σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής, φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί και σε πειραματικές μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας (Li et al. 1990, Cailleux et al. 2005).

Καταρχήν, και στα δύο αυτά σχήματα είναι προφανής η απουσία οποιασδήποτε βλάβης της τσιμεντοειδούς μήτρας στην περίπτωση της ευθύγραμμης εξόλκευσης της ίνας, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο. Αντίθετα, σε όλες τις περιπτώσεις της λοξής εξόλκευσης των ινών παρατηρείται η ανάπτυξη κωνικών σχηματισμών στην τσιμεντοειδή μήτρα, που αντιπροσωπεύουν τον όγκο του τσιμεντοκονιάματος που χάνει τη θλιπτική του αντοχή και

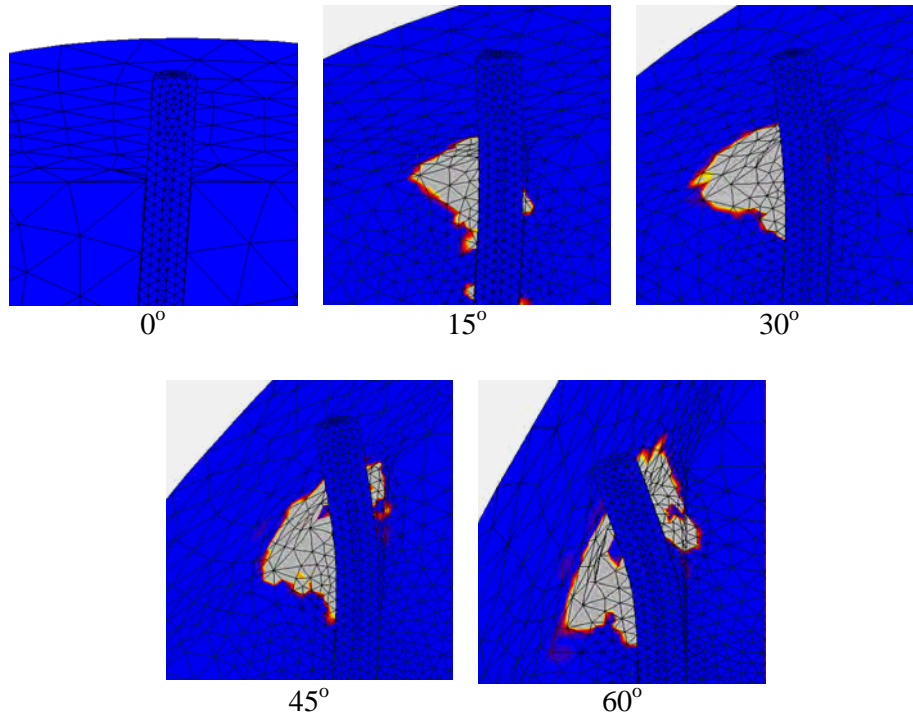
δε δύναται να αντισταθεί περαιτέρω στην εξόλκευση. Επίσης, παρατηρείται ότι για την ίδια επιβαλλόμενη μετατόπιση, το μέγεθος του κωνικού αυτού σχηματισμού μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η γωνία φόρτισης. Ακόμη, φαίνεται ότι για την ίδια τιμή της γωνίας φόρτισης, το μέγεθος του όγκου του αποδιοργανωμένου τσιμεντοκονιάματος αυξάνεται με την εξέλιξη της εξόλκευσης. Στην εμφάνιση και ανάπτυξη των κωνικών αυτών όγκων ανενεργού υλικού αποδίδεται η διαφοροποίηση της αρχικής δυστένειας του κάθε συστήματος, που παρατηρείται στο Σχήμα 4.42 για τις μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχ. 4.43: Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας στην περιοχή εξόδου της ίνας, για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 0.25$ mm.

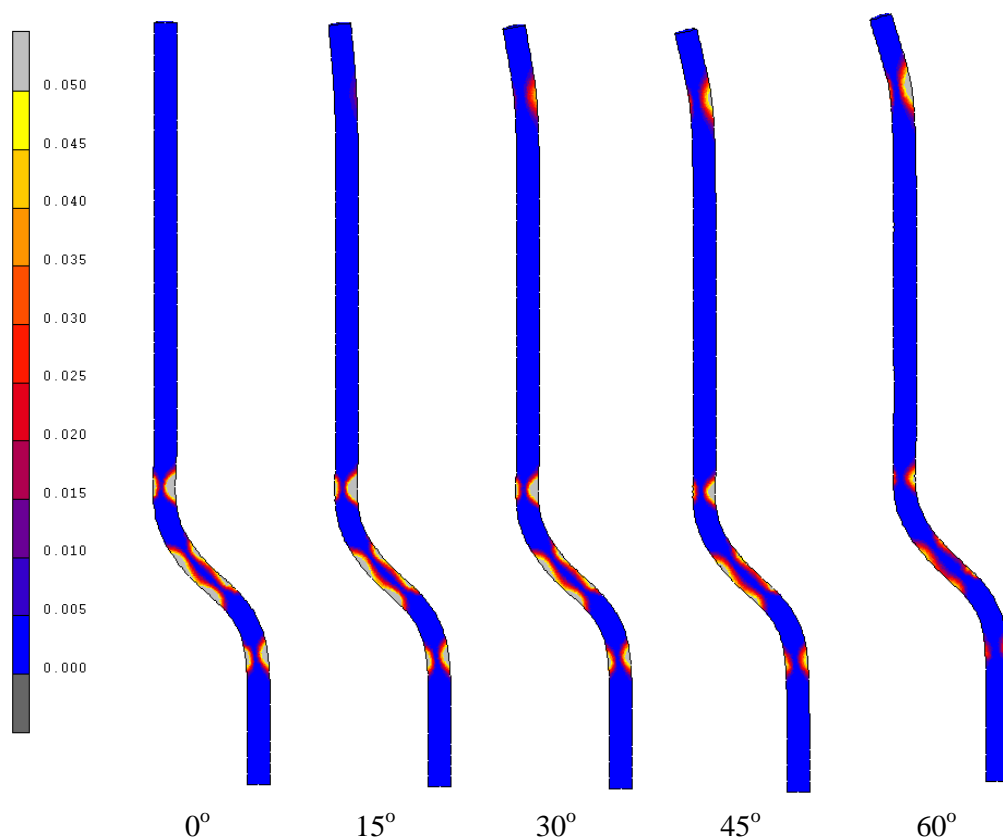
Στο Σχήμα 4.45 παρουσιάζονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην ίνα κατά την εξόλκευση, για τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης ίση με 0.5 mm. Αρχικά παρατηρείται ότι οι τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε διάφορα σημεία του κεκαμμένου άκρου της ίνας, ως αποτέλεσμα της τάσης της να αλλάζει σχήμα καθώς εξολκεύεται από την τσιμεντοειδή μήτρα, είναι όμοιες για όλες τις γωνίες φόρτισης που μελετώνται. Παρατηρείται όμως και κάποια διαφοροποίηση στα πεδία πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην περίπτωση της ευθύγραμμης και της λοξής εξόλκευσης, καθώς κατά τη λοξή εξόλκευση των ινών εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις και στο άνω άκρο των ινών, κοντά στο σημείο εξόδου τους από την τσιμεντοειδή μήτρα, λόγω κάμψης. Μάλιστα, φαίνεται ότι για μεγαλύτερες γωνίες φόρτισης, αναπτύσσονται μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις στο συγκεκριμένο σημείο για την ίδια τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στην εντονότερη κάμψη που υφίσταται το άκρο της ίνας καθώς εξολκεύεται. Αυτό συνεπάγεται επίσης την ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων τριβής

μεταξύ ίνας και μήτρας στην περιοχή αυτή. Οι μεγαλύτερες αυτές δυνάμεις καθιστούν κρίσιμη την αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας στη συγκεκριμένη περιοχή. Με βάση τα παραπάνω μπορούν να αιτιολογηθούν οι αυξημένες τιμές της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης P που προκύπτουν κατά τη λοξή εξόλκευση των ινών σε σχέση με την περίπτωση της ευθύγραμμης εξόλκευσης.



Σχ. 4.44: Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας στην περιοχή εξόδου της ίνας, για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 0.5$ mm.

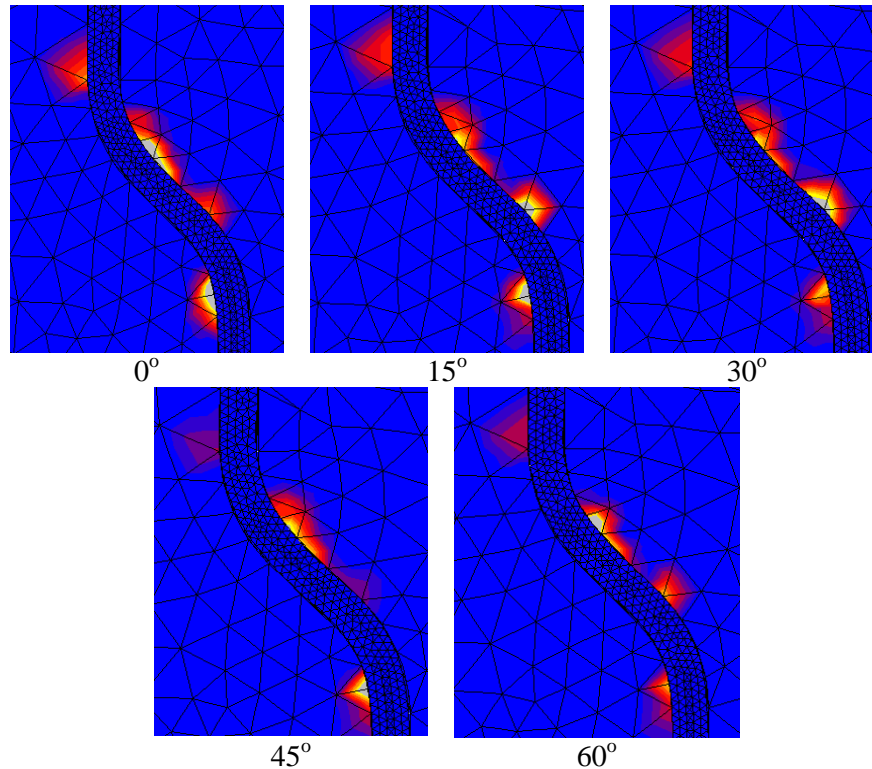
Στο Σχήμα 4.46 παρουσιάζονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην τσιμεντοειδή μήτρα γύρω από το κεκαμμένο άκρο της ίνας, για μετατόπιση ίση με 0.5 mm, όπως προκύπτουν για την κάθε περίπτωση λοξής εξόλκευσης που μελετάται, καθώς και για την περίπτωση της ευθύγραμμης εξόλκευσης. Παρατηρείται ότι τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων της μήτρας είναι όμοια, σε σχέση με το σχήμα τους και την περιοχή όπου εμφανίζονται, για όλες τις περιπτώσεις, ανεξάρτητα από τη γωνία φόρτισης της ίνας. Σχετικά με τα μεγέθη των πλαστικών παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας, παρατηρείται ότι οι τιμές είναι ελαφρώς μικρότερες για μεγαλύτερες γωνίες φόρτισης, για την ίδια όμως επιβαλλόμενη μετατόπιση. Αυτό συμβαίνει διότι για τις μεγαλύτερες γωνίες φόρτισης οι τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της ίδιας επιβαλλόμενης μετατόπισης είναι μικρότερες, με αποτέλεσμα η εξέλιξη της εξόλκευσης της ίνας να καθυστερεί κατά μερικά βήματα φόρτισης. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στο Σχήμα 4.45, σε σχέση με τα πεδία πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο κεκαμμένο άκρο της ίνας.



Σχ. 4.45: Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων των χαλύβδινων ινών για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 0.5$ mm.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα ενότητα διερευνάται αριθμητικά η επιρροή της γωνίας φόρτισης της ίνας στη συμπεριφορά του συστήματος ίνας και μήτρας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης, μέσω τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων. Αποδεικνύεται ότι τα αριθμητικά προσομοιώματα είναι ικανά να προσομοιώσουν όλα τα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν τη λοξή εξόλκευση των ινών και έχουν παρατηρηθεί σε αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως την κάμψη της ίνας στο σημείο εξόδου της από τη μήτρα και την εμφάνιση στην ίδια περιοχή κωνικών σχηματισμών στη μήτρα που αντιπροσωπεύουν το θρυμματισμό του τσιμεντοκονιάματος λόγω της απώλειας της θλιπτικής του αντοχής. Ταυτόχρονα βέβαια, αποδίδονται και φαινόμενα κοινά με την περίπτωση της ευθύγραμμης εξόλκευσης των ινών, όπως η δημιουργία τοπικών πλαστικών παραμορφώσεων στο κεκαμμένο άκρο της ίνας και η πλαστικοποίηση της μήτρας στη γύρω περιοχή. Όλα τα προαναφερθέντα φαινόμενα αλληλεπιδρούν, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του συστήματος ίνας-μήτρας κατά την εξόλκευση. Η παρατήρηση της εξέλιξης των φαινομένων αυτών μέσω των πεδίων τάσεων και παραμορφώσεων γενικώς δε συνεισφέρει στην κατανόηση της αλληλεπίδρασής τους που είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Γενικά δεν είναι εύκολο να διακριθεί για κάθε περίπτωση ο μηχανισμός που είναι κρίσιμος για τη διαμόρφωση της συμπεριφοράς του συστήματος. Εκτίμηση για το ποιό μηχανισμοί είναι κρίσιμότεροι στην κάθε περίπτωση μπορεί να γίνει μόνο μέσω της παρατήρησης των καμπυλών $P-\delta$. Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιωμάτων για εξόλκευση της ίνας με γωνίες φόρτισης ίσες με 0° , 15° , 30° , 45° και 60° , προκύπτει ότι η

μεγαλύτερη αρχική δυστένεια εμφανίζεται για γωνία φόρτισης ίση με 15° , ενώ για γωνίες μεγαλύτερες των 30° η αρχική δυστένεια μειώνεται σημαντικά. Στις καμπύλες $P-\delta$ που προκύπτουν για τις περιπτώσεις της λοξής εξόλκευσης, η διαφοροποίηση αυτή στην αρχική δυστένεια δε συνοδεύεται από αντίστοιχη διαφοροποίηση στις τιμές της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης. Μάλιστα, προκύπτει περίπου η ίδια τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης για τις γωνίες φόρτισης 15° , 30° , 45° και 60° . Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές αυτές είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από την αντίστοιχη τιμή της δύναμης που προκύπτει για την ευθύγραμμη εξόλκευση της ίνας.



Σχ. 4.46: Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 0.5 \text{ mm}$.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα πειραματικών μελετών πάνω στη δοκιμή εξόλκευσης ινών με γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση φόρτισης που περιλαμβάνονται στη διεθνή βιβλιογραφία (§2.3) είναι αντικρουόμενα σε σχέση με την τιμή της γωνίας προσανατολισμού της ίνας για την οποία προκύπτει η μεγαλύτερη τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης (Banthia και Trottier 1994, Robins et al. 2002, Cailleux et al. 2005, Cuhna et al 2007). Επομένως, η επιρροή της γωνίας προσανατολισμού της ίνας στη συμπεριφορά του συστήματος ίνας-μήτρας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης και ειδικότερα στην προκύπτουσα τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης μπορεί να διαφέρει για κάθε περίπτωση, ανάλογα με τη γεωμετρία της ίνας, το υλικό και την αντοχή της, καθώς και την αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας.

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑ

5.1 Εισαγωγή

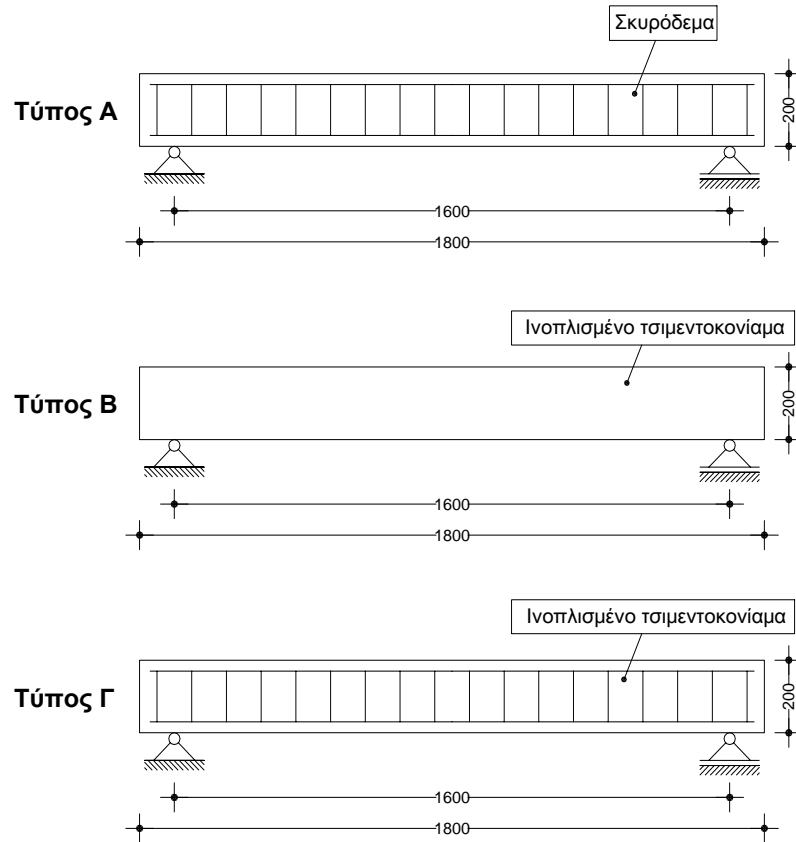
Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η αριθμητική προσομοίωση της καμπτικής συμπεριφοράς δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Μελετώνται δύο τύποι δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε στατική μονοτονική και στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ο πρώτος τύπος δοκών περιλαμβάνει δοκούς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό, ενώ ο δεύτερος τύπος αφορά δοκούς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό. Για λόγους σύγκρισης μελετάται και μία όμοια συμβατική δοκός Ο/Σ. Όλες οι προαναφερθείσες δοκοί αρχικά υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Φίλιππου Περγιάκη. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των δοκιμών αυτών. Ακολούθως, περιγράφονται τα αριθμητικά προσομοιώματα των παραπάνω δοκών, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά, με σκοπό την αξιολόγηση της διαδικασίας προσομοίωσης.

5.2 Χαρακτηριστικά των μελετώμενων δοκών

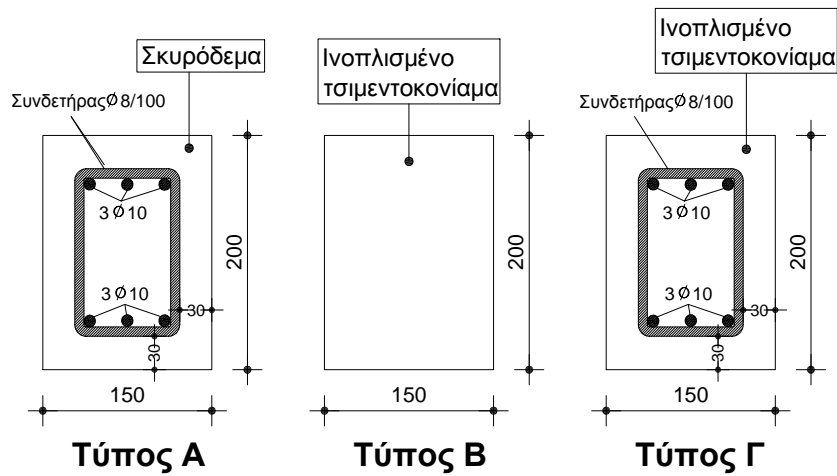
5.2.1 Γεωμετρία

Αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου αποτελούν τρεις διαφορετικοί τύποι δοκών: μία συμβατική δοκός Ο/Σ (Τύπος Α), μία δοκός ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β) και μία δοκός ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος οπλισμένη με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό (Τύπος Γ). Για τις παραπάνω δοκούς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι κοινά και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1. Πρόκειται για αμφιέριστες δοκούς με άνοιγμα 1600 mm.

Η διατομή της κάθε δοκού είναι ορθογωνική με διαστάσεις 150×200 mm. Οι δοκοί Τύπου Α και Γ είναι οπλισμένες με τρεις διαμήκεις χαλύβδινες ράβδους άνω και κάτω, διαμέτρου 10 mm (3Ø10) και με δίμητους συνδετήρες διαμέτρου 8 mm, τοποθετημένους σε απόσταση 100 mm (Ø8/100). Η επικάλυψη (σκυροδέματος ή τσιμεντοκονιάματος) είναι ίση με 30 mm. Οι δοκοί Τύπου Β δεν διαθέτουν διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό (Σχήμα 5.2).



Σχ. 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκών Τύπου Α, Β και Γ (διαστάσεις σε mm).



Σχ. 5.2: Οι διατομές των δοκών Τύπου Α, Β και Γ (διαστάσεις σε mm).

5.2.2 Υλικά

Τσιμεντοειδής μήτρα

Για τις δοκούς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύποι Β και Γ) χρησιμοποιήθηκε τσιμεντοειδής μήτρα υψηλής αντοχής με την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου/κύβου προέκυψε ίση με 69.2/82.2 MPa, σύμφωνα με τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης που διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ. σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm και κυβικά δοκίμια 150×150×150 mm, αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή κάμψης της τσιμεντοειδούς μήτρας προσδιορίστηκε μέσω μιας σειράς δοκιμών κάμψης σε δοκίμια ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος 40×40×160 mm σύμφωνα με τον EN 196_1, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή κ. Σ. Κόλια. Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής κάμψης υπολογίστηκε μέσω της αντοχής πρώτης ρηγμάτωσης των προαναφερθέντων δοκιμίων, ίση με 8 MPa. Η σύνθεση της τσιμεντοειδούς μήτρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1.

Χαλύβδινες ίνες

Το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος είναι $v_f = 0.8\%$. Οι χαλύβδινες ίνες είναι ίδιες με αυτές που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 4, με αγκιστροειδή άκρα και κυκλική διατομή διαμέτρου $d_f = 0.4$ mm και λόγο μήκους προς διάμετρο $l_f/d_f = 70$ (Σχήμα 4.1). Σύμφωνα με τον κατασκευαστή των ινών, η ονομαστική τάση διαρροής του χάλυβα των ινών είναι 1400 MPa.

Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα της συμβατικής δοκού Ο/Σ (Τύπος Α) έχει μέση εφελκυστική αντοχή $f_{cm} = 2.34$ MPa και μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου/κύβου ίση με 28.1/32.1 MPa, σύμφωνα με τις δοκιμές που διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ. σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm και κυβικά δοκίμια 150×150×150 mm, αντίστοιχα. Καθώς για την τσιμεντοειδή μήτρα υιοθετείται στα αριθμητικά προσομοιώματα η εφελκυστική αντοχή κάμψης και με σκοπό την ύπαρξη πλήρους αντιστοιχίας μεταξύ των προσομοιωμάτων, υιοθετείται και για το συμβατικό σκυρόδεμα εφελκυστική αντοχή κάμψης ίση με 3.64 MPa. Η μέση εφελκυστική αντοχή κάμψης $f_{cm,fl}$ υπολογίζεται με βάση τη μέση εφελκυστική αντοχή f_{cm} σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 του Μέρους 1-1 του Ευρωκώδικα 2 (EN 1992.01.01 2004) ως εξής:

$$f_{cm,fl} = \max \left\{ (1.6 - h/1000) f_{cm}; f_{cm} \right\} = 3.3 \text{ MPa}, \quad (5.1)$$

όπου h είναι το συνολικό ύψος της διατομής του μέλους.

Χάλυβας οπλισμού

Ο χάλυβας των ράβδων του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού των δοκών Τύπου Α και Γ έχει τάση διαρροής ίση με 550 MPa.

Πίνακας 5.1

Η σύνθεση της τσιμεντοειδούς μήτρας.

Τσιμέντο	682 kg/m ³
Στερεά πρόσθετα (συνήθη αντιδρώντα συστατικά)	13.9 kg/m ³
Λεπτόκοκκη άμμος	1421 kg/m ³
Νερό	231 kg/m ³
Υπερ-ρευστοποιητής	9.1 kg/m ³

5.2.3 Εκτίμηση της συμπεριφοράς της δοκού Ο/Σ

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 9 του Μέρους 1-1 του Ευρωκώδικα 2 (EN 1992.01.01 2004) υπολογίζεται το συνολικό εμβαδό του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού A_s , καθώς και το ελάχιστο εμβαδό $A_{s,min}$ και μέγιστο εμβαδό $A_{s,max}$ για τη δοκό Τύπου Α ως εξής:

$$A_s = 3\pi d^2/4 = 2.36 \text{ cm}^2, \quad (5.2)$$

$$A_{s,min} = 0.26 \frac{f_{cm}}{f_{yk}} b_l d = 0.28 \text{ cm}^2, \quad (5.3)$$

$$A_{s,max} = 0.04 A_c = 12 \text{ cm}^2, \quad (5.4)$$

όπου b_l είναι το πλάτος της εφελκόμενης ζώνης, d είναι το ενεργό ύψος της διατομής (effective depth of the cross-section) και A_c είναι το εμβαδό διατομής του σκυροδέματος. Επομένως, αναμένεται όλκιμη συμπεριφορά της δοκού με διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού αρχικά και στη συνέχεια, αστοχία λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος.

5.2.4 Τύποι φόρτισης

Οι δοκοί Τύπου Α υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση και σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι δοκοί Τύπου Β υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική και στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση μίας κατεύθυνσης (θετική ροπή κάμψης). Τέλος, οι δοκοί Τύπου Γ υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική και στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στην περίπτωση της κάμψης τριών σημείων η φόρτιση εφαρμόζεται στο μέσο του ανοίγματος της δοκού, ενώ στην περίπτωση της κάμψης τεσσάρων σημείων η φόρτιση εφαρμόζεται σε δύο σημεία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος της δοκού σε απόσταση 190 mm από αυτό.

5.3 Πειραματικές δοκιμές κάμψης δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Για τις δοκιμές κάμψης των μελετώμενων δοκών χρησιμοποιήθηκε σερβουδραυλικό σύστημα MTS ± 250 kN σε ειδικά διαμορφωμένο πλαίσιο αντίδρασης που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε δύο σημεία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος της δοκού, μέσω μιας ειδικής διάταξης δοκών και πλακών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Η πειραματική διάταξη για μονοτονική φόρτιση κάμψης τριών σημείων είναι όμοια με την προηγούμενη, με μοναδική διαφορά το σημείο επιβολής του φορτίου. Και στις δύο περιπτώσεις το φορτίο ασκήθηκε με σταθερή ταχύτητα επιβολής της μετατόπισης του εμβόλου. Η καταγραφή των μετρήσεων περιλαμβάνει τη μετατόπιση του εμβόλου της μηχανής, το επιβαλλόμενο φορτίο και το μέγιστο βέλος κάμψης της δοκού (σύστημα καταγραφής National Instruments-SCXI). Για την καταγραφή του μέγιστου βέλους κάμψης της δοκού χρησιμοποιήθηκαν δύο μηχανοσκόπετρα DCDT (Direct Current Differential Transformer), καθένα από τα οποία τοποθετήθηκε σε κάθε πλευρά της δοκού στο μέσο του ανοίγματος. Τα μηχανοσκόπετρα αναρτήθηκαν σε κοιλοδοκούς αλουμινίου αμφιέριστα εδρασμένες μέσω άρθρωσης-κύλισης σε μεταλλικές ράβδους $\varnothing 8$, που τοποθετήθηκαν στις θέσεις των στηρίξεων και διαπερνούσαν το δοκίμιο στο μέσο του ύψους του (Σχήμα 5.3). Το μέγιστο βέλος κάμψης προέκυψε ως η μέση τιμή των μετρήσεων των δύο μηχανοσκόπετρων.

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την επιβολή στατικής ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων. Η επιβολή του φορτίου στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης πραγματοποιήθηκε μέσω ειδικής διάταξης, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή του φορτίου από το έμβολο με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων πραγματοποιήθηκε μέσω μιας δοκού HEB120, στο κάτω μέρος της οποίας, κοχλιώθηκαν δύο μεταλλικές πλάκες. Οι πλάκες αυτές βρίσκονταν σε επαφή με δύο μεταλλικά πλακίδια που με τη σειρά τους βρίσκονταν σε επαφή με τη δοκό, εφαρμόζοντας σε αυτή το επιβαλλόμενο φορτίο, σε απόσταση 190 mm εκατέρωθεν του μέσου της δοκού. Για τη φόρτιση των δοκιμών προς την αντίθετη φορά, τοποθετήθηκαν σε αντίστοιχες θέσεις στο κάτω μέρος της δοκού, μεταλλικές πλάκες όμοιες με εκείνες του άνω τμήματος της δοκού. Οι μεταλλικές αυτές πλάκες συνδέθηκαν ανά ζεύγη μεταξύ τους με τέσσερις ντιζες $\varnothing 20$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4. Ομοίως, στις θέσεις των στηρίξεων, τοποθετήθηκαν στο πάνω μέρος των δοκών στηρίξεις (άρθρωση και κύλιση), αντίστοιχες με εκείνες που βρίσκονται στο κάτω μέρος, με τις οποίες ήρθαν σε επαφή οι μεταλλικές πλάκες. Στις θέσεις των στηρίξεων της δοκού, η παραπάνω διάταξη συνδέθηκε με τη μεταλλική δοκό της βάσης του πλαισίου μέσω τεσσάρων ντιζών $\varnothing 20$ μήκους 140 cm, έτσι ώστε να παραμείνουν σταθερές οι στηρίξεις και κατά την αντιστροφή της φόρτισης. Το μέγιστο βέλος κάμψης μετρήθηκε και σε αυτή την περίπτωση με τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω.



Σχ. 5.3: Πειραματική διάταξη για δοκούς σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση.



Σχ. 5.4: Πειραματική διάταξη για δοκούς σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Καθώς οι πειραματικές δοκιμές κάμψης των υπό μελέτη δοκών δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής, αλλά χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων που βασίζονται σε αυτές, δεν κρίνεται σκόπιμη σε αυτό το σημείο η παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα θα παρουσιαστούν παρακάτω, κατά τη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα αριθμητικά. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις πειραματικές δοκιμές κάμψης, για τα πειραματικά αποτελέσματα και εκτενής σχολιασμός αυτών μπορούν να βρεθούν στην εργασία των Παπαθεοχάρης, Περδικάρης και Τζάρος (2008).

5.4 Αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης

Κατά τη διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης των δοκιμών κάμψης των δοκών Ο/Σ και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, εμφανίστηκαν κάποιες δυσκολίες λόγω της ύπαρξης έντονων μη-γραμμικών φαινομένων, όπως η ρηγμάτωση του σκυροδέματος και της τσιμεντοειδούς μήτρας, η μεταφορά των εφελκυστικών τάσεων στις ίνες μετά τη ρηγμάτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας, η αστοχία των ινών και η πλαστικοποίηση των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού. Μια ακόμη πηγή αριθμητικής αστάθειας αποτέλεσε η διαδικασία επιβολής της φόρτισης, όπως θα περιγραφεί στην Ενότητα 5.4.3.

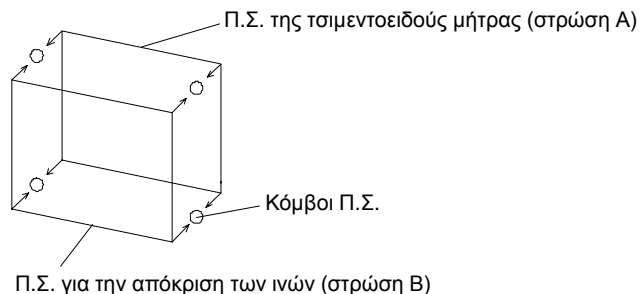
Γενικά, ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα αναμένεται να είναι ρεαλιστικό και αξιόπιστο λόγω της φύσης των πεπερασμένων στοιχείων από τα οποία αποτελείται, που μπορούν να αναπαράγουν αποτελεσματικά το φαινόμενο της κάμψης καθώς και τα πεδία των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται. Έχει όμως ταυτόχρονα, το σημαντικό μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Επομένως, κρίθηκε σκόπιμη η μόρφωση απλούστερων δισδιάστατων προσομοιωμάτων, ικανών να αποτυπώνουν με ακρίβεια τη γενική συμπεριφορά του υπό μελέτη προβλήματος. Για την απόκτηση της απαιτούμενης εμπειρίας και τη διαπίστωση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου δισδιάστατης προσομοίωσης, αποφασίστηκε αρχικά η μόρφωση και ο έλεγχος ενός απλού αριθμητικού προσομοιώματος. Για το λόγο αυτό μελετάται αρχικά η συμπεριφορά μιας συμβατικής δοκού Ο/Σ σε στατική μονοτονική κάμψη τριών σημείων. Αρχικά, μορφώνεται ένα λεπτομερές τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα και στη συνέχεια δημιουργείται το αντίστοιχο δισδιάστατο προσομοίωμα, η αξιολόγηση του οποίου επιβεβαιώνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα αντίστοιχα του τρισδιάστατου προσομοιώματος αλλά και της αντίστοιχης πειραματικής δοκιμής. Στις επόμενες υποπαραγράφους περιγράφεται η μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης που ακολουθήθηκε.

5.4.1 Προσομοίωση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Η απόκριση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος προσομοιώνεται μέσω του συνυπολογισμού της συμπεριφοράς των δύο συστατικών του, δηλαδή των χαλύβδινων ινών και της τσιμεντοειδούς μήτρας. Η συνεισφορά της τσιμεντοειδούς μήτρας προσομοιώνεται μέσω μιας στρώσης πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης έντασης (στρώση Α), με τις μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες της μήτρας. Η συνεισφορά των χαλύβδινων ινών λαμβάνεται υπόψη μέσω μιας δεύτερης στρώσης πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης έντασης (στρώση Β), πανομοιότυπης από πλευράς γεωμετρίας με εκείνη που προσομοιώνει την τσιμεντοειδή μήτρα. Τα δύο πανομοιότυπα επίπεδα Π.Σ. τοποθετούνται στην ίδια ακριβώς θέση και συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να έχουν κοινούς κόμβους και επομένως, κοινές μετατοπίσεις (Σχήμα 5.5). Οι ίνες (στρώση Β) ουσιαστικά θεωρούνται ως ένα ομογενοποιημένο στρώμα υλικού, για το οποίο υιοθετείται ένα ισοδύναμο πάχος t_f , που προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$t_f = t_c \times a_f \times v_f, \quad (5.5)$$

όπου t_c είναι το πάχος των στοιχείων της τσιμεντοειδούς μήτρας, $v_f = 0.8\%$ είναι το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και $a_f = 0.5$ είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ινών στο μίγμα (Padmarajaiah και Ramaswamy 2002).



Σχ. 5.5: Σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης των Π.Σ. της τσιμεντοειδούς μήτρας και της απόκρισης των ινών σε κοινούς κόμβους.

5.4.2 Προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών

Οι νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων που λαμβάνονται υπόψη για το σκυρόδεμα και για το χάλυβα οπλισμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6α και β, αντίστοιχα. Η απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός φθίνοντος κλάδου με κλίση K_s^C . Το μέτρο ελαστικότητας για το σκυρόδεμα τίθεται ίσο με 32 GPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.16$. Το μέτρο ελαστικότητας για το χάλυβα του οπλισμού είναι ίσο με 210 GPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$. Σημειώνεται ότι για το συμβατικό σκυρόδεμα δε λαμβάνεται υπόψη η μείωση της θλιπτικής του αντοχής με την αύξηση της παραμόρφωσης στις μη-περισφιγμένες περιοχές.

Για την τσιμεντοειδή μήτρα θεωρείται ελαστοπλαστική συμπεριφορά σε θλίψη, και σε εφελκυσμό θεωρείται ότι ρηγματώνεται μετά την εξάντληση της εφελκυστικής της αντοχής. Για την προσομοίωση του υλικού, θεωρούνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις για τη συμπεριφορά της μήτρας σε θλίψη, ανάλογα με τις συνθήκες περισφιγξης. Για τις περιοχές της τσιμεντοειδούς μήτρας που περικλείονται από εγκάρσιο οπλισμό και επομένως θεωρούνται περισφιγμένες, υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 5.6γ, ενώ για τις περιοχές που δεν περικλείονται από εγκάρσιο οπλισμό και άρα είναι μη-περισφιγμένες, υιοθετείται ο νόμος του Σχήματος 5.6δ. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, η θλιπτική αντοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας σχεδόν μηδενίζεται για παραμόρφωση μεγαλύτερη του 0.005 (Paranikolaou και Karros 2007). Ο φθίνων κλάδος που αντιπροσωπεύει την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας κατά τη ρηγμάτωση έχει κλίση K_s^M ίση με την αντίστοιχη για το συμβατικό σκυρόδεμα. Το μέτρο ελαστικότητας για την τσιμεντοειδή μήτρα λαμβάνεται ίσο με 35.5 GPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.2$.

Ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που υιοθετείται για το ισοδύναμο ομογενοποιημένο υλικό που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των χαλύβδινων ινών παρουσιάζεται στο

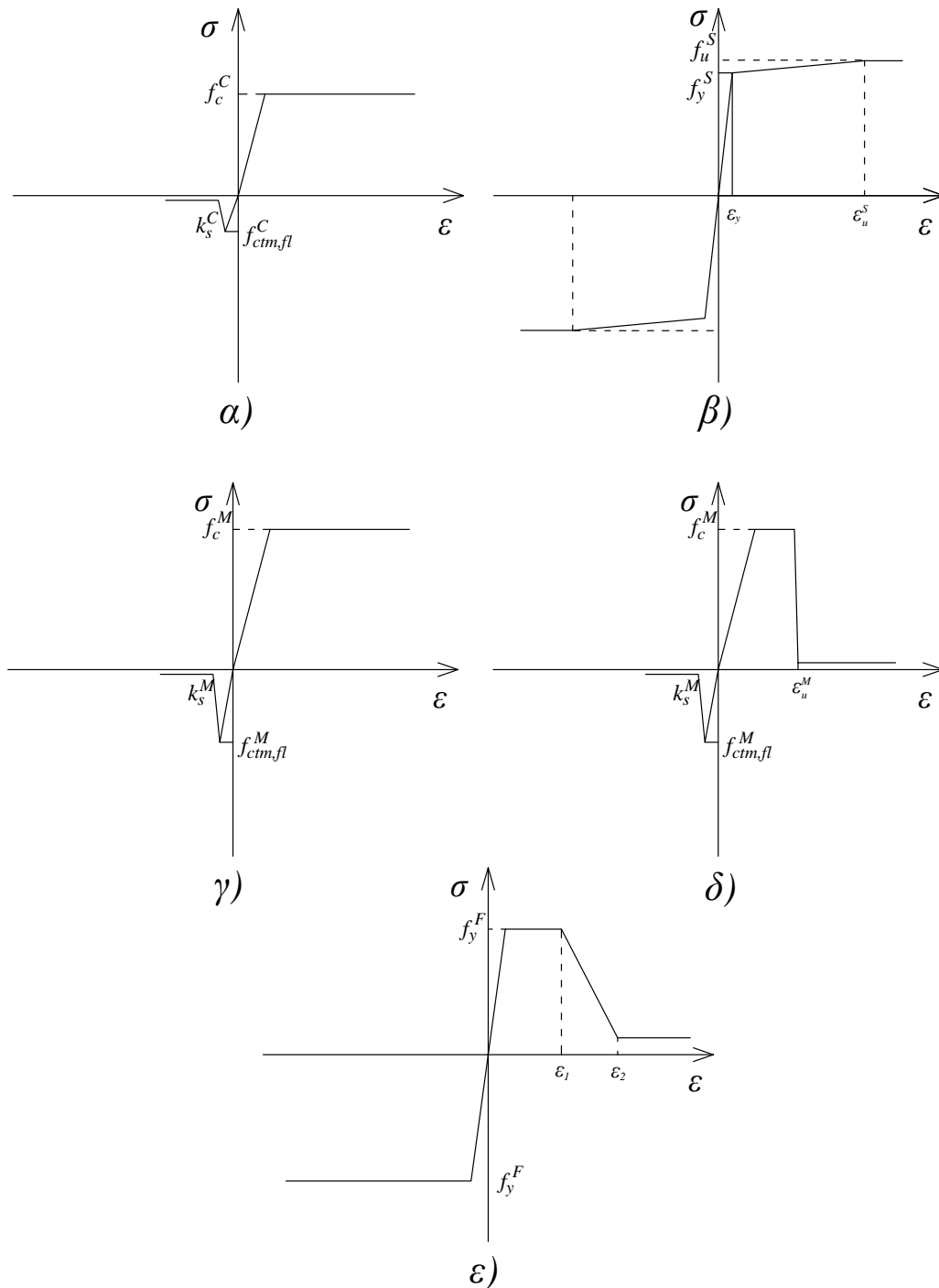
Σχήμα 5.6ε. Ουσιαστικά, η σχέση αυτή προσομοιώνει και το φαινόμενο της σταδιακής εξόλκευσης των ινών από την τσιμεντοειδή μήτρα, μέσω του φθίνοντα κλάδου μεταξύ των τιμών της παραμόρφωσης ε_1 και ε_2 . Οι χαρακτηριστικές τιμές παραμόρφωσης ε_1 και ε_2 προκύπτουν βάσει αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών κάμψης, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Α. Συνοπτικά, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση σε σχέση με τις τιμές της παραμόρφωσης ε_1 και ε_2 και στη συνέχεια, τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό Τύπου Γ υπό στατική μονοτονική φόρτιση τεσσάρων σημείων. Οι χαρακτηριστικές τιμές ε_1 και ε_2 επελέγησαν ύστερα από τη σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Το μέτρο ελαστικότητας για τις χαλύβδινες ίνες λαμβάνεται ίσο με 210 GPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$. Σημειώνεται ότι για την τάση διαρροής του ισοδύναμου ομογενοποιημένου υλικού των ινών υιοθετείται τιμή ίση με 950 MPa, όπως εξηγείται επίσης στο Παράρτημα Α. Περιληπτικά, η τιμή αυτή προέκυψε ύστερα από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων μιας παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με την τάση διαρροής και των πειραματικών αποτελεσμάτων μιας σειράς δοκιμών κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων της δοκού Τύπου Β υπό στατική μονοτονική φόρτιση.

Οι ιδιότητες των υλικών, καθώς και οι χαρακτηριστικές τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων των νόμων που υιοθετούνται κατά την αριθμητική προσομοίωση, δίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2

Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικές τιμές τάσεων και παραμορφώσεων που θεωρούνται κατά την αριθμητική προσομοίωση των υλικών.

Συμβατικό σκυρόδεμα	$f_c^C = 30 \text{ MPa}$ $f_{ctm,fl}^C = 3.3 \text{ MPa}$ $k_s^C = 10 \text{ GPa}$
Περισφιγμένη τσιμεντοειδής μήτρα	$f_c^M = 80 \text{ MPa}$ $f_{ctm,fl}^M = 8 \text{ MPa}$ $k_s^M = 10 \text{ GPa}$
Μη-περισφιγμένη τσιμεντοειδής μήτρα	$f_c^M = 80 \text{ MPa}$ $f_{ctm,fl}^M = 8 \text{ MPa}$ $k_s^M = 10 \text{ GPa}$ $\varepsilon_u^M = 0.005$
Χαλύβδινες ίνες	$f_y^F = 950 \text{ MPa} = f_u^F$ $\varepsilon_1 = 0.04$ $\varepsilon_2 = 0.06$
Χάλυβας διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού	$f_y^S = 550 \text{ MPa}$ $f_u^S = 660 \text{ MPa}$ $\varepsilon_u^S = 0.2$

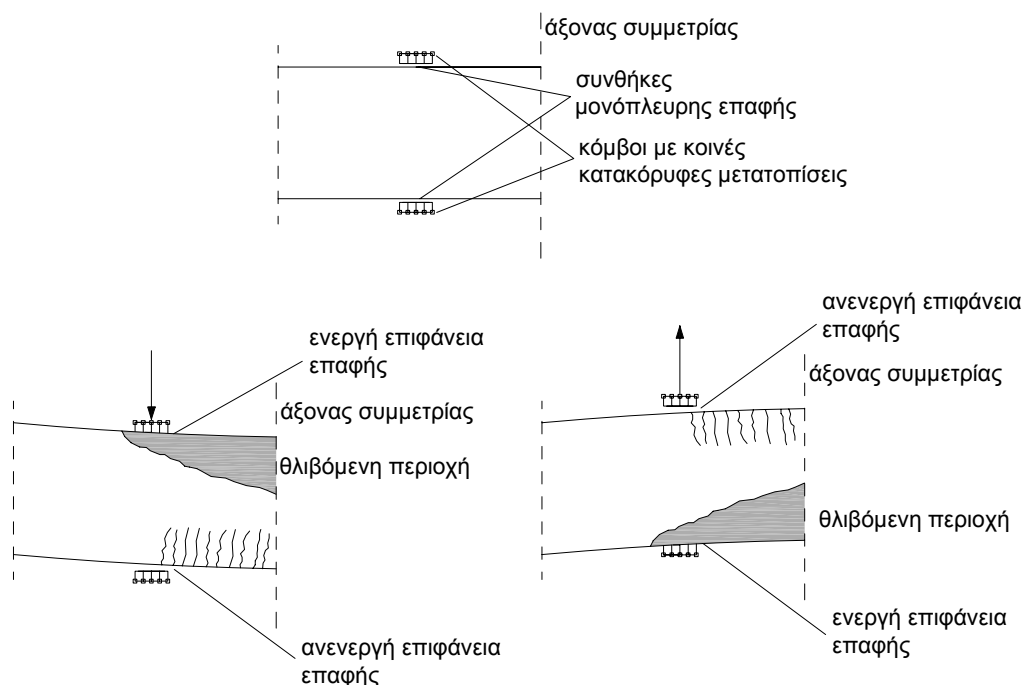


Σχ. 5.6: Νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων που θεωρούνται για α) το συμβατικό σκυρόδεμα, β) το χάλυβα του διαμήκου και εγκάρσιου οπλισμού, γ) την περισφιγμένη τσιμεντοειδή μήτρα, δ) τη μη-περισφιγμένη τσιμεντοειδή μήτρα και ε) το χάλυβα των ινών (οι παράμετροι των διαγραμμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2).

5.4.3 Προσομοίωση της διαδικασίας επιβολής της φόρτισης

Η προσομοίωση της διαδικασίας επιβολής της φόρτισης αποτέλεσε ένα ζήτημα προς επίλυση κατά τη μόρφωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων των δοκιμών κάμψης, τόσο στην περίπτωση του μονοτονικού, όσο και στην περίπτωση του ανακυκλιζόμενου φορτίου. Γενικά, δεν ήταν δυνατή η επιβολή του φορτίου κατευθείαν σε κόμβο του δικτύου των Π.Σ., εξαιτίας της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς και της δυνατότητας ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και της τσιμεντοειδούς μήτρας. Κατά την επιβολή ενός φορτίου σε κάποιο κόμβο των Π.Σ., αναπτύσσονται στη περιοχή γύρω από τον κόμβο αυτόν μη-ρεαλιστικές συγκεντρώσεις θλιπτικών τάσεων, που οδηγούν σε πρόωρη και σημαντική πλαστικοποίηση της τσιμεντοειδούς μήτρας στην ίδια περιοχή. Με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου αυτού, τοποθετείται ένα μεταλλικό πλακίδιο διαστάσεων 150×50×15 mm στην άνω επιφάνεια της δοκού (παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές κάμψης), μέσω του οποίου η φόρτιση εφαρμόζεται με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων. Με τον τρόπο αυτό εξομαλύνονται τα πεδία των τάσεων και παραμορφώσεων στην περιοχή επιβολής της φόρτισης.

Η περίπτωση της ανακυκλιζόμενης καταπόνησης είναι ακόμη πιο σύνθετη. Εάν τα φορτία εισαχθούν τοπικά στην άνω παρειά, κατά την αντιστροφή της φόρτισης παράγονται πεδία εφελκυστικών τάσεων στην αντίστοιχη περιοχή. Ακόμα και για σχετικά μικρές τιμές του φορτίου εμφανίζονται τοπικά μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τους κόμβους στους οποίους επιβάλλεται η φόρτιση. Επομένως, δημιουργούνται μη-ρεαλιστικές συνθήκες ρηγμάτωσης που οδηγούν στην καταστροφή των γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων, με αποτέλεσμα τον πρόωρο τερματισμό της αριθμητικής διαδικασίας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, χρησιμοποιείται ένα σύστημα αποτελούμενο από δύο μεταλλικά πλακίδια για την εφαρμογή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Το πρώτο πλακίδιο τοποθετείται στην άνω επιφάνεια της δοκού και το δεύτερο στην κάτω επιφάνεια, στην περιοχή επιβολής της φόρτισης. Μεταξύ των πλακιδίων και της δοκού θεωρούνται συνθήκες μονόπλευρης επαφής. Οι κόμβοι των δυο πλακιδίων συνδέονται κινηματικά έτσι ώστε να έχουν κοινές κατακόρυφες μετατοπίσεις. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εφαρμογή της φόρτισης (με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων) και με τις δύο φορές (προς τα κάτω και προς τα άνω), έτσι ώστε να επιβάλλονται μόνο θλιπτικές δυνάμεις στις αντίστοιχες επιφάνειες επαφής της δοκού. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η λειτουργία του συστήματος των δύο πλακιδίων στις δύο διευθύνσεις φόρτισης.



Σχ. 5.7: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του συστήματος των δύο πλακιδίων που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

5.4.4 Διαδικασία επίλυσης

Η επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού μη-γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων MSC-MARC. Η φόρτιση εφαρμόζεται βήμα προς βήμα με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων δ στους κόμβους των μεταλλικών πλακιδίων που χρησιμοποιούνται για την επιβολή της φόρτισης. Στη συνέχεια μετρώνται οι προκύπτουσες δυνάμεις P στα σημεία επιβολής της μετατόπισης.

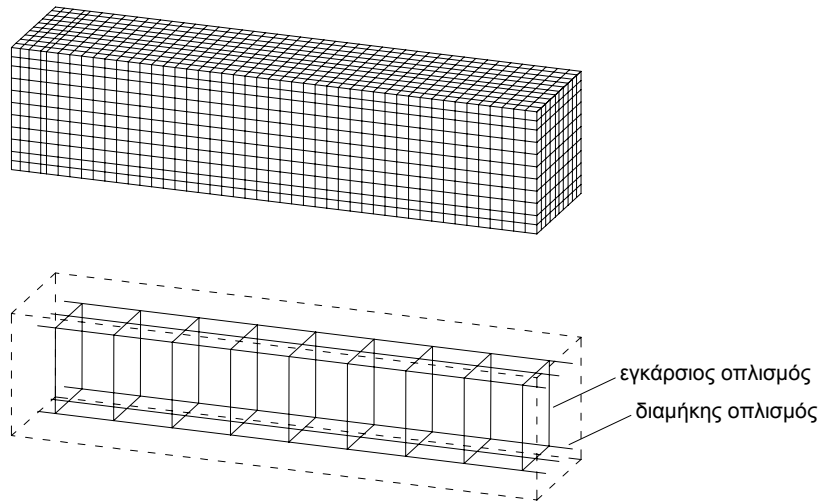
5.5 Δοκοί Τύπου Α – προσομοίωση και αποτελέσματα

Αρχικά, μια αμφίερευστη συμβατική δοκός Ο/Σ (Τύπος Α) υποβάλλεται σε στατική μονοτονική κάμψη τριών σημείων. Λόγω της συμμετρίας των συνθηκών στήριξης και φόρτισης του προβλήματος, προσομοιώνεται η μισή δοκός λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας, με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού κόστους της αριθμητικής ανάλυσης (Murugappan et al. 1994, Padmarajaiah και Ramaswamy 2002, Swaddiwudhipong και Seow 2006, Queiroz et al. 2007, Özcan et al. 2009). Η δοκός αυτή προσομοιώνεται τόσο με τρισδιάστατα, όσο και με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία προκειμένου να αξιολογηθούν διαφορές στη συμπεριφορά.

5.5.1 Τρισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Α

Για την τρισδιάστατη προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιείται το πεπερασμένο στοιχείο 7 που διατίθεται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.8, §3.4.2). Η προσομοίωση του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού

πραγματοποιείται με τη χρήση του στοιχείου 9 της βιβλιοθήκης στοιχείων του MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.9, §3.4.2). Στα στοιχεία που προσομοιώνουν τις διαμήκεις ράβδους οπλισμού με διάμετρο 10 mm, δίνεται εμβαδό διατομής ίσο με 78.5 mm^2 , ενώ στα στοιχεία που προσομοιώνουν τον εγκάρσιο οπλισμό (συνδετήρες) με διάμετρο 8 mm, δίνεται εμβαδό διατομής ίσο με 50 mm^2 . Η υπό μελέτη δοκός μετά τη διακριτοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8, μαζί με λεπτομέρεια των στοιχείων που προσομοιώνουν το διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό.

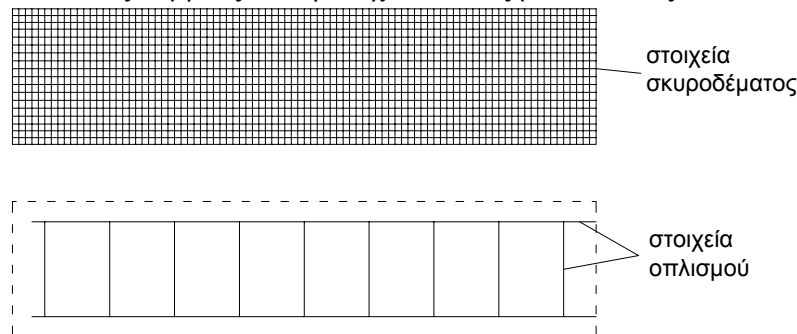


Σχ. 5.8: Τα τρισδιάστατα Π.Σ. που προσομοιώνουν το σκυρόδεμα και τον οπλισμό της συμβατικά οπλισμένης δοκού.

5.5.2 Δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Α

Μετά τη μόρφωση του τρισδιάστατου προσομοιώματος της δοκού Ο/Σ ακολουθεί η δημιουργία του αντίστοιχου δισδιάστατου προσομοιώματος, το οποίο θα πρέπει να καταλήγει σε μικρότερο υπολογιστικό κόστος αλλά ταυτόχρονα να οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιείται το στοιχείο 3 της βιβλιοθήκης πεπερασμένων στοιχείων του λογισμικού MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.10, §3.4.2). Στο δισδιάστατο προσομοίωμα ο συνυπολογισμός της τρίτης διάστασης του προβλήματος (κάθετα στο επίπεδο προσομοίωσης) επιτυγχάνεται με τη θεώρηση του κατάλληλου πάχους για τα επίπεδα στοιχεία. Στα Π.Σ. που προσομοιώνουν το σκυρόδεμα της δοκού δίνεται πάχος ίσο με 150 mm, ίσο δηλαδή με το πλάτος της δοκού. Για την προσομοίωση του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού της δοκού χρησιμοποιείται το στοιχείο 5 της βιβλιοθήκης στοιχείων του MSC-MARC (βλ. Σχήμα 3.11, §3.4.2). Τα στοιχεία αυτά συνδέονται με τα στοιχεία προσομοίωσης του σκυροδέματος μέσω κοινού πλέγματος κόμβων. Στα στοιχεία αυτά δίνεται εμβαδό διατομής ίσο με το συνολικό εμβαδό διατομής των ράβδων του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού αντίστοιχα. Έτσι, στη σειρά των στοιχείων που προσομοιώνουν τον άνω και κάτω οπλισμό της δοκού δίνεται εμβαδό διατομής ίσο με $3 \times 78.5 = 235.5 \text{ mm}^2$ ($3\emptyset 10$) και στη σειρά των στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τον εγκάρσιο οπλισμό δίνεται εμβαδό ίσο με $2 \times 50 = 100 \text{ mm}^2$, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα δύο κατακόρυφα σκέλη των δίμητων συνδετήρων $\emptyset 8$. Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζονται οι στρώσεις των Π.Σ. που προσομοιώνουν τον οπλισμό και το

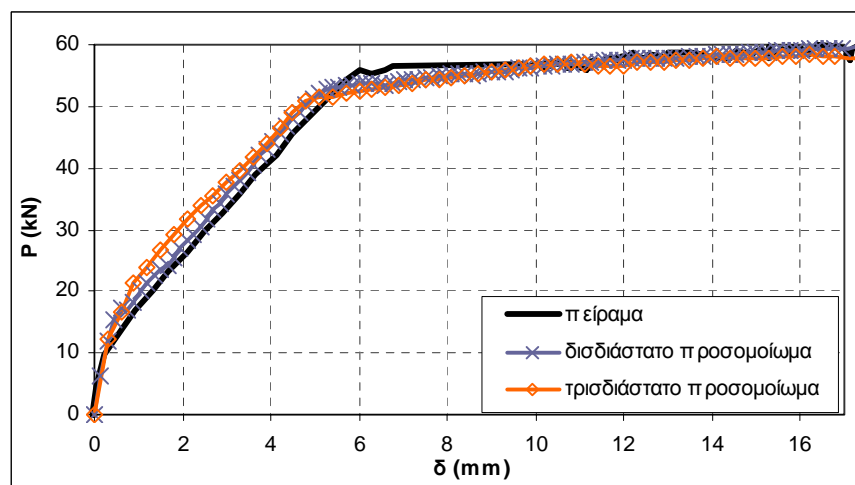
σκυρόδεμα της δοκού. Επισημαίνεται ότι, στην πραγματικότητα, όλα αυτά τα στοιχεία συνδέονται σε κοινούς κόμβους και άρα, έχουν κοινές μετατοπίσεις.



Σχ. 5.9: Τα επάλληλα δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το δισδιάστατο προσομοίωμα της δοκού Ο/Σ.

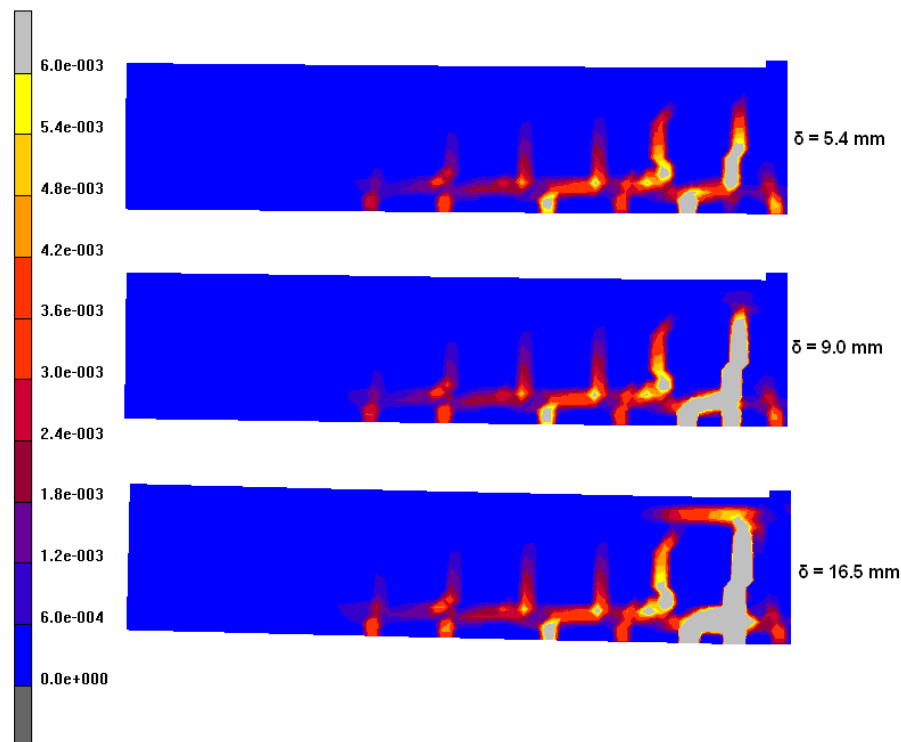
5.5.3 Αποτελέσματα για τη στατική μονοτονική φόρτιση

Οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης που προκύπτουν από το τρισδιάστατο και δισδιάστατο προσομοίωμα, καθώς και τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται στο Σχήμα 5.10. Καταρχήν, επιβεβαιώνεται μέσω της σύγκρισης των διαγραμμάτων ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Για τιμές της μετατόπισης έως τα 0.3 mm η συμπεριφορά της δοκού είναι σχεδόν γραμμική. Στο σημείο αυτό ξεκινά η ρηγμάτωση που συνεχίζεται μέχρι τα 5 mm περίπου, όπου αρχίζει η διαρροή του χάλυβα οπλισμού. Επίσης, σε όλα τα διαγράμματα εμφανίζεται ο χαρακτηριστικός ανιών κλάδος που αντιστοιχεί στην κράτυνση του χάλυβα. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις καμπύλες που αντιστοιχούν στα δύο αριθμητικά προσομοιώματα, συμπεραίνεται ότι το απλούστερο δισδιάστατο προσομοίωμα μπορεί να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια την καμπτική συμπεριφορά της υπό μελέτη δοκού και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα, αντίστοιχα με αυτά του πιο ρεαλιστικού τρισδιάστατου προσομοιώματος.



Σχ. 5.10: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τη συμβατική δοκό Ο/Σ (Τύπος Α), υπό στατική μονοτονική κάμψη τριών σημείων.

Τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγματώσης που αναπτύσσονται στη δοκό σε χαρακτηριστικά βήματα της φόρτισης, όπως προκύπτουν από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11. Σημειώνεται ότι οι παραμορφώσεις λόγω ρηγματώσης του Σχήματος 5.11 αποτελούν τη συνιστώσα $\Delta \varepsilon^{cr}$ των συνολικών παραμορφώσεων $\Delta \varepsilon$, σύμφωνα με τη Σχέση (3.2) (§3.2.1) που αναφέρεται στη μέθοδο της διανεμημένης ρωγμής. Οι πρώτες ρωγμές εμφανίζονται στην περιοχή μέγιστης ροπής κάμψης, στο μέσο του ανοίγματος της δοκού και αναπτύσσονται με διαδοχική αύξηση του αριθμού, του μήκους και του ανοίγματός τους. Για βέλος κάμψης ίσο με 5.4 mm οι ράβδοι οπλισμού διαρρέουν. Από το σημείο αυτό και έπειτα, η κύρια ρωγή που αναπτύσσεται πολύ κοντά στο μέσο του ανοίγματος διευρύνεται σημαντικά και διαδίδεται προς το ανώτερο τμήμα της δοκού, οδηγώντας σταδιακά στην αστοχία. Η εικόνα της αστοχίας της δοκού κατά την πειραματική δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.11 και 5.12, παρατηρείται ότι η εικόνα των ρηγματώσεων που προκύπτει από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης. Επομένως, μετά τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης που ακολουθείται μπορεί να θεωρηθεί επαρκής και αξιόπιστη ως προς τη γενική συμπεριφορά του συστήματος, τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης και τα πεδία των ρηγματώσεων που προκύπτουν. Επομένως, το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στην παρούσα παράγραφο, μπορεί να θεωρηθεί ως η βάση για τη μόρφωση πιο σύνθετων αριθμητικών προσομοιωμάτων.



Σχ. 5.11: Παραμορφώσεις λόγω ρηγματώσης για τη συμβατική δοκό Ο/Σ (Τύπος Α) υπό στατική μονοτονική κάμψη τριών σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

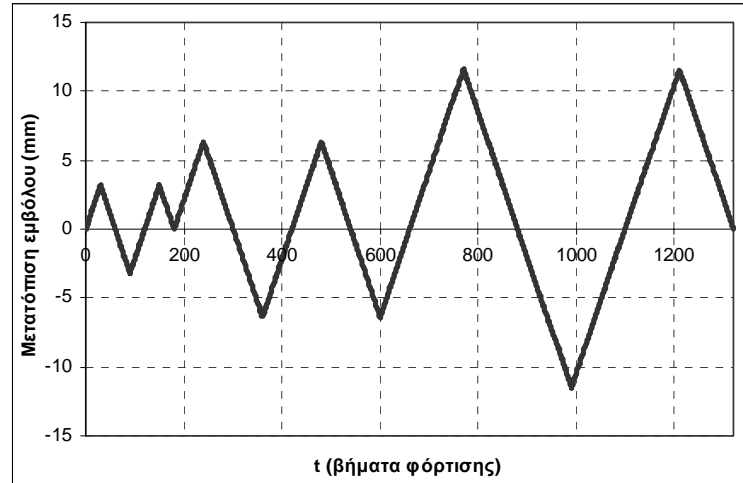


Σχ. 5.12: Εικόνα αστοχίας της συμβατικής δοκού Ο/Σ (Τύπος Α) στην πειραματική δοκιμή στατικής μονοτονικής κάμψης τριών σημείων.

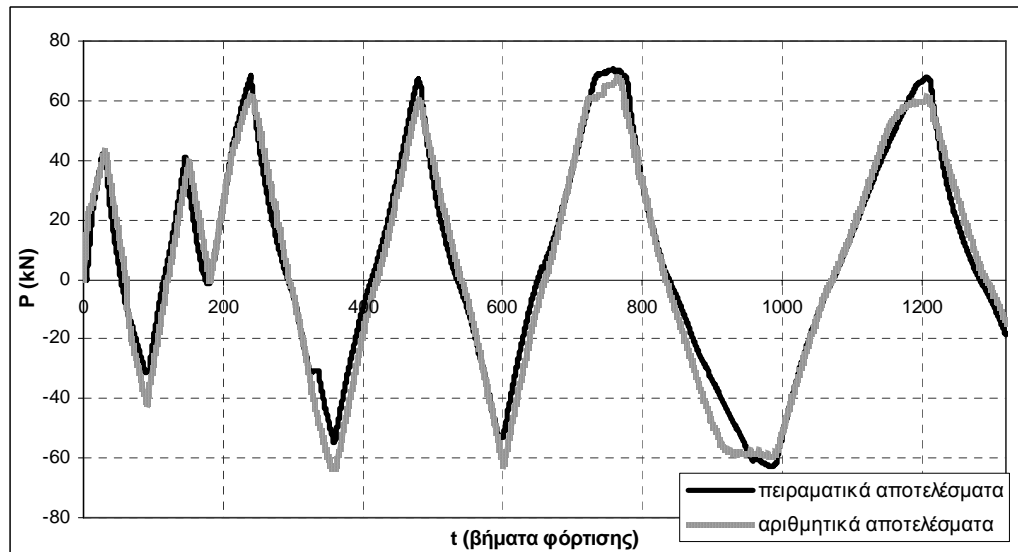
5.5.4 Αποτελέσματα για τη στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στη συνέχεια, η δοκός Τύπου Α υποβάλλεται σε στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων. Το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα σε αυτή την περίπτωση είναι πανομοιότυπο με αυτό που περιγράφηκε παραπάνω, με μοναδική διαφορά τη διαδικασία επιβολής της φόρτισης. Εδώ συμπεριλαμβάνεται στο προσομοίωμα το σύστημα των δύο μεταλλικών πλακιδίων, μέσω του οποίου εφαρμόζεται η ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων, σε δύο σημεία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος της δοκού και σε απόσταση 190 mm από αυτό. Η ιστορία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, όπως καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία και εφαρμόστηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 1300 βήματα φόρτισης. Στο Σχήμα 5.14 γίνεται η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το δισδιάστατο προσομοίωμα και των αντίστοιχων πειραματικών. Οι καμπύλες του σχήματος αυτού παρουσιάζουν τις προκύπτουσες τιμές του φορτίου P σε σχέση με τα βήματα φόρτισης. Επίσης, στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη μορφή καμπυλών δύναμης-μετατόπισης. Σημειώνεται ότι από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψαν αποτελέσματα για αρκετά μεγαλύτερες τιμές της μετατόπισης, που το αριθμητικό προσομοίωμα δε μπόρεσε να παρακολουθήσει λόγω αριθμητικών ασταθειών που οδήγησαν στον τερματισμό της εφαρμοζόμενης επαναληπτικής διαδικασίας. Επομένως, οι πειραματικές καμπύλες που χρησιμοποιούνται στα σχήματα αυτά, που έχουν ως στόχο τη σύγκριση με τα αντίστοιχα αριθμητικά, αποτελούν μέρος μόνο των ολοκληρωμένων διαγραμμάτων του πειράματος. Όπως φαίνεται, υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις τιμές του φορτίου P που φέρει η δοκός, την αρχική δυσκαμψία του συστήματος και τη μορφή των βρόχων υστέρησης. Συνεπώς, αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο αριθμητικό

προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και για την εκτίμηση της απόκρισης των δοκών υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη.



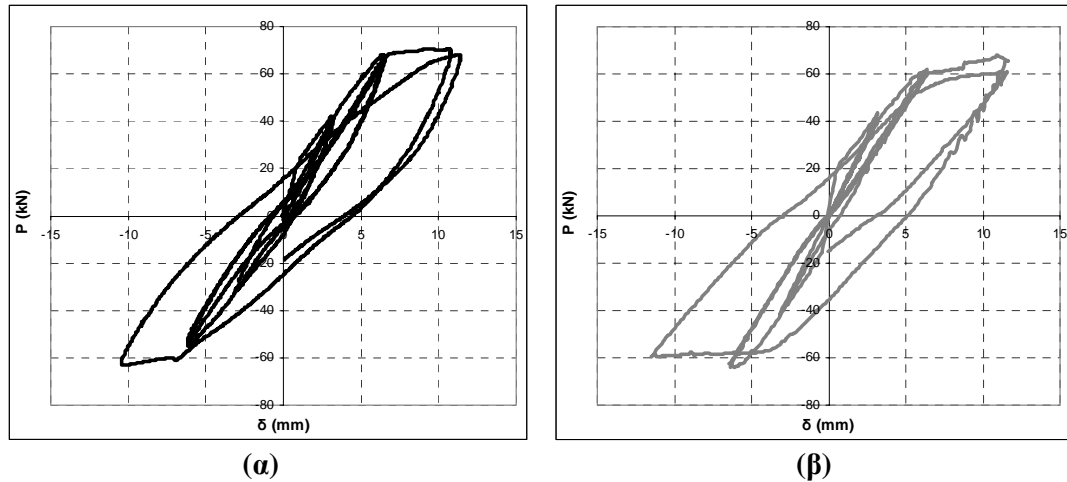
Σχ. 5.13: Ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης υπό τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.



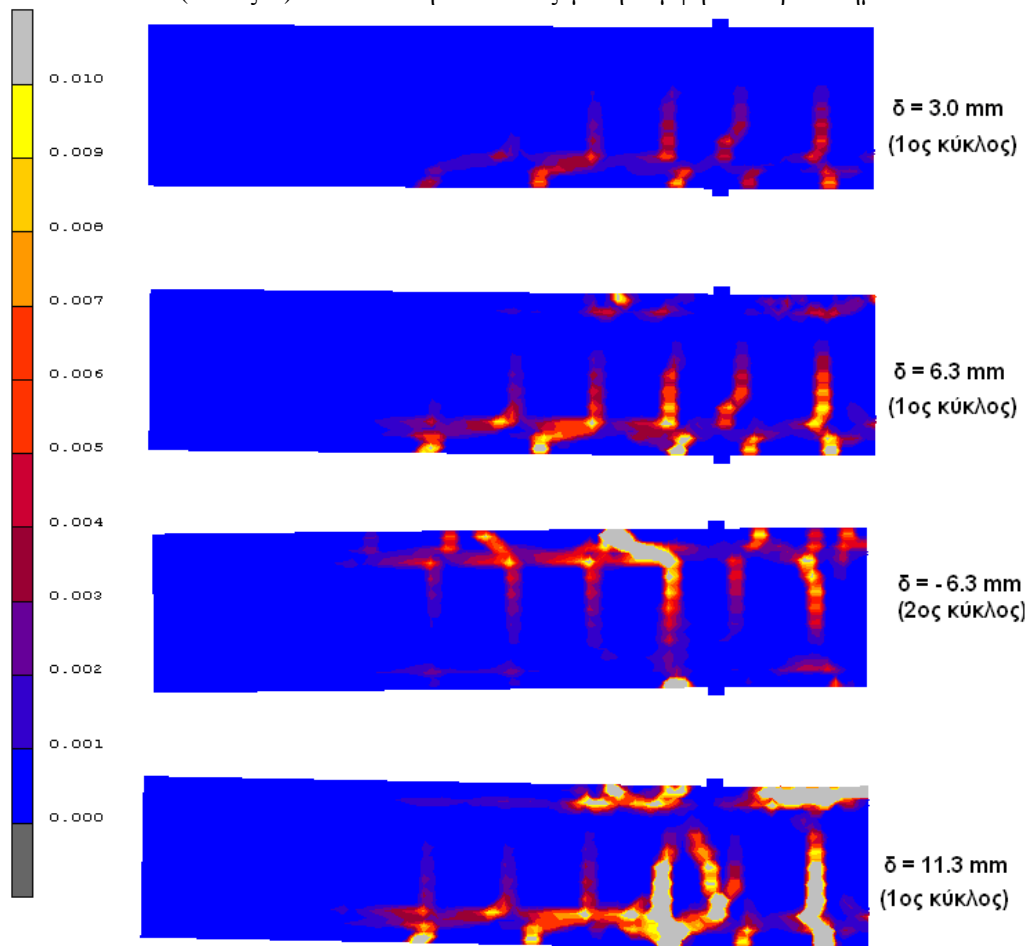
Σχ. 5.14: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τη συμβατική δοκό (Τύπος Α) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης που αναπτύσσονται στη δοκό σε χαρακτηριστικά βήματα της φόρτισης, όπως προκύπτουν από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα. Για επιβαλλόμενη μετατόπιση ίση με 3.0 mm στον πρώτο κύκλο φόρτισης, οι πρώτες ρωγμές έχουν ήδη εμφανιστεί κοντά στο μέσο του ανοίγματος της δοκού. Στη συνέχεια, οι ρωγμές αυτές αναπτύσσονται με διαδοχική αύξηση του αριθμού, του μήκους και του εύρους τους, όπως φαίνεται στα επόμενα στιγμιότυπα του Σχήματος 5.16. Επίσης, κατά την αντιστροφή της φόρτισης, αναπτύσσονται αντίστοιχης μορφής ρωγμές στο άνω τμήμα της δοκού. Τελικά, με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης στους τελευταίους κύκλους της ιστορίας φόρτισης, οι κύριες ρωγμές διευρύνονται σημαντικά, τόσο στο κάτω όσο και στο άνω μέρος της δοκού, οδηγώντας σταδιακά στην αστοχία. Η εικόνα της αστοχίας της δοκού

κατά την πειραματική δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.16 και 5.17, παρατηρείται ότι η εικόνα των ρηγματώσεων που προκύπτει από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης.



Σχ. 5.15: Σύγκριση της α) πειραματικής και β) αριθμητικής καμπύλης $P - \delta$ για τη συμβατική δοκό (Τύπος Α) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.



Σχ. 5.16: Παραμορφώσεις λόγω ρηγματώσης για τη συμβατική δοκό Ο/Σ (Τύπος Α) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



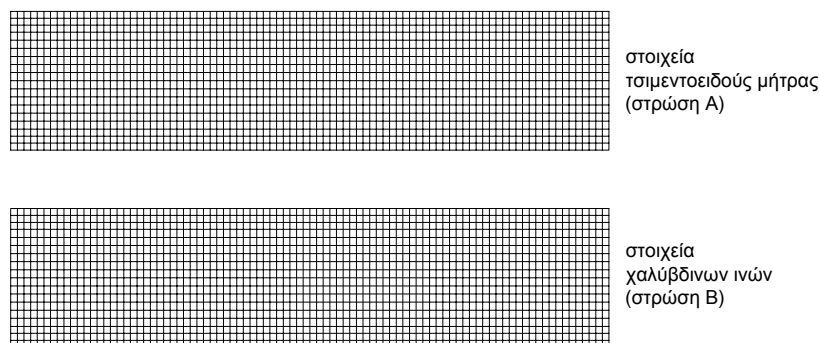
Σχ. 5.17: Εικόνα αστοχίας της συμβατικής δοκού Ο/Σ (Τύπος Α) στην πειραματική δοκιμή στατικής ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων.

5.6 Δοκοί Τύπου Β – προσομοίωση και αποτελέσματα

5.6.1 Δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Β

Ακολουθως, μελετάται μια αμφιέριστη δοκός ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς διαμήκη και εγκάρσιο σπλισμό (Τύπος Β), υπό στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων, μέσω δισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος. Η διαδικασία μόρφωσης του δισδιάστατου προσομοιώματος της δοκού Τύπου Β είναι όμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για τη δοκό Τύπου Α. Επιπλέον, όπως έχει ήδη περιγραφεί, το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα προσομοιώνεται λαμβάνοντας υπόψη ξεχωριστά τη συνεισφορά της τσιμεντοειδούς μήτρας και των χαλύβδινων ινών, μέσω δύο πανομοιότυπων στρώσεων Π.Σ. (στρώση Α και στρώση Β, αντίστοιχα), στις οποίες αποδίδονται οι κατάλληλες ιδιότητες. Έτσι, το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελείται από επάλληλες στρώσεις Π.Σ. που συνδέονται μεταξύ τους σε κοινούς κόμβους. Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζονται οι διαφορετικές στρώσεις Π.Σ. από τις οποίες αποτελείται το προσομοίωμα της ινοπλισμένης δοκού. Τόσο η τσιμεντοειδής μήτρα, όσο και η συνεισφορά των ινών προσομοιώνονται μέσω των δισδιάστατων Π.Σ. επίπεδης έντασης του Σχήματος 3.10 (§3.4.2). Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά τη διακριτοποίηση, δημιουργείται ένας κάναβος Π.Σ. με διάσταση ίση με 10 mm κατά τη διεύθυνση του μήκους της δοκού. Μάλιστα, όλα τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμών κάμψης της παρούσας διατριβής μορφώνονται με Π.Σ. πλάτους 10 mm. Η ύπαρξη όμως, φθινόντων κλάδων στους νόμους τάσεων – παραμορφώσεων που εισάγονται σε ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, όπως είναι ο φθίνων κλάδος του νόμου υλικού που υιοθετείται για το χάλυβα των ινών και αντιπροσωπεύει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών, μπορεί να οδηγήσει στο πρόβλημα της εξάρτησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων από την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (mesh sensitivity problem). Για το λόγο αυτό, στο Παράρτημα Β πραγματοποιείται μία διερεύνηση της εξάρτησης των αποτελεσμάτων από την πυκνότητα του δικτύου των Π.Σ., προσανατολισμένη στα προβλήματα που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Στα στοιχεία που προσομοιώνουν την τσιμεντοειδή μήτρα δίνεται πάχος ίσο με 150 mm, ίσο δηλαδή με το πλάτος της δοκού. Στα στοιχεία που προσομοιώνουν τη συνεισφορά των χαλύβδινων ινών δίνεται πάχος ίσο με 0.6 mm, όπως προκύπτει από τη Σχέση (5.5) για $t_c = 150$ mm. Καθώς όλος ο όγκος της τσιμεντοειδούς μήτρας είναι μη-περισφιγμένος, λόγω της απουσίας εγκάρσιου οπλισμού, υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 5.6δ. Το φορτίο εφαρμόζεται με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων σε δύο σημεία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος της δοκού και σε απόσταση ίση με 190 mm από αυτό.



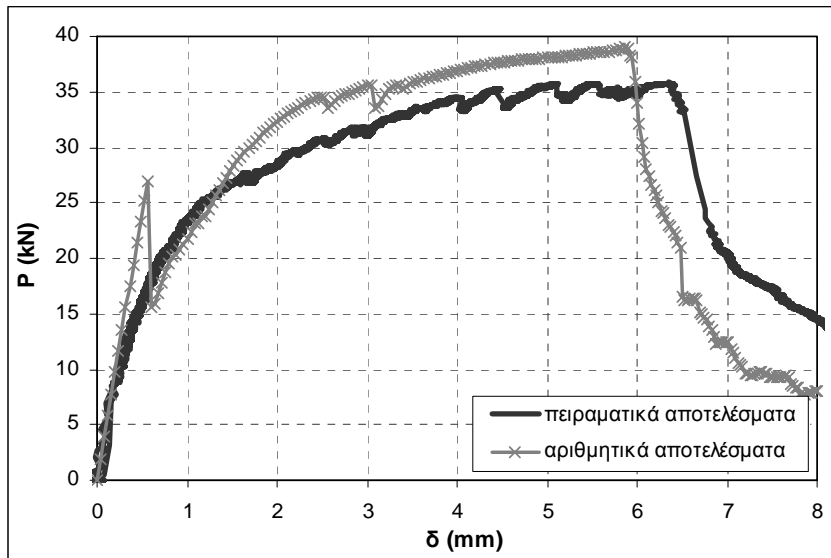
Σχ. 5.18: Τα επάλληλα δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το δισδιάστατο προσομοίωμα της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύπος Β).

5.6.2 Αποτελέσματα για τη στατική μονοτονική φόρτιση

Η καμπύλη δύναμης-μετακίνησης που προκύπτει από την ανάλυση του δισδιάστατου προσομοιώματος σε στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, συγκρίνεται με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη στο Σχήμα 5.19. Πολύ νωρίς, εμφανίζεται στην αριθμητική καμπύλη μια απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας της δοκού για μετατόπιση περίπου ίση με 0.6 mm, η οποία σχετίζεται με την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας και την εμφάνιση της πρώτης ρηγμάτωσης. Όμως, αμέσως μετά από την απότομη αυτή πτώση της αντοχής, η φέρουσα ικανότητα της δοκού αυξάνεται και πάλι, υποδηλώνοντας τη μεταφορά των εφελκυστικών δυνάμεων που αρχικά αναλαμβάνονταν από την τσιμεντοειδή μήτρα, στις χαλύβδινες ίνες. Στη συνέχεια, εμφανίζονται στην αριθμητική καμπύλη $P-\delta$ περισσότεροι φθίνοντες κλάδοι, που σχετίζονται με τη δημιουργία νέων ρωγμών. Από την άλλη, η πειραματική καμπύλη δεν εμφανίζει τη χαρακτηριστική απότομη μείωση της αντοχής κατά τη στιγμή της πρώτης ρηγμάτωσης, αλλά διακρίνονται μικρότερες πτώσεις του φορτίου P στη συνέχεια. Γενικά, η σύγκριση μεταξύ της αριθμητικής και πειραματικής καμπύλης δείχνει ότι υπάρχει καλή συμφωνία σε ό,τι αφορά στην αρχική δυσκαμψία και τη μέγιστη αντοχή. Επίσης, η αριθμητική καμπύλη προβλέπει ικανοποιητικά τη μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται η αστοχία της δοκού.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η εμφάνιση δυνάμεων της τάξης των 27 kN πριν την αρχική ρηγμάτωση, για μετατόπιση 0.6 mm (Σχήμα 5.19) οφείλεται στη χρησιμοποιούμενη τιμή $f_{cm,\beta} = 8$ MPa για την καμπτική εφελκυστική αντοχή της

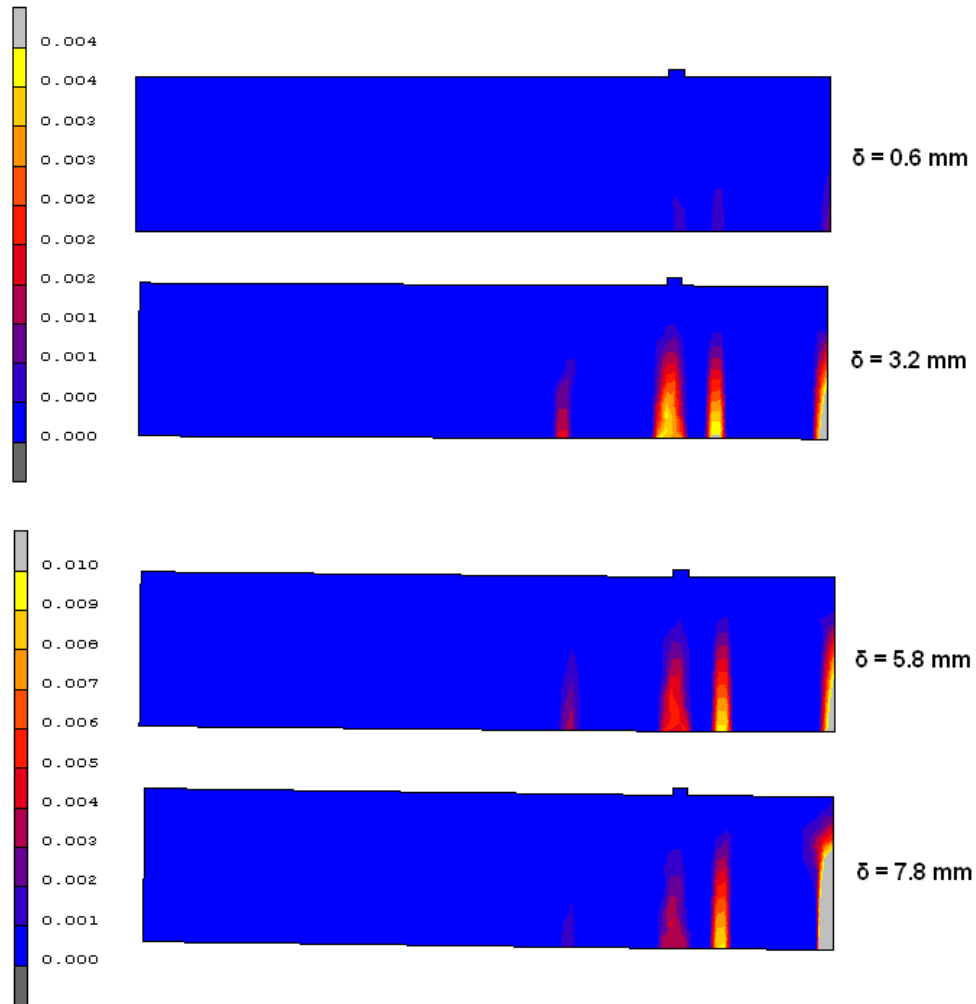
τσιμεντοειδούς μήτρας. Υπενθυμίζεται ότι η τιμή αυτή προέκυψε από πειράματα σε δοκίμια $40 \times 40 \times 160$ mm. Φαίνεται λοιπόν, ότι η αλλαγή της κλίμακας των πειραματικών δοκιμών επηρεάζει την τιμή αυτή. Βέβαια, στη συνέχεια, η χρησιμοποιούμενη τιμή για την καμπτική εφελκυστική αντοχή της τσιμεντοκονίας δεν έχει καμία επίπτωση στη συμπεριφορά της δοκού, καθώς γίνεται μεταβίβαση των εφελκυστικών τάσεων στις ίνες. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι μετά την απότομη πτώση της αντοχής για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.6 mm, η αριθμητική καμπύλη «επιστρέφει» σε τιμές δυνάμεων αντίστοιχες με αυτές της πειραματικής καμπύλης.



Σχ. 5.19: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β), υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων.

Τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης της τσιμεντοειδούς μήτρας, όπως προκύπτουν από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για συγκεκριμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.20. Η πρώτη ρηγμάτωση συμβαίνει για μετατόπιση περίπου ίση με 0.6 mm, που αντιστοιχεί στην πρώτη απότομη πτώση της αντοχής της αριθμητικής καμπύλης $P-\delta$ (Σχήμα 5.19). Στη συνέχεια, το άνοιγμα μιας νέας ρωγμής για μετατόπιση ίση με 3.2 mm, αντιστοιχεί σε ένα μικρότερο πτωτικό «άλμα» της αριθμητικής καμπύλης. Έπειτα από τη μετατόπιση των 5.8 mm, μεγαλώνει σημαντικά το άνοιγμα των ρωγμών, με αποτέλεσμα τη σταδιακή αστοχία των ινών. Τελικά, αναπτύσσεται μία κύρια ρωγή κοντά στο μέσο του ανοίγματος, οδηγώντας στην αστοχία της δοκού. Η εικόνα της αστοχίας της ινοπλισμένης δοκού κατά την πειραματική δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.20 και 5.21, παρατηρείται ότι η εικόνα των ρηγματώσεων που προκύπτει από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης. Επομένως, πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, με την ξεχωριστή θεώρηση των δύο συνιστωσών του, της τσιμεντοειδούς μήτρας και των χαλύβδινων ινών, οδηγεί σε ικανοποιητική προσέγγιση των φαινομένων που διέπουν τη συμπεριφορά της δοκού κατά τη δοκιμή κάμψης, όπως είναι η ρηγμάτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας, η

μεταφορά των εφελκυστικών δυνάμεων από τη μήτρα στις ίνες, η σταδιακή εξόλκευση των ινών και τέλος, η αστοχία του μέλους.



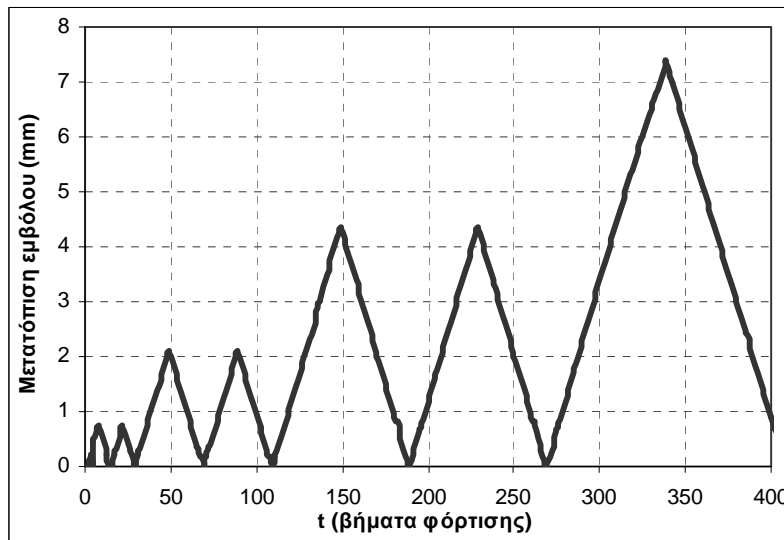
Σχ. 5.20: Παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β) υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχ. 5.21: Εικόνα αστοχίας της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β) στην πειραματική δοκιμή στατικής μονοτονικής κάμψης τεσσάρων σημείων.

5.6.2 Αποτελέσματα για τη στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στη συνέχεια, η δοκός Τύπου Β υποβάλλεται σε στατική, μιας κατεύθυνσης ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων (μόνο θετικές ροπές κάμψης). Το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα σε αυτή την περίπτωση είναι πανομοιότυπο με αυτό που μορφώθηκε για τη στατική μονοτονική κάμψη, με μοναδική διαφοροποίηση τη διαδικασία επιβολής της φόρτισης. Στο νέο προσομοίωμα συμπεριλαμβάνεται το σύστημα των δύο μεταλλικών πλακιδίων, μέσω του οποίου εφαρμόζεται η ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων. Η ιστορία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπως καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία και εφαρμόστηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.22.

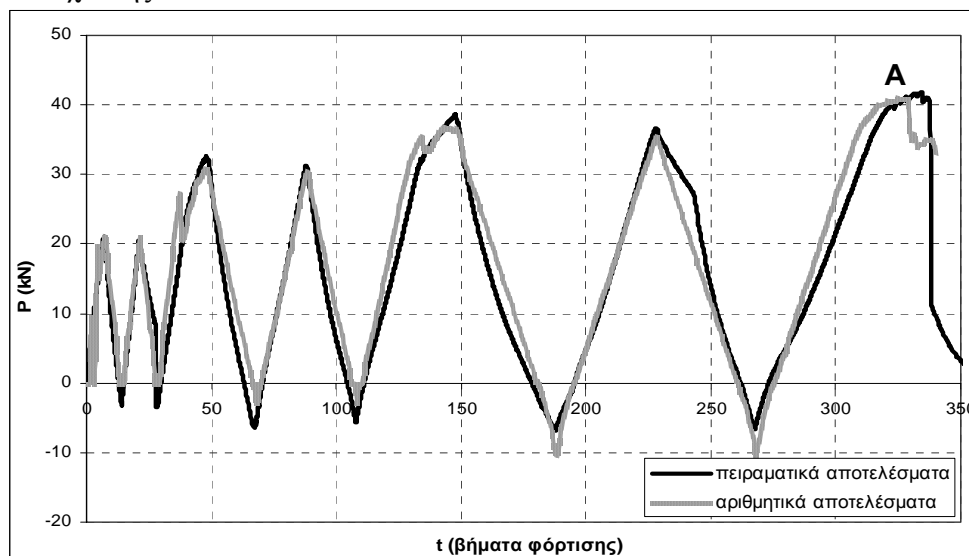


Σχ. 5.22: Ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης υπό τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.

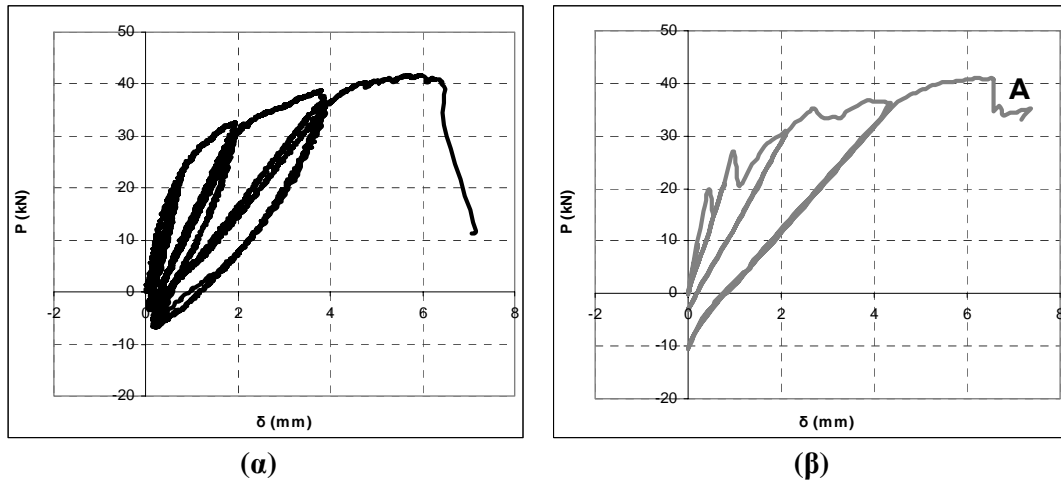
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς διαμήκη σπλισμό, έγιναν κατ' αρχήν και πειράματα στατικής πλήρους ανακυκλιζόμενης φόρτισης (θετικές και αρνητικές ροπές κάμψης). Τα πειράματα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα τη γρήγορη αστοχία της δοκού. Μετά το δεύτερο κύκλο φόρτισης, για επιβαλλόμενη μετατόπιση μόλις 2 mm, η ρωγμή που αναπτύχθηκε στο εφελκόμενο άνω τμήμα της δοκού κατά την αντιστροφή της φόρτισης ενώθηκε με τη ρωγμή που έχει σχηματιστεί στο εφελκόμενο κάτω τμήμα της δοκού για θετικές ροπές κάμψης, με αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση του συστήματος και την αστοχία της δοκού, η οποία τελικά χωρίστηκε σε δύο τμήματα. Είναι προφανές πως τέτοιου είδους φαινόμενα και αστοχίες δεν μπορούν να προσομοιωθούν αριθμητικά. Για το λόγο αυτόν, αποφασίστηκε να εκτελεστούν (και να προσομοιωθούν αριθμητικά) πειράματα κάμψης της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υπό στατική, μιας κατεύθυνσης ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στα πειράματα αυτά, η αστοχία της δοκού επήλθε για μεγαλύτερες τιμές της επιβαλλόμενης μετατοπίσης και ύστερα από περισσότερους κύκλους φόρτισης. Μέσω των προαναφερθέντων πειραμάτων, δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του αντίστοιχου αριθμητικού προσομοιώματος σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση παρουσιάζονται μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά στο Σχήμα 5.23, σε όρους τιμών του φορτίου P και βημάτων φόρτισης, ενώ στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη μορφή καμπυλών δύναμης-μετατόπισης. Αν και η δοκός δεν υποβάλλεται σε αρνητικές ροπές κάμψης, είναι εμφανές, τόσο από τις πειραματικές καμπύλες των σχημάτων, όσο και από τις αριθμητικές, ότι χρειάζονται αρνητικές δυνάμεις κατά την αντιστροφή της φόρτισης έτσι ώστε να κλείσουν οι ανοιγμένες ρωγμές και να επιτευχθεί η κατάσταση της μηδενικής μετατόπισης. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.23 και 5.24, τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία. Παρατηρείται ότι κατά την επιβολή του τελευταίου κύκλου φόρτισης εμφανίζεται στις αριθμητικές καμπύλες και συγκεκριμένα στο σημείο Α, ένα «άλμα» που αντιστοιχεί στην απότομη μείωση του φορτίου P που μπορεί να φέρει η δοκός. Στην πραγματικότητα η δοκός αστοχεί στο σημείο αυτό, όπως φαίνεται και από την καμπύλη των πειραματικών αποτελεσμάτων. Επομένως, το αριθμητικό προσομοίωμα καταφέρνει να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια την αστοχία της ινοπλισμένης δοκού. Αυτό βέβαια οφείλεται στην επιτυχή επιλογή των παραμέτρων ε_1 και ε_2 του Σχήματος 5.6ε που περιγράφουν τη σταδιακή εξόλκευση των ινών από τη μήτρα (βλ. Παράρτημα Α, §Α.2)

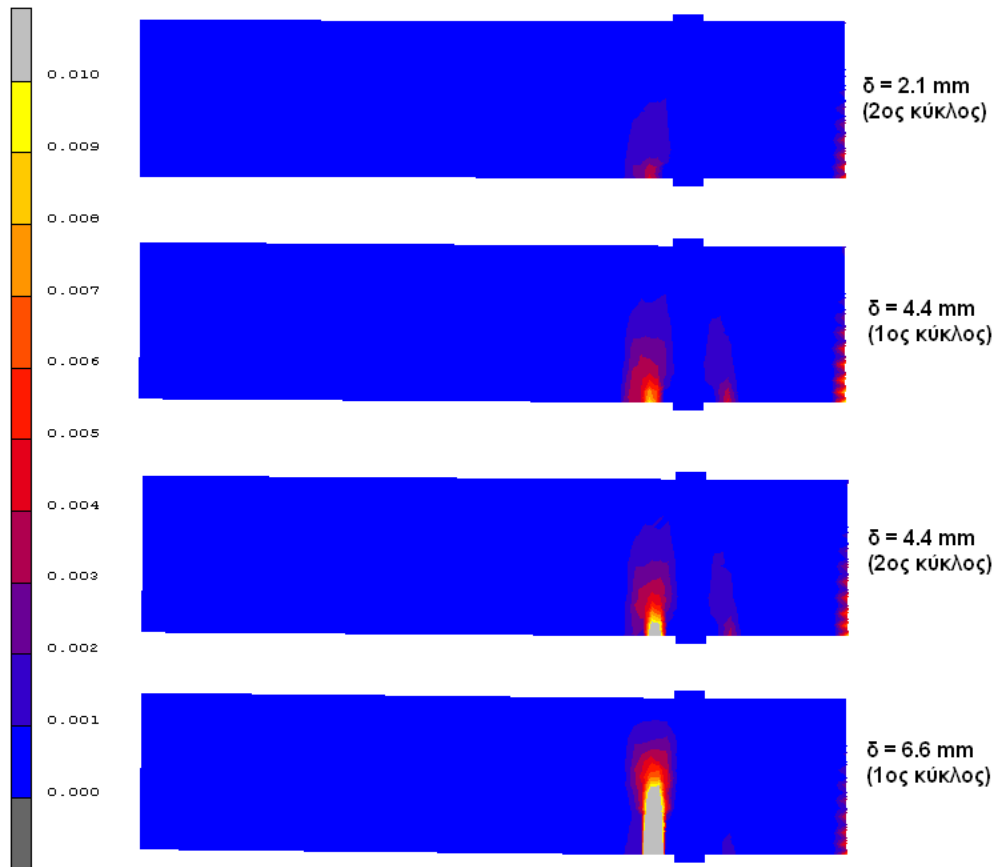
Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης σε χαρακτηριστικά σημεία της ιστορίας φόρτισης, όπως προκύπτουν από την ανάλυση του δισδιάστατου προσομοιώματος. Παρατηρείται ότι από τους πρώτους κύκλους της φόρτισης σχηματίζεται μία κύρια ρωγμή, η οποία αναπτύσσεται σε εύρος και μήκος με την εξέλιξη της φόρτισης. Το τελευταίο στιγμιότυπο του Σχήματος 5.25 αντιστοιχεί στο σημείο Α της αριθμητικής καμπύλης (Σχήματα 5.23 και 5.24) και παρουσιάζει την κύρια ρωγμή που έχει διευρυνθεί σημαντικά και έχει εξελιχθεί προς το άνω τμήμα της δοκού, με αποτέλεσμα την αστοχία λόγω εξόλκευσης των ινών που τη «γεφυρώνουν», οδηγώντας στην αστοχία της δοκού.



Σχ. 5.23: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύπος Β) υπό στατική μίας κατεύθυνσης ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

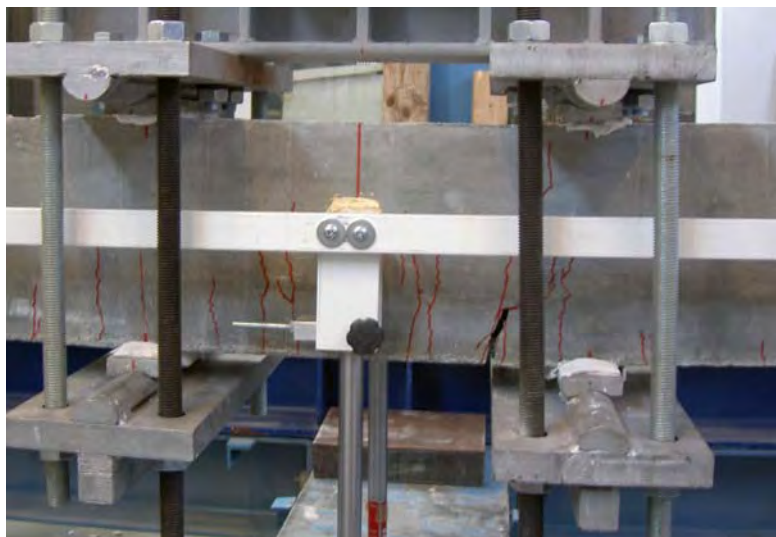


Σχ. 5.24: Σύγκριση της α) πειραματικής και β) αριθμητικής καμπύλης $P - \delta$ για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύπος Β) υπό στατική μίας κατεύθυνσης ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.



Σχ. 5.25: Παραμορφώσεις λόγω ρηγματώσης για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β) υπό στατική μίας κατεύθυνσης ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

Η εικόνα της αστοχίας της ινοπλισμένης δοκού κατά την αντίστοιχη πειραματική δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.26. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.25 και 5.26, παρατηρείται ότι η εικόνα των ρηγματώσεων που προκύπτει από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης. Επομένως, η προτεινόμενη μέθοδος προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μπορεί να θεωρηθεί αποτελεσματική και για την περίπτωση της στατικής ανακυκλιζόμενης κάμψης, καθώς αποδείχθηκε ότι οδηγεί σε ικανοποιητική προσέγγιση της γενικής συμπεριφοράς της δοκού, των τιμών του φορτίου P που μπορεί να παραλάβει, της εικόνας των ρηγματώσεων που αναπτύσσονται στην τσιμεντοειδή μήτρα, της αστοχίας των ινών και τέλος, της αστοχίας του μέλους.



Σχ. 5.26: Εικόνα αστοχίας της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β) στην πειραματική δοκιμή στατικής μίας κατεύθυνσης ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων.

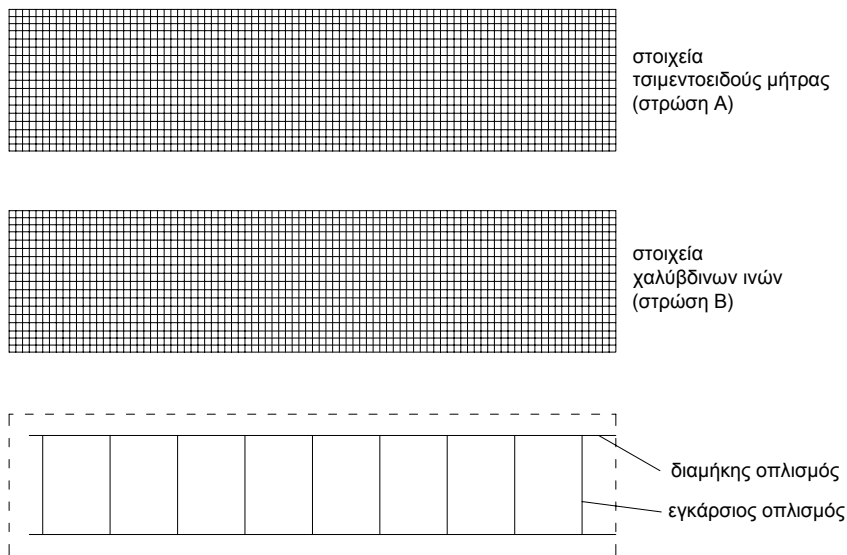
5.7 Δοκοί Τύπου Γ – προσομοίωση και αποτελέσματα

5.7.1 Δισδιάστατο προσομοίωμα δοκού Τύπου Γ

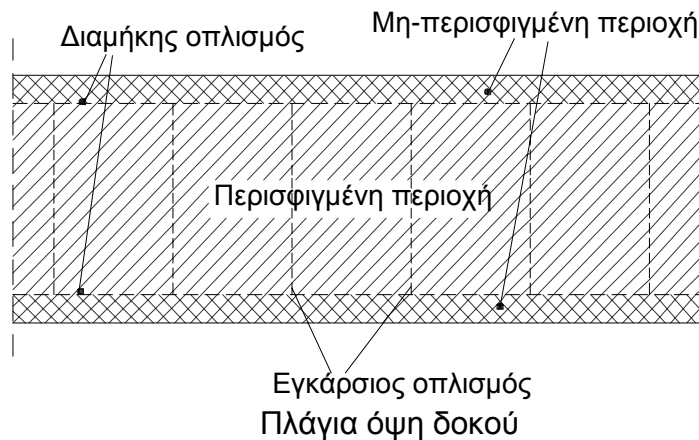
Η δοκός Τύπου Γ αποτελεί συνδυασμό των δοκών Α και Β. Πρόκειται για δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη και εγκάρδιο οπλισμό πανομοιότυπο με εκείνον της συμβατικής δοκού Ο/Σ. Η διαδικασία μόρφωσης του δισδιάστατου προσομοιώματος της δοκού Τύπου Γ είναι όμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για τις δοκούς Τύπου Α και Β. Και σε αυτή την περίπτωση το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελείται από επάλληλες στρώσεις Π.Σ. που συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς κόμβους. Στο Σχήμα 5.27 παρουσιάζονται τα διαφορετικά επίπεδα Π.Σ. από τα οποία αποτελείται το προσομοίωμα της ινοπλισμένης δοκού με συμβατικό οπλισμό.

Για την τσιμεντοειδή μήτρα της δοκού Τύπου Γ, η περιοχή που περικλείεται από τον εγκάρσιο οπλισμό θεωρείται περισφιγμένη, ενώ η περιοχή που βρίσκεται εκτός των ορίων του εγκάρσιου οπλισμού θεωρείται μη-περισφιγμένη (Σχήμα 5.28) και επομένως για τις

διαφορετικές αυτές περιοχές υιοθετούνται οι νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων των Σχημάτων 5.6γ και 5.6δ, αντίστοιχα.



Σχ. 5.27: Τα επάλληλα δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το δισδιάστατο προσομοίωμα της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ).

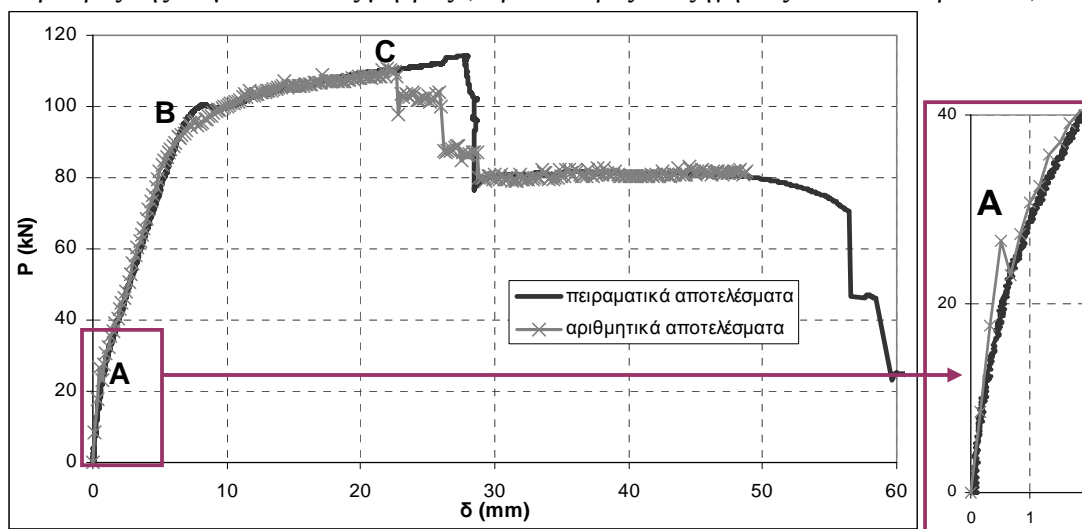


Σχ. 5.28: Οι θεωρούμενες περισφιγμένες και μη-περισφιγμένες περιοχές της τσιμεντοειδούς μήτρας της δοκού Τύπου Γ.

5.7.2 Αποτελέσματα για τη στατική μονοτονική φόρτιση

Αρχικά, η δοκός Τύπου Γ υποβάλλεται σε στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων και τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά στο Σχήμα 5.29. Επιβεβαιώνεται ότι η αριθμητική καμπύλη $P-\delta$ περιγράφει με αρκετή ακρίβεια την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Για μικρή ακόμα τιμή της μετατόπισης εμφανίζεται στην αριθμητική καμπύλη μια απότομη πτώση της αντοχής (σημείο Α), που αντιστοιχεί στην απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας και στην

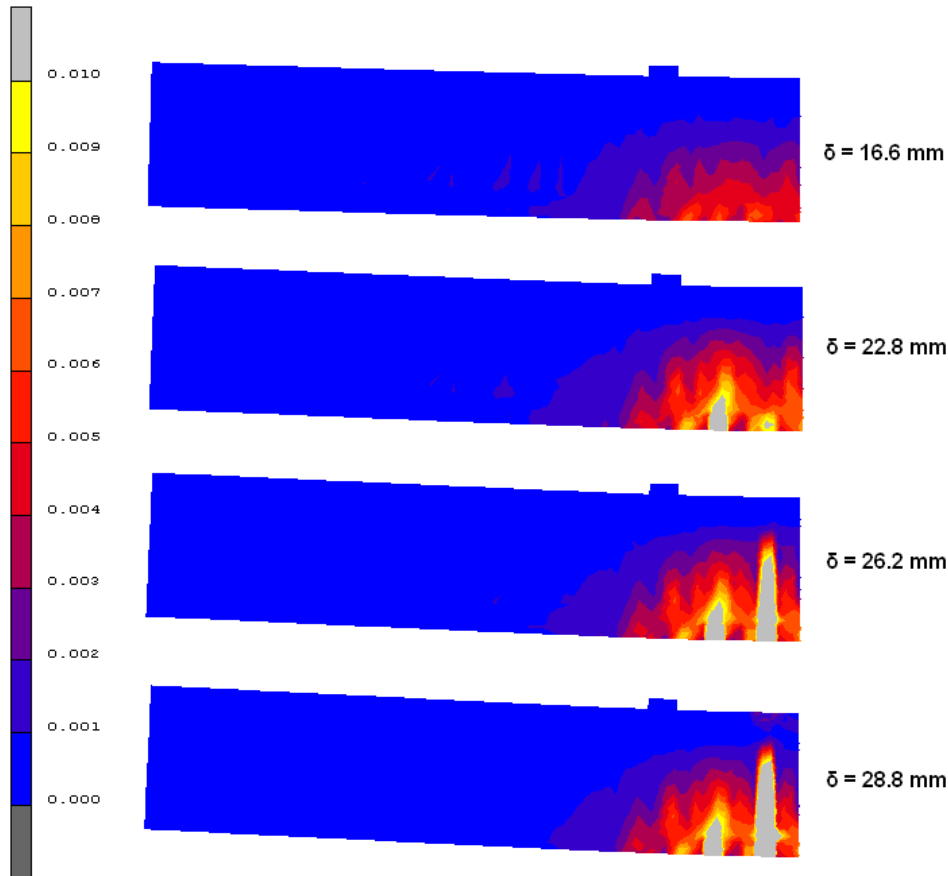
εμφάνιση των πρώτων ρηγματώσεων. Αμέσως μετά από αυτό το «άλμα» στο διάγραμμα, η φέρουσα ικανότητα της δοκού αυξάνεται, μέχρι το σημείο Β που αντιστοιχεί στη διαρροή του χάλυβα οπλισμού. Στη συνέχεια, η φέρουσα ικανότητα της δοκού αυξάνεται με πολύ πιο αργό ρυθμό μέχρι το σημείο C που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή. Ο απότομος φθίνων κλάδος που ακολουθεί, αντιπροσωπεύει την αστοχία των χαλύβδινων ινών λόγω εξόλκευσης, εξαιτίας της εκτεταμένης ρηγμάτωσης της τσιμεντοειδούς μήτρας. Ύστερα από την απώλεια της συνεισφοράς των ινών, τις εφελκυστικές δυνάμεις παραλαμβάνει μόνον ο διαμήκης οπλισμός. Μόλις ξεπεραστεί η παραμόρφωση θραύσης του διαμήκους οπλισμού, επέρχεται η αστοχία της δοκού. Από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, επιβεβαιώνεται για μια ακόμη φορά η αποτελεσματικότητα του αριθμητικού προσομοιώματος στην εκτίμηση της συνολικής συμπεριφοράς του μελετώμενου συστήματος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά, όσον αφορά στην αρχική δυσκαμψία του συστήματος, στο σημείο διαρροής του οπλισμού, στη μέγιστη αντοχή της δοκού και στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Παρατηρείται ότι, αντί για το ένα πτωτικό «άλμα» που εμφανίζεται στην πειραματική καμπύλη, η αριθμητική καμπύλη παρουσιάζει τρία μικρότερα διαδοχικά «άλματα». Βέβαια, τα τρία αυτά διαδοχικά «άλματα» της αριθμητικής καμπύλης και το μοναδικό «άλμα» της πειραματικής καμπύλης αντιστοιχούν συνολικά στη ίδια απώλεια αντοχής. Τα τρία διαδοχικά «άλματα» οφείλονται στη διαδοχική αστοχία ομάδων ινών και σε βλάβες της τσιμεντοειδούς μήτρας (περισσότερες επεξηγήσεις δίνονται παρακάτω).



Σχ. 5.29: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ), υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων και λεπτομέρεια του χαρακτηριστικού σημείου Α.

Στο Σχήμα 5.30 απεικονίζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης όπως προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση, για χαρακτηριστικές τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Αρχικά, παρατηρείται η ανάπτυξη πολλαπλών ρωγμών, μικρού όμως εύρους, χαρακτηριστικό του ινοοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία. Η σύγκριση του Σχήματος 5.30 με το Σχήμα 5.11, στο οποίο απεικονίζονται οι παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης της συμβατικής δοκού Ο/Σ, όπου εμφανίζονται λίγες διακριτές αλλά μεγαλύτερου εύρους ρωγμές, αναδεικνύει το χαρακτηριστικό αυτό του

ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Καθένα από τα δύο πρώτα «άλματα» που εμφανίζονται στην αριθμητική καμπύλη του Σχήματος 5.29 στο σημείο C, αντιστοιχούν στο άνοιγμα μιας κύριας ρωγμής που συνοδεύεται από αστοχία των χαλύβδινων ινών, με αποτέλεσμα την απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας της ινοπλισμένης δοκού. Αυτό συμβαίνει για τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης ίσες με 22.8 mm και 26.2 mm, αντίστοιχα. Το τρίτο διαδοχικό κατακόρυφο «άλμα» της αριθμητικής καμπύλης μετά το σημείο C συμπίπτει με την αρχή της σύνθλιψης της μη-περισφιγμένης τσιμεντοειδούς μήτρας στη θλιβόμενη περιοχή της δοκού, μετά την εξάντληση της θλιπτικής αντοχής της μήτρας, για τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης ίση με 28.8 mm.



Σχ. 5.30: Παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ) υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

Στο Σχήμα 5.31 παρουσιάζονται τα πεδία των αρνητικών τιμών της πλαστικής παραμόρφωσης. Στο πρώτο στιγμιότυπο φαίνεται ουσιαστικά η θλιβόμενη ζώνη χωρίς βλάβες (θραύση) της τσιμεντοειδούς μήτρας, για επιβαλλόμενη μετατόπιση ίση με 28.6 mm. Πρόκειται για το βήμα φόρτισης ακριβώς πριν την εμφάνιση του τρίτου πτωτικού «άλματος» της αριθμητικής καμπύλης του Σχήματος 5.29, ενώ το δεύτερο στιγμιότυπο αφορά το βήμα φόρτισης κατά το οποίο συμβαίνει η απότομη αυτή μείωση της αντοχής της δοκού. Φαίνεται καθαρά η απότομη μεταβολή στην εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων του Σχήματος 5.31 λόγω της σύνθλιψης της τσιμεντοειδούς μήτρας στη θλιβόμενη περιοχή, στο συγκεκριμένο βήμα της φόρτισης.

Η εικόνα της αστοχίας της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό κατά την πειραματική δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.32. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.30 και 5.31 με το Σχήμα 5.32, παρατηρείται ότι η εικόνα των βλαβών (ρηγμάτωση και αστοχία σε θλίψη της τσιμεντοειδούς μήτρας) που προκύπτει από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι ανάλογη αυτής που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης.



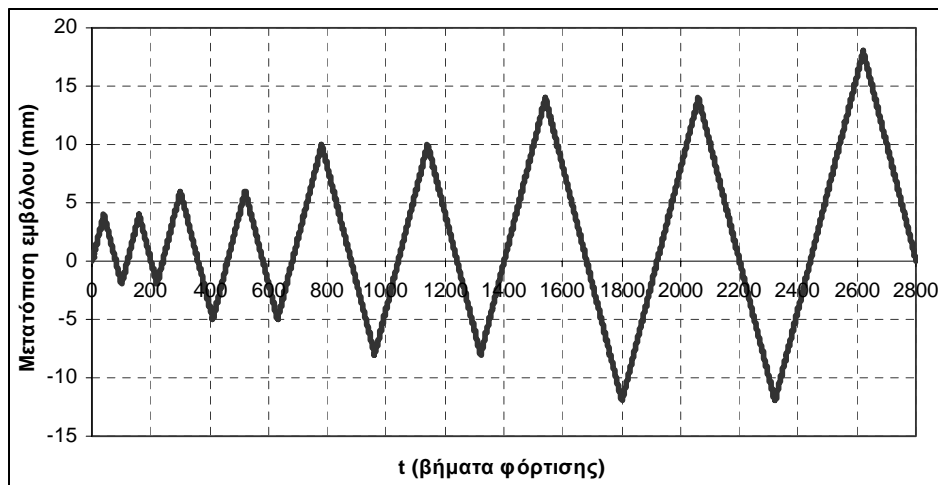
Σχ. 5.31: Πεδία των αρνητικών τιμών της πλαστικής παραμόρφωσης για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ) υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, σε χαρακτηριστικές τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχ. 5.32: Εικόνα αστοχίας της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ) στην πειραματική δοκιμή στατικής μονοτονικής κάμψης τεσσάρων σημείων.

5.7.3 Αποτελέσματα για τη στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση

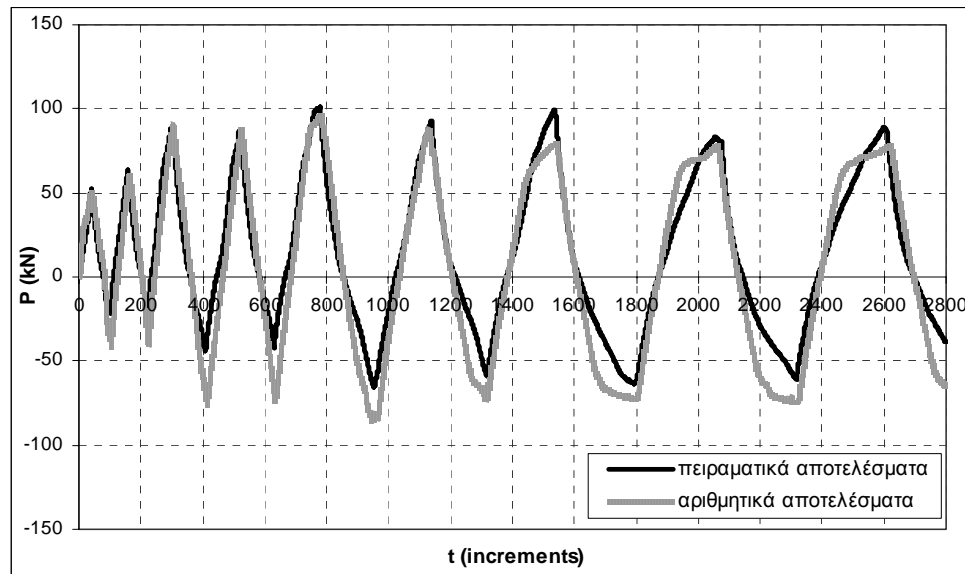
Ακολουθώς, η δοκός ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό υποβάλλεται σε στατική μονοτονική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων. Το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα σε αυτή την περίπτωση είναι πανομοιότυπο με αυτό που μορφώθηκε για τη στατική μονοτονική κάμψη, ενώ συμπεριλαμβάνεται και το σύστημα των δύο μεταλλικών πλακιδίων, μέσω του οποίου εφαρμόζεται η ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων. Η ιστορία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπως καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία και εφαρμόστηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.33.



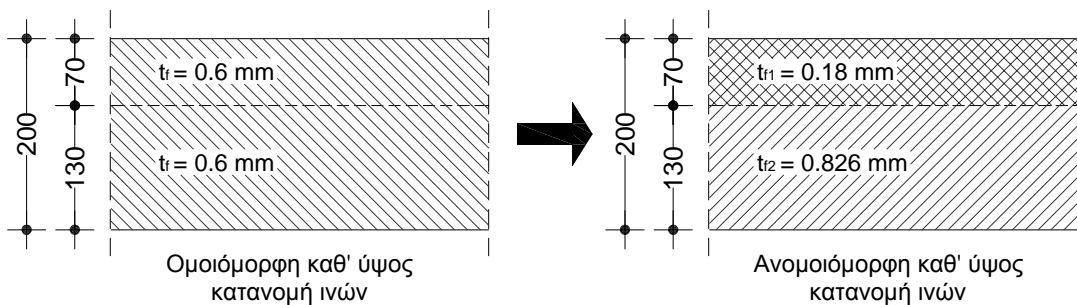
Σχ. 5.33: Ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης υπό τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση παρουσιάζονται μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά στο Σχήμα 5.34, σε όρους τιμών του φορτίου P και βημάτων φόρτισης. Από τη σύγκριση των δύο καμπυλών, παρατηρείται ότι υπάρχει κάποια απόκλιση στις τιμές του μέγιστου φορτίου P που προκύπτουν κατά την αντιστροφή της φόρτισης από την αριθμητική ανάλυση και την πειραματική δοκιμή. Συγκεκριμένα, το αριθμητικό προσομοίωμα φαίνεται να υπερεκτιμά την αντοχή της ινοπλισμένης δοκού στην αντιστροφή της φόρτισης. Το γεγονός όμως ότι το αντίστοιχο προσομοίωμα Π.Σ. της δοκού σε στατική μονοτονική κάμψη κατορθώνει να περιγράψει με ιδιαίτερη ακρίβεια τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 5.29), οδήγησε στην αναζήτηση της αιτίας της απόκλισης αυτής. Από την παρατήρηση του δοκιμίου που είχε αστοχήσει κατά την αντίστοιχη δοκιμή προέκυψε ότι η κατανομή των ινών δεν ήταν ομοιόμορφη καθ' ύψος της διατομής της δοκού. Σημαντικό ποσοστό των ινών του ανώτερου τμήματος της διατομής της δοκού είχε συγκεντρωθεί στο κατώτερο τμήμα της. Έτσι, αποφασίστηκε να μεταφερθεί και στο αριθμητικό προσομοίωμα αυτή η ανομοιογενής καθ' ύψος κατανομή των ινών, που έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη του απαραίτητου ποσοστού κατ' όγκο ινών στο ανώτερο τμήμα της δοκού. Η προσομοίωση της ανομοιογενούς κατανομής των ινών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κατάλληλη τροποποίηση του ισοδύναμου πάχους t_f

που δίνεται στη στρώση Π.Σ. του ομογενούς φύλλου χάλυβα που προσομοιώνει τη συνεισφορά των ινών στο ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Μετά από μία γρήγορη εκτίμηση, χωρίστηκε η δοκός σε δύο τμήματα, άνω και κάτω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.35 και υπολογίστηκαν τα νέα πάχη t_f που αντιστοιχούν στα τμήματα αυτά, έτσι ώστε το τελικό ποσοστό κατ' όγκο των ινών στο μίγμα να είναι ίδιο με το αρχικό.



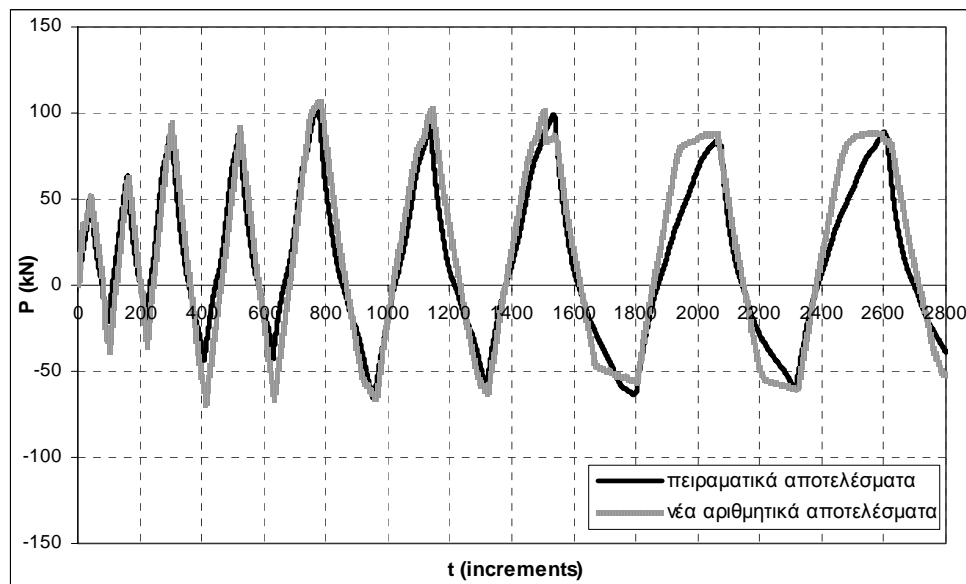
Σχ. 5.34: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύπος Γ) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.



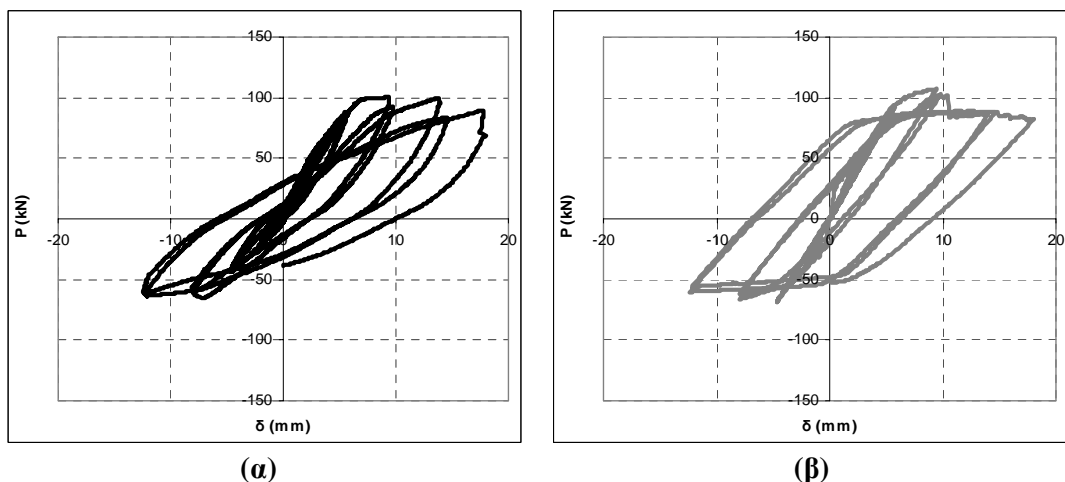
Σχ. 5.35: Σχηματική απεικόνιση της τροποποίησης της τιμής του πάχους t_f του στρώματος Π.Σ. που προσομοιώνει τη συνεισφορά των χαλύβδινων ινών του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος για την προσέγγιση της ανομοιόμορφης καθ' ύψος κατανομής των ινών (διαστάσεις σε mm).

Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα νέα αριθμητικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.36 σε όρους τιμών του φορτίου P και βημάτων επιβολής της φόρτισης, ενώ στο Σχήμα 5.37 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη μορφή καμπυλών δύναμης-μετατόπισης. Συμπεραίνεται ότι, μετά την ακριβέστερη προσομοίωση της ανομοιόμορφης καθ' ύψος κατανομής των ινών που παρατηρήθηκε στο δοκίμιο, οι νέες αριθμητικές καμπύλες κατορθώνουν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες πειραματικές σε σχέση με την αρχική δυσκαμψία του συστήματος, την εκτίμηση των τιμών του φορτίου P που μπορεί να φέρει η δοκός και κατά τις δύο φορές της φόρτισης

και τη γενικότερη συμπεριφορά της δοκού στη στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων. Μια διαφορά που παρατηρείται ανάμεσα στα πειραματικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορά τη μορφή των τελευταίων βρόχων υστέρησης, καθώς στην αριθμητική καμπύλη του Σχήματος 5.37β αυτοί εμφανίζονται πιο πλούσιοι από τους αντίστοιχους του Σχήματος 5.37α. Φαίνεται ότι η μέθοδος της διανεμημένης ρωγμής που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της εξέλιξης της ρηγμάτωσης δεν αποδίδει με την απαιτούμενη ακρίβεια το κλείσιμο των ανοιγμένων ρωγμών και το εκ νέου άνοιγμα των προηγούμενα αναπτυχθεισών ρωγμών, κατά την αντιστροφή της φόρτισης. Αυτό έχει αντίκτυπο στην υστερητική συμπεριφορά της δοκού σε μεγαλύτερες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης, για τις οποίες το εύρος των ρωγμών έχει αυξηθεί σημαντικά.

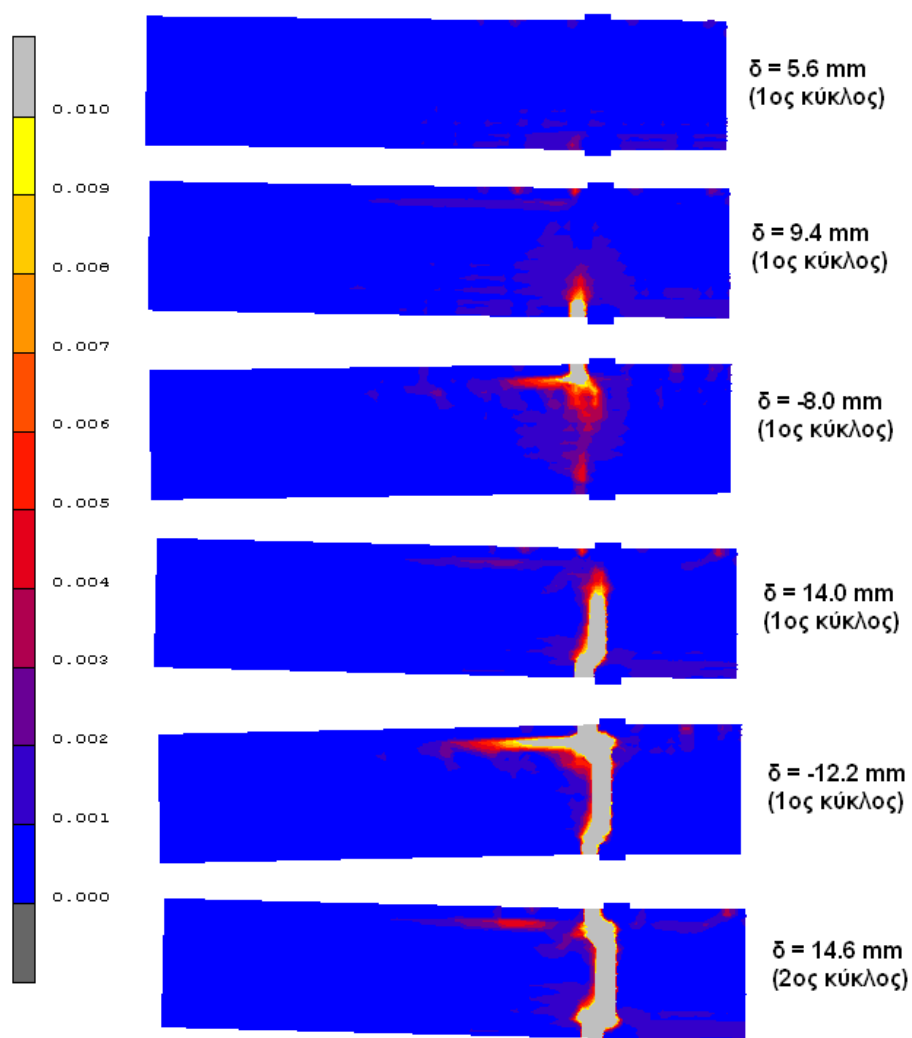


Σχ. 5.36: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύπος Γ) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων με τα νέα αριθμητικά μετά την προσομοίωση της ανομοιόμορφης καθ' ύψος κατανομής των ινών.



Σχ. 5.37: Σύγκριση της α) πειραματικής και β) αριθμητικής καμπύλης $P - \delta$ για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Τύπος Γ) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Στο Σχήμα 5.38 απεικονίζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης όπως προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση, για χαρακτηριστικές τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Στο πρώτο στιγμιότυπο φαίνεται η αρχή της ρηγμάτωσης, ενώ στα δύο επόμενα φαίνεται η ανάπτυξη μίας κύριας ρωγμής, τόσο κατά τη θετική όσο και κατά την αρνητική φορά της φόρτισης. Με την εξέλιξη της φόρτισης, η κύρια ρωγμή αναπτύσσεται περαιτέρω σε μήκος και εύρος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.38 για μετατόπιση ίση με 14 mm. Στη συνέχεια, οι δύο κύριες ρωγμές που αναπτύσσονται στις εφελκυόμενες περιοχές της δοκού αντίστοιχα, ανοίγουν τόσο, ώστε τελικά να ενωθούν, δημιουργώντας μια ρωγμή που διατρέχει όλο το ύψος της δοκού. Στο Σχήμα 5.39 παρουσιάζεται η εικόνα της αστοχίας της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό, κατά την πειραματική δοκιμή ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.38 και 5.39 παρατηρείται ότι η εικόνα της ρηγμάτωσης που προκύπτει από το διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι ανάλογη αυτής που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης.



Σχ. 5.38: Παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ) υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

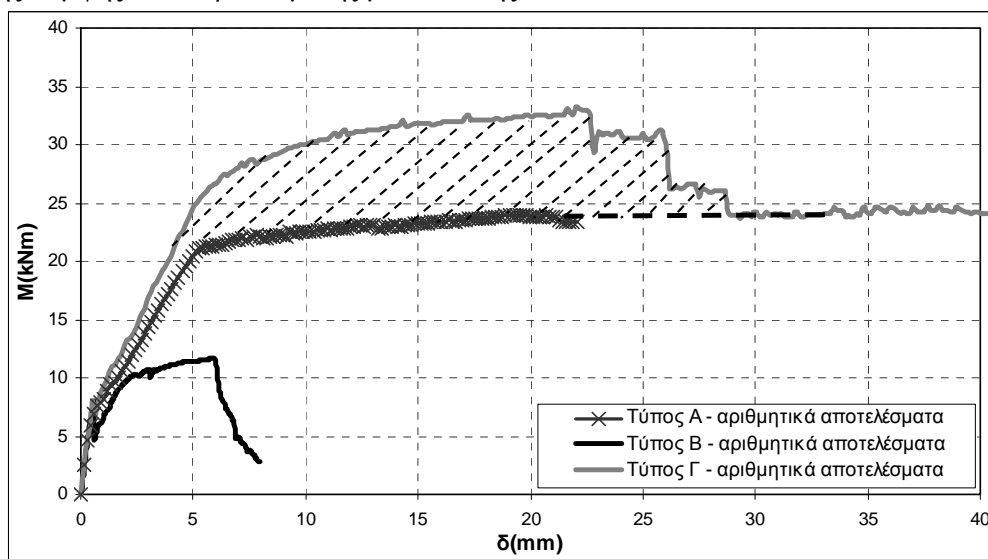
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί το σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης, που αναδείχθηκε μέσα από τη μελέτη της παρούσας υποπαραγράφου. Καθώς η συνεισφορά των ινών και της τσιμεντοειδούς μήτρας λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά κατά την προσομοίωση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης κάθε πιθανής ανομοιογενούς κατανομής των χαλύβδινων ινών καθ' ύψος της διατομής μιας δοκού. Μάλιστα, όπως αποδείχθηκε, η προσομοίωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της απλής διαδικασίας τροποποίησης του ισοδύναμου πάχους t_f που θεωρείται για τη στρώση των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τη συνεισφορά των ινών.



Σχ. 5.39: Εικόνα αστοχίας της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό (Τύπος Γ) στην πειραματική δοκιμή στατικής ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων.

5.8 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των τριών τύπων δοκών που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο υπό στατική μονοτονική φόρτιση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.40 σε όρους ροπής κάμψης και επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχ. 5.40: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις δοκούς Τύπου Α, Β και Γ, υπό στατική μονοτονική φόρτιση.

Μέσω της σύγκρισης των καμπυλών για τις δοκούς Τύπου Α και Β, αναδεικνύεται η ευεργετική παρουσία του διαμήκους οπλισμού για την ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων, ο οποίος δεν μπορεί να αντικατασταθεί από τη χρήση μόνο χαλύβδινων ιών. Στην περίπτωση της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό, η αστοχία επέρχεται για μικρότερες τιμές της δύναμης και κυρίως της μετατόπισης, σε σχέση με τη δοκό Ο/Σ, καθώς η κύρια ρωγμή ανοίγει και εξελίσσεται γρήγορα, χωρίς τη δυνατότητα περαιτέρω ανάληψης φορτίου και παραμόρφωσης. Η δοκός Τύπου Α επιδεικνύει σχεδόν διπλάσια φέρουσα ικανότητα σε σχέση με αυτή της δοκού Τύπου Β, καθώς επίσης και σημαντικά μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης, λόγω της παρουσίας των διαμήκων ράβδων οπλισμού. Βέβαια, η συμπεριφορά των δοκών Τύπου Β κάθε άλλο παρά ψαθυρή μπορεί να θεωρηθεί, εξαιτίας του σχετικά υψηλού λόγου της μετατόπισης αστοχίας προς τη μετατόπιση διαρροής.

Από τη σύγκριση των καμπυλών για τις δοκούς Τύπου Α και Γ συμπεραίνεται ότι η χρήση τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής με χαλύβδινες ίνες με αγκιστροειδή άκρα σε συνδυασμό με συμβατικό οπλισμό, οδηγεί στη δημιουργία δοκών με υψηλότερη φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία σε σχέση με τις δοκούς Ο/Σ, με ταυτόχρονη ικανότητα διατήρησης της ικανότητας παραμόρφωσης σε ανάλογα επίπεδα. Η αύξηση της αντοχής είναι της τάξης του 37%. Η ευεργετική συνεισφορά των ιών στη συνολική συμπεριφορά των δοκών Τύπου Γ είναι εμφανής και διατηρείται για αρκετά μεγάλες τιμές του βέλους κάμψης. Όταν, λόγω εκτεταμένης ρηγμάτωσης, οι ίνες εξολκεύονται από τη μήτρα και χάνεται η συνεισφορά τους, μειώνεται η φέρουσα ικανότητα της δοκού σε επίπεδο ανάλογο της φέρουσας ικανότητας της συμβατικής δοκού Ο/Σ, καθώς τότε οι εφελκυστικές δυνάμεις παραλαμβάνονται αποκλειστικά από το διαμήκη οπλισμό. Για τις υπό μελέτη δοκούς, η επιπλέον ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της δοκού Τύπου Γ, που οφείλεται στην προσθήκη των χαλύβδινων ιών, αντιπροσωπεύεται από τη διαγραμμισμένη περιοχή του Σχήματος 5.40.

Επίσης, οι εικόνες των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης που προκύπτουν για κάθε αριθμητικό προσομοίωμα συμβαδίζουν με τις εικόνες αστοχίας των αντίστοιχων δοκιμίων στις πειραματικές δοκιμές. Παρατηρήθηκε ότι στις δοκούς ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό εμφανίζεται μεγαλύτερος αριθμός ρωγμών, αλλά μικρότερου εύρους σε σχέση με τη συμβατική δοκό Ο/Σ.

Τέλος, για όλες τις περιπτώσεις δοκών που μελετήθηκαν, τόσο σε στατική μονοτονική, όσο και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οι καμπύλες που προέκυψαν από την ανάλυση των αριθμητικών προσομοιωμάτων βρίσκονται γενικά σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες, επιβεβαιώνοντας έτσι, την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης.

6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΩΝ Ο/Σ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ

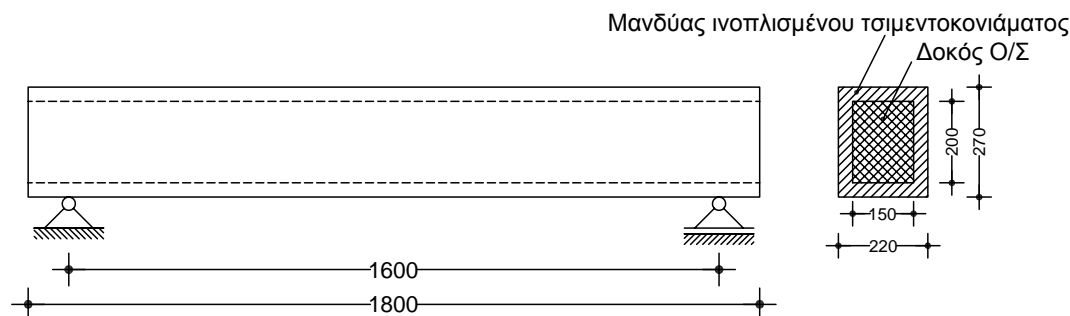
6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό διερευνάται η καμπτική συμπεριφορά συμβατικών δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, μέσω της μόρφωσης των κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων. Αφού έχει διαπιστωθεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης μέσω των απλούστερων αριθμητικών προσομοιωμάτων της συμβατικής δοκού Ο/Σ και των δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του Κεφαλαίου 5, δημιουργούνται στο Κεφάλαιο αυτό πιο σύνθετα προσομοιώματα δοκών που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι περιπτώσεις δοκών Ο/Σ με ή χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που είναι οπλισμένος με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό ή με δομικό πλέγμα. Από το συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων προκύπτουν τέσσερα διαφορετικά δοκίμια δοκών Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Τα δοκίμια αυτά υποβάλλονται σε πειραματικές δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική και στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα διαστήματα αριθμητικά προσομοιώματα των προαναφερθέντων δοκιμών συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά για να διαπιστωθεί η ορθότητα της μεθόδου προσομοίωσης. Επίσης, συγκρίνονται οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης των ενισχυμένων δοκών Ο/Σ με τις αντίστοιχες καμπύλες της συμβατικής δοκού αναφοράς, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης μέσω των υπό μελέτη λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

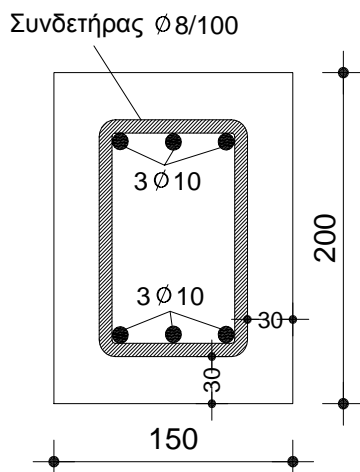
6.2 Χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκών

6.2.1 Γεωμετρία

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκών που μελετώνται παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1. Πρόκειται για μια αμφιέριστη συμβατική δοκού Ο/Σ, πανομοιότυπη με τη δοκού Τύπου Α που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 5, ενισχυμένη με λεπτό μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Για εποπτικούς λόγους επαναλαμβάνεται στο Σχήμα 6.2 η διατομή της δοκού Ο/Σ, διαστάσεων 150×200 mm, η οποία μετά την εφαρμογή του μανδύα πάχους 35 mm σε όλη την περιμέτρή της, έχει διαστάσεις 220×270 mm.



Σχ. 6.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού Ο/Σ που ενισχύεται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (διαστάσεις σε mm).



Σχ. 6.2: Διαστάσεις της διατομής και οπλισμοί της συμβατικής δοκού Ο/Σ (διαστάσεις σε mm).

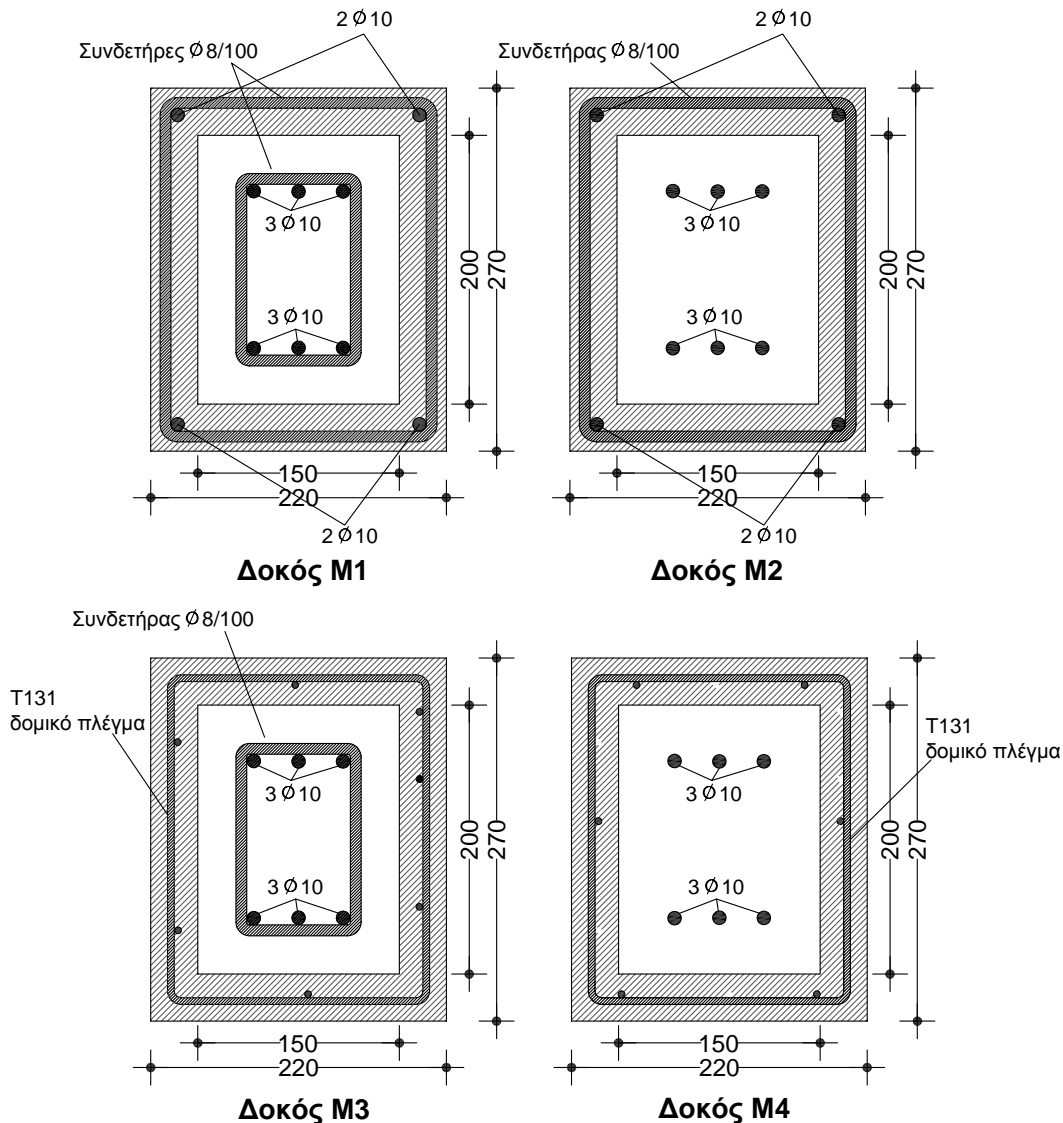
Για τις δοκούς Ο/Σ που αποτελούν τον πυρήνα των ενισχυμένων μελών, θεωρούνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις σχετικά με τον οπλισμό τους:

- δοκοί με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, πανομοιότυπο με εκείνο των δοκών Τύπου Α του Κεφαλαίου 5,
- δοκοί με διαμήκη αλλά χωρίς εγκάρσιο οπλισμό.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόφαση να συμπεριληφθεί ο δεύτερος τύπος δοκών Ο/Σ χωρίς οπλισμό διάτμησης στα υπό μελέτη δοκίμια, βασίστηκε στο γεγονός ότι παλαιότερες υπάρχουσες κατασκευές Ο/Σ συνήθως διαθέτουν πολύ χαμηλά ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού. Είναι χαρακτηριστικό ότι κατασκευές Ο/Σ που κατέρρευσαν κατά τη διάρκεια σεισμών στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια βρέθηκαν με ανεπαρκή οπλισμό διάτμησης, έχοντας συνδετήρες τοποθετημένους ανά 40 ή και 50 cm. Επομένως, αποφασίστηκε να συμπεριληφθούν στη μελέτη δοκοί Ο/Σ χωρίς εγκάρσιο οπλισμό (οριακή περίπτωση) για να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των μελετώμενων μανδύων σε παρόμοιες περιπτώσεις που συναντώνται συχνά στην πράξη. Για την όπλιση των μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος θεωρήθηκαν επίσης δύο διαφορετικές περιπτώσεις, για λόγους σύγκρισης. Για την ενίσχυση της δοκού Ο/Σ εφαρμόστηκαν μανδύες οπλισμένοι:

- με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό,
- με ελαφρύ δομικό πλέγμα τύπου T131.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω περιπτώσεις, προκύπτουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι ενισχυμένων δοκών, που στο εξής θα αναφέρονται για λόγους συντομίας ως M1, M2, M3 και M4 (Σχήμα 6.3).



Σχ. 6.3: Διατομές των τεσσάρων τύπων δοκών, ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (διαστάσεις σε mm).

Ο διαμήκης οπλισμός των προς ενίσχυση δοκών αποτελείται από τρεις διαμήκεις χαλύβδινες ράβδους άνω και κάτω, διαμέτρου 10 mm ($3\text{Ø}10$). Οι δοκοί M1 και M3 διαθέτουν εγκάρσιο οπλισμό συνδετήρων διαμέτρου 8 mm, που είναι τοποθετημένοι σε απόσταση 100 mm μεταξύ τους ($\text{Ø}8/100$), ενώ οι δοκοί M2 και M4 δε διαθέτουν εγκάρσιο οπλισμό. Σχετικά με τους μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για τις δύο πρώτες περιπτώσεις (δοκοί M1 και M2), ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από δύο άνω και κάτω διαμήκεις χαλύβδινες ράβδους, διαμέτρου 10 mm ($2\text{Ø}10$). Ο εγκάρσιος οπλισμός των μανδύων αυτών αποτελείται από δίτμητους συνδετήρες διαμέτρου 8 mm που είναι

τοποθετημένοι σε απόσταση 100 mm μεταξύ τους ($\varnothing 8/100$). Οι μανδύες των δοκιμών M3 και M4 είναι οπλισμένοι με χαλύβδινο δομικό πλέγμα, το οποίο αποτελείται από διαμήκεις και εγκάρσιες ράβδους διαμέτρου 5 mm που είναι τοποθετημένες σε απόσταση 150 mm, μεταξύ τους (δομικό πλέγμα T131), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι διατομές και η διάταξη των οπλισμών των τεσσάρων διαφορετικών τύπων ενισχυμένων δοκών που μελετώνται, ενώ ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις διαφορές του τύπου όπλισης μεταξύ των δοκιμών.

Πίνακας 6.1

Τύποι όπλισης των υπό μελέτη ενισχυμένων δοκών.

	M1	M2	M3	M4
Οπλισμός πυρήνα	Διαμήκης και εγκάρσιος	Διαμήκης μόνο	Διαμήκης και εγκάρσιος	Διαμήκης μόνο
Οπλισμός μανδύα	Διαμήκης και εγκάρσιος	Διαμήκης και εγκάρσιος	Δομικό πλέγμα	Δομικό πλέγμα



Σχ. 6.4: Το δομικό πλέγμα που χρησιμοποιείται για την όπλιση των μανδύων.

6.2.2 Υλικά

Για το σκυρόδεμα και το χάλυβα οπλισμού της συμβατικής δοκού Ο/Σ, καθώς και για την τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής και τις χαλύβδινες ίνες των μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, ισχύουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά που περιγράφονται στην Υποπαράγραφο 5.2.2. Επίσης, ο χάλυβας του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού του μανδύα είναι όμοιος με το χάλυβα οπλισμού της συμβατικής δοκού. Στα ήδη γνωστά χαρακτηριστικά των υλικών πρέπει να προστεθεί η τάση διαρροής του χάλυβα του δομικού πλέγματος που χρησιμοποιείται για την όπλιση του ινοπλισμένου μανδύα, η οποία είναι ίση με 500 MPa.

6.2.3 Τύποι φόρτισης

Όλες οι ενισχυμένες δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική και στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η φόρτιση εφαρμόζεται σε δύο σημεία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος της δοκού και σε απόσταση 190 mm από αυτό.

6.3 Πειραματικές δοκιμές κάμψης δοκών Ο/Σ, ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Όλες οι δοκιμές κάμψης των ενισχυμένων δοκών πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις νέες δοκιμές κάμψης υπό στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση, καθώς και οι διαδικασίες επιβολής της φόρτισης και καταγραφής των μετρήσεων είναι ακριβώς ίδιες με αυτές που περιγράφονται στην Παράγραφο 5.3. Ενδεικτικά, παρατίθενται στα Σχήματα 6.5 και 6.6 οι πειραματικές διατάξεις για την κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση των ενισχυμένων δοκών, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την προετοιμασία των δοκιμών των ενισχυμένων δοκών, δεν έγινε καμία ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας της δοκού Ο/Σ πριν τη σκυροδέτηση του μανδύα και δε χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα σύνδεσης των δύο σωμάτων.



Σχ. 6.5: Πειραματική διάταξη για ενισχυμένη δοκό σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση.

Καθώς οι πειραματικές δοκιμές κάμψης των ενισχυμένων δοκών δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής, αλλά χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων που βασίζονται σε αυτές, δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους στο σημείο αυτό. Τα πειραματικά αποτελέσματα θα παρουσιαστούν παρακάτω, κατά τη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα αριθμητικά. Περισσότερες

λεπτομέρειες για τις πειραματικές δοκιμές κάμψης, για τα πειραματικά αποτελέσματα και εκτενής σχολιασμός αυτών δίνονται από τους Παπαθεοχάρης και Περδικάρης (2009).



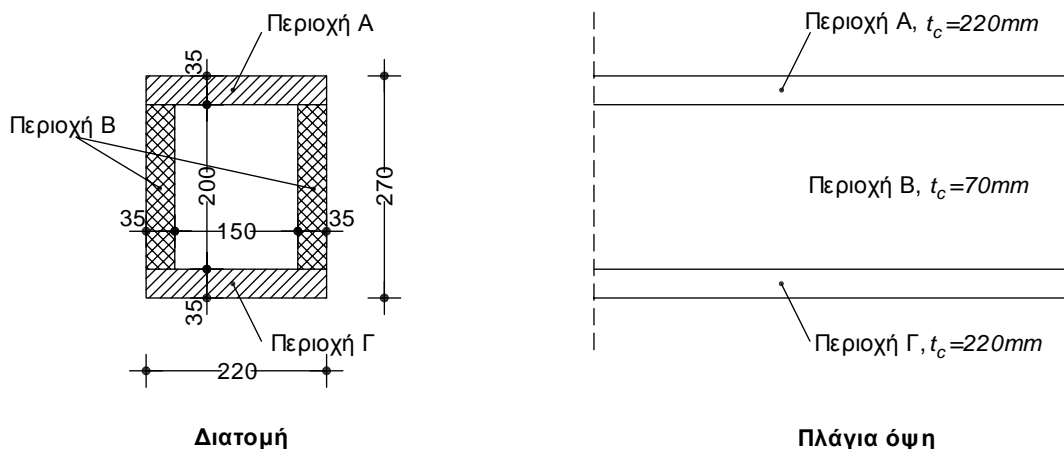
Σχ. 6.6: Πειραματική διάταξη για ενισχυμένη δοκό σε κάμψη τεσσάρων σημείων υπό στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

6.4 Αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης ενισχυμένων δοκών

Τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμών κάμψης των ενισχυμένων δοκών βασίζονται στην ίδια διαδικασία μόρφωσης των δισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.4. Επομένως, χρησιμοποιούνται τα δισδιάστατα ισοπαραμετρικά τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης έντασης του Σχήματος 3.10 (§3.4.2) για την προσομοίωση του σκυροδέματος της δοκού Ο/Σ, καθώς και της τσιμεντοειδούς μήτρας και της συνεισφοράς των χαλύβδινων ινών των μανδύων. Επίσης, χρησιμοποιούνται τα ευθύγραμμα, δικομβικά πεπερασμένα στοιχεία δοκού ορθογωνικής διατομής (βλ. Σχήμα 3.11, §3.4.2) για την προσομοίωση του διαμήκου και εγκάρσιου οπλισμού και του δομικού πλέγματος των ενισχυμένων δοκών.

Στα Π.Σ. που προσομοιώνουν το σκυρόδεμα της δοκού του πυρήνα δίνεται πάχος ίσο με 150 mm, ίσο δηλαδή με το πλάτος της δοκού Ο/Σ. Στα Π.Σ. που προσομοιώνουν την τσιμεντοειδή μήτρα του ινοπλισμένου μανδύα δίνεται πάχος ίσο με αντίστοιχο ισοδύναμο πάχος της περιοχής του μανδύα που τα στοιχεία αυτά προσομοιώνουν. Μπορούν να διακριθούν τρεις διαφορετικές περιοχές του μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Στα στοιχεία που προσομοιώνουν τις περιοχές Α και Γ του μανδύα δίνεται πάχος ίσο με 220 mm, ενώ στα στοιχεία που προσομοιώνουν την περιοχή Β δίνεται ισοδύναμο πάχος ίσο με το άθροισμα του πλάτους των δύο επιμέρους τμημάτων του μανδύα, ίσο δηλαδή με 70 mm. Στα στοιχεία που προσομοιώνουν τη συνεισφορά των χαλύβδινων ινών δίνεται πάχος ίσο με την τιμή που προκύπτει από τη Σχέση (5.5) για τις διάφορες τιμές του t_c . Επομένως, για τις περιοχές Α και Γ του μανδύα, τα στοιχεία που προσομοιώνουν τη συνεισφορά των ινών έχουν πάχος ίσο με 0.88 mm, ενώ για την

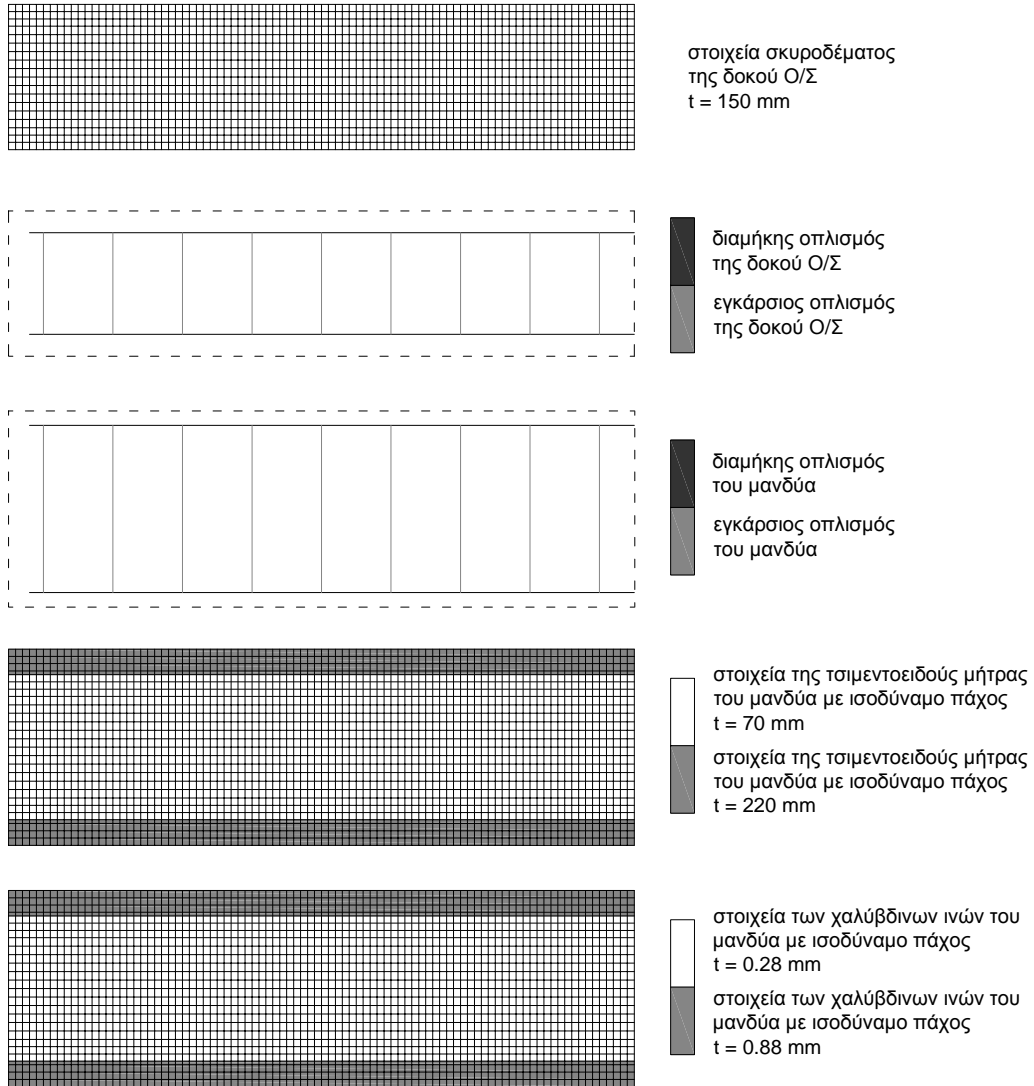
περιοχή Β αντίστοιχα, έχουν πάχος ίσο με 0.28 mm. Στα στοιχεία που προσομοιώνουν το διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό και το δομικό πλέγμα δίνεται εμβαδό διατομής ίσο με το συνολικό (κατά την έννοια του πλάτους) εμβαδό των ράβδων του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού και των ράβδων του πλέγματος, αντίστοιχα, όπως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 5.



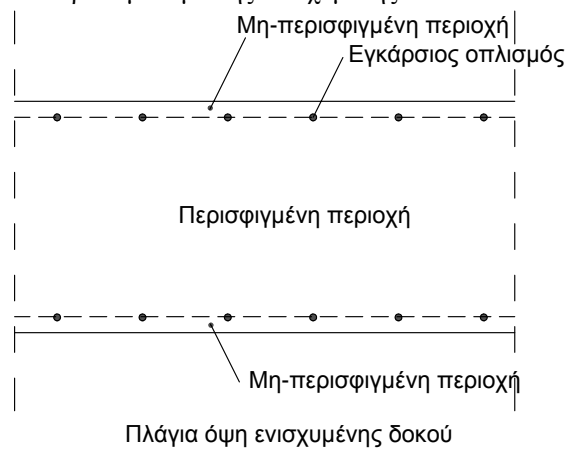
Σχ. 6.7: Οι διαφορετικές τιμές του πάχους των Π.Σ. που προσομοιώνουν την τσιμεντοειδή μήτρα του ινοπλισμένου μανδύα.

Τα γραμμικά Π.Σ. που προσομοιώνουν τον οπλισμό των ενισχυμένων δοκών συνδέονται με το δίκτυο των επίπεδων Π.Σ. που προσομοιώνουν το σκυρόδεμα, την τσιμεντοειδή μήτρα και τη συνεισφορά των ινών, μέσω κοινών κόμβων. Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα επάλληλα δίκτυα Π.Σ., από τα οποία αποτελείται το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της ενισχυμένης δοκού M1.

Για την αριθμητική προσομοίωση του σκυροδέματος της δοκού Ο/Σ, του χάλυβα του διαμήκη και εγκάρσιου οπλισμού της δοκού Ο/Σ και των μανδύων, της τσιμεντοειδούς μήτρας και του χάλυβα των ινών των μανδύων, θεωρούνται οι αντίστοιχοι νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 5.6. Επίσης, στον Πίνακα 5.2 παρατίθενται οι αντίστοιχες ιδιότητες και χαρακτηριστικές τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων που θεωρούνται κατά την αριθμητική προσομοίωση. Επιπρόσθετα, για το χάλυβα του δομικού πλέγματος θεωρείται ελαστοπλαστική συμπεριφορά και ισχύει ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 5.6β με τάση διαρροής ίση με 500 MPa και κράτνυση $H=0.5$ GPa. Το μέτρο ελαστικότητας για το χάλυβα του δομικού πλέγματος είναι ίσο με 210 GPa και ο λόγος Poisson $\nu=0.3$. Για την περίπτωση των ενισχυμένων δοκών, η περιοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας του μανδύα που περικλείεται από τον εγκάρσιο οπλισμό ή το δομικό πλέγμα θεωρείται περισφιγμένη, ενώ η περιοχή που βρίσκεται εκτός ορίων του εγκάρσιου οπλισμού ή του δομικού πλέγματος θεωρείται μη-περισφιγμένη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9.



Σχ. 6.8: Τα επάλληλα δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το δισδιάστατο προσομοίωμα της ενισχυμένης δοκού M1.



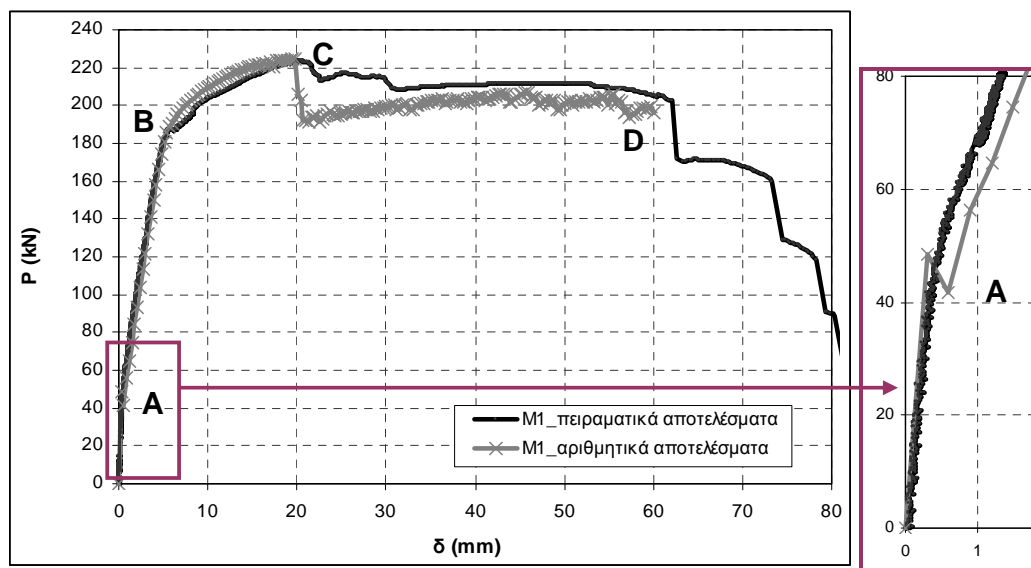
Σχ. 6.9: Οι θεωρούμενες περισφιγμένες και μη-περισφιγμένες περιοχές της τσιμεντοειδούς μήτρας του μανδύα των ενισχυμένων δοκών.

Λόγω της συμμετρίας των συνθηκών στήριξης και φόρτισης του προβλήματος, προσομοιώνεται το μισό μήκος της δοκού λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας, με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού κόστους της αριθμητικής ανάλυσης.

Η επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού MSC-MARC. Η φόρτιση εφαρμόζεται βήμα προς βήμα με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων δ στους κόμβους του μεταλλικού πλακιδίου που χρησιμοποιείται για την επιβολή της φόρτισης. Στη συνέχεια μετρώνται οι προκύπτουσες δυνάμεις P στα σημεία επιβολής της μετατόπισης.

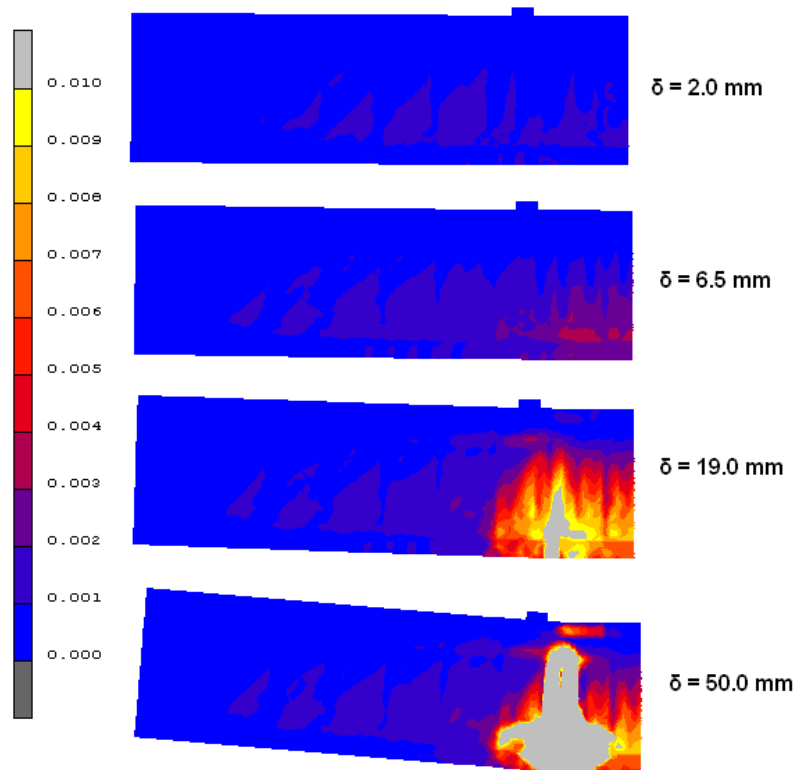
6.5 Συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών υπό στατική μονοτονική κάμψη

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τα προσομοιώματα των δοκιμών κάμψης των τεσσάρων τύπων ενισχυμένων δοκών, υπό στατική μονοτονική φόρτιση, μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για την ενισχυμένη δοκό M1, όπως προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση και την αντίστοιχη πειραματική δοκιμή. Όπως φαίνεται, υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο καμπυλών σε σχέση με τη δυσκαμψία του συστήματος, την έναρξη της ρηγμάτωσης, την τιμή του φορτίου για το οποίο διαρρέει ο χάλυβας οπλισμού και για τις τιμές των αντίστοιχων μετατοπίσεων. Στα πρώτα βήματα της φόρτισης, εμφανίζεται στην καμπύλη $P-\delta$ ένα πτωτικό «άλμα» (σημείο A), το οποίο αντιστοιχεί στη ρηγμάτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή. Το χαρακτηριστικό αυτό σημείο παρουσιάζεται σε μεγέθυνση στη λεπτομέρεια του Σχήματος 6.10. Το σημείο B της καμπύλης αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής του χάλυβα οπλισμού. Από το σημείο αυτό και έπειτα, η συνολική αντοχή του συστήματος συνεχίζει να αυξάνεται, λόγω της συνεισφοράς των ινών, μέχρι η δοκός να φτάσει τη μέγιστη αντοχή της (σημείο C). Ακολουθεί ένας απότομος φθίνων κλάδος που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών, καθώς αυτές εξολκεύονται από την τσιμεντοειδή μήτρα. Στην πειραματική καμπύλη εμφανίζεται επίσης απώλεια της αντοχής, η οποία όμως συμβαίνει σταδιακά και χωρίς την εμφάνιση απότομου κατακόρυφου κλάδου. Μετά την απώλεια της συνεισφοράς των ινών του μανδύα, το φορτίο παραλαμβάνεται από το διαμήκη οπλισμό. Τελικά, με την περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης, ξεπερνιέται η επιμήκυνση θραύσης του διαμήκους οπλισμού, οδηγώντας το δοκίμιο σε αστοχία. Αντίστοιχα, εμφανίζεται στο αριθμητικό προσομοίωμα αριθμητική αστάθεια που έχει ως αποτέλεσμα τον τερματισμό της αριθμητικής διαδικασίας στο σημείο D.

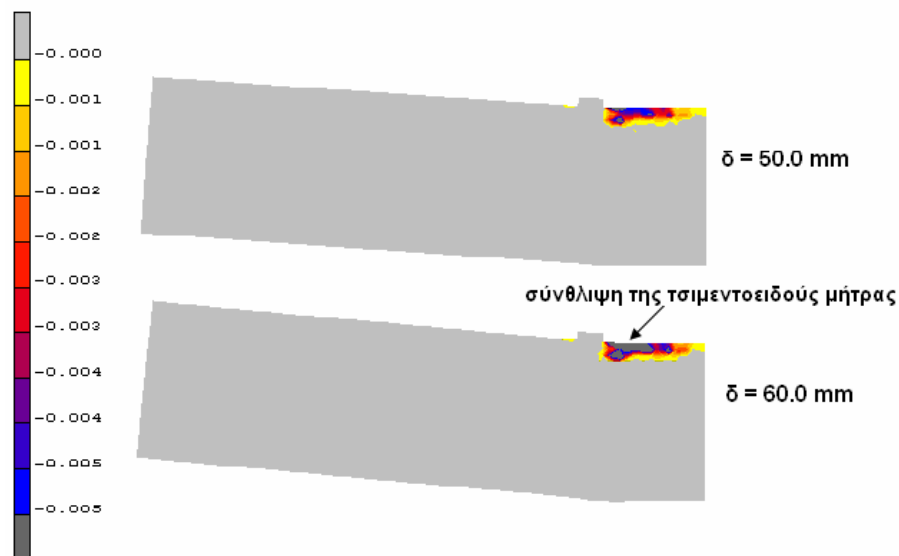


Σχ. 6.10: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M1, υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων και λεπτομέρεια του χαρακτηριστικού σημείου A.

Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης σε χαρακτηριστικά βήματα φόρτισης, όπως προκύπτουν από το αριθμητικό προσομοίωμα της ενισχυμένης δοκού M1 και τα οποία είναι ενδεικτικά της εξέλιξης της ρηγμάτωσης της δοκού. Πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν ταυτόχρονα παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης και στο δίκτυο των Π.Σ. του σκυροδέματος του πυρήνα αλλά και στο δίκτυο των Π.Σ. του τσιμεντοκονιάματος του μανδύα. Στο σχήμα απεικονίζεται ο μέσος όρος των τιμών των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης για τα δύο επάλληλα αυτά δίκτυα. Για μετατόπιση ίση με 2 mm, έχουν ήδη σχηματιστεί οι πρώτες ρωγμές. Ακολούθως, η ρηγμάτωση εξελίσσεται με την ανάπτυξη πολλαπλών ρωγμών, μικρού όμως εύρους. Στο Σχήμα 6.11 φαίνεται η εικόνα της ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη μετατόπιση ίση με 6.5 mm, τη στιγμή της διαρροής του χάλυβα οπλισμού. Το κατακόρυφο άλμα που εμφανίζει η αριθμητική καμπύλη $P-\delta$ στο σημείο C αντιστοιχεί στο απότομο άνοιγμα μιας κύριας ρωγμής που οδηγεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών και την πτώση της φέρουσας ικανότητας του μέλους, το οποίο συμβαίνει για μετατόπιση ίση με 19.0 mm. Στη συνέχεια, η κύρια ρωγή εξελίσσεται, προκαλώντας την αστοχία της δοκού. Επίσης, για μεγάλες τιμές της μετατόπισης, διακρίνονται βλάβες και στη θλιβόμενη περιοχή της τσιμεντοειδούς μήτρας. Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζονται τα πεδία των αρνητικών τιμών της πλαστικής παραμόρφωσης. Στο πρώτο στιγμιότυπο φαίνεται η πλαστικοποιημένη θλιβόμενη ζώνη της δοκού για επιβαλλόμενη μετατόπιση ίση με 50.0 mm, ενώ στο δεύτερο στιγμιότυπο φαίνονται οι βλάβες λόγω σύνθλιψης της μη-περισφιγμένης τσιμεντοειδούς μήτρας, μετά την εξάντληση της θλιπτικής της αντοχής (οι τιμές της παραμόρφωσης για τις περιοχές που απεικονίζονται με σκούρο γκρι χρώμα έχουν ξεπεράσει το όριο του 0.005).



Σχ. 6.11: Παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης για την ενισχυμένη δοκό M1, υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχ. 6.12: Πεδία των αρνητικών τιμών της πλαστικής παραμόρφωσης για την ενισχυμένη δοκό M1 υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, σε χαρακτηριστικές τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

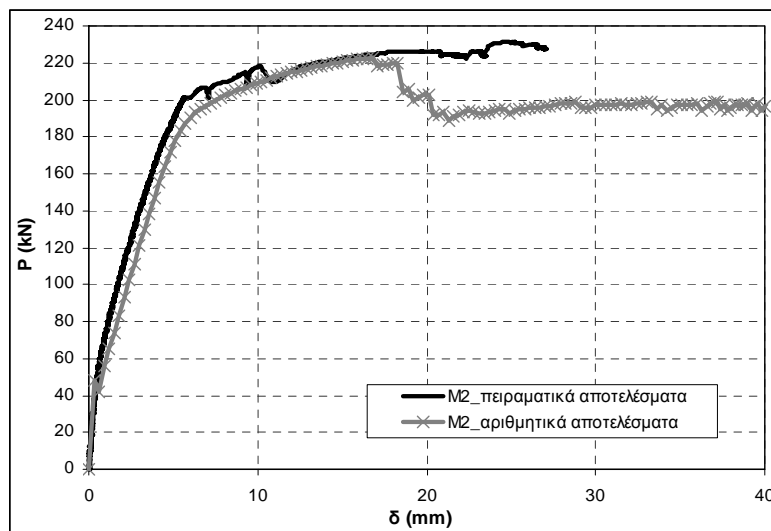
Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η εικόνα της αστοχίας της ενισχυμένης δοκού M1 κατά την πειραματική δοκιμή κάμψης. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 6.11 και 6.12 με το Σχήμα 6.13 παρατηρείται ότι η εικόνα των βλαβών (ρηγμάτωση και αστοχία σε θλίψη της

τσιμεντοειδούς μήτρας) που προκύπτει από το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης. Ακόμη, έχει αξία να σημειωθεί ότι δεν παρατηρήθηκε κανενός είδους αστοχία της διεπιφάνειας μεταξύ της δοκού Ο/Σ και του μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος κατά τις πειραματικές δοκιμές, ούτε εμφανίστηκε η ανάπτυξη σχετικής ολίσθησης μεταξύ τους. Έτσι, φάνηκε ότι τα δύο σώματα συνεργάζονται πλήρως, παρόλο που δεν έγινε καμία ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας της δοκού Ο/Σ πριν τη σκυροδέτηση του μανδύα στα δοκίμια των ενισχυμένων δοκών, αλλά και δε συνδέθηκαν τα δύο σώματα με κάποιο άλλο μηχανικό μέσο. Η πλήρης συνεργασία που επιτυγχάνεται μεταξύ της δοκού Ο/Σ και του μανδύα αποδεικνύεται και από το γεγονός ότι τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό Μ1 (Σχήμα 6.10) βρίσκονται σε καλή συμφωνία. Έχοντας ως δεδομένο ότι στο αριθμητικό προσομοίωμα δε λαμβάνεται υπόψη η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο σωμάτων, με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι αυτά λειτουργούν ως ένα σώμα, το γεγονός ότι αριθμητικό προσομοίωμα και πειραματικό δοκίμιο επιδεικνύουν την ίδια συμπεριφορά, συνεπάγεται ότι και κατά την πειραματική δοκιμή, δοκός Ο/Σ και μανδύας συνεργάζονται πλήρως.



Σχ. 6.13: Εικόνα αστοχίας της ενισχυμένης δοκού Μ1 στην πειραματική δοκιμή στατικής μονοτονικής κάμψης τεσσάρων σημείων.

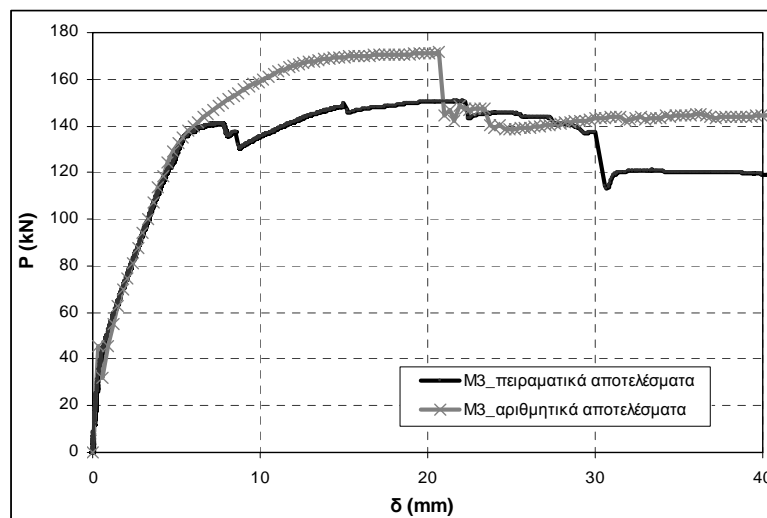
Στα Σχήματα 6.14, 6.15 και 6.16 παρουσιάζονται οι αριθμητικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης που προκύπτουν για τις ενισχυμένες δοκούς Μ2, Μ3 και Μ4, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι η πειραματική δοκιμή κάμψης της ενισχυμένης δοκού Μ2 τερματίστηκε πρόωρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14, καθώς το σερβοϋδραυλικό σύστημα MTS ± 250 kN που χρησιμοποιείται, πλησίασε τα όρια των δυνατοτήτων του και δεν ήταν δυνατό να εφαρμόσει μεγαλύτερο φορτίο. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 6.10 και 6.14, παρατηρείται ότι το δοκίμιο Μ2 επέδειξε ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή αλλά και δυσκαμψία μετά την πρώτη ρηγμάτωση σε σχέση με το δοκίμιο Μ1. Επίσης, παρατηρείται ότι η αριθμητική καμπύλη που προκύπτει από το προσομοίωμα της ενισχυμένης δοκού Μ2, μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το τμήμα της πειραματικής καμπύλης όπως προέκυψε από την αντίστοιχη δοκιμή (Σχήμα 6.14).



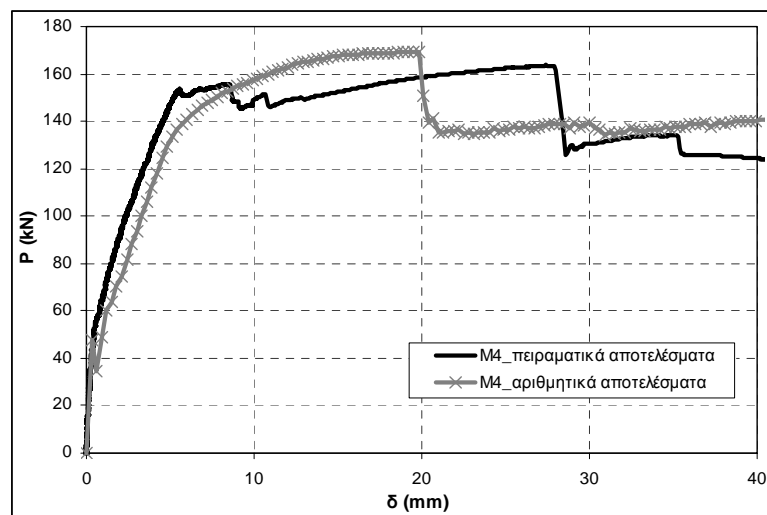
Σχ. 6.14: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M2, υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων.

Αν και οι αριθμητικές καμπύλες για τις δοκούς M1 και M2, των οποίων ο μανδύας οπλίζεται με διαμήκεις ράβδους $\varnothing 10$, βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές, από τη σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τις δοκούς M3 και M4, ο μανδύας των οποίων οπλίζεται με δομικό πλέγμα, προκύπτουν κάποιες αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.15, ενώ υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την αρχική δυσκαμψία του συστήματος, τη δυσκαμψία μετά την πρώτη ρηγμάτωση και το σημείο διαρροής των οπλισμών, παρατηρείται μια διαφοροποίηση στη εκτίμηση του μέγιστου φορτίου P για τη δοκό M3. Επίσης, η αριθμητική καμπύλη δεν μπορεί να περιγράψει την πτώση αντοχής που παρατηρείται στην πειραματική, αμέσως μετά τη διαρροή του οπλισμού. Η πτώση αυτή πιθανώς οφείλεται σε αστοχία κάποιας ράβδου $\varnothing 5$ του δομικού πλέγματος κατά την πειραματική δοκιμή, που δεν μπορεί να αποδοθεί στο αριθμητικό προσομοίωμα. Στην αδυναμία αυτή, οφείλεται πιθανώς και η υπερεκτίμηση της αντοχής της δοκού από το αριθμητικό προσομοίωμα, ενώ τελικά, η απώλεια της συνεισφοράς των ινών αντιστοιχεί στην ίδια πτώση της αντοχής και στις δύο καμπύλες. Αντίστοιχες παρατηρήσεις προκύπτουν και από τη σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M4 (Σχήμα 6.16). Στη συγκεκριμένη περίπτωση βέβαια, η αριθμητική καμπύλη είναι πιο κοντά στην αντίστοιχη πειραματική, εκτιμώντας με μεγαλύτερη ακρίβεια την τιμή του μέγιστου φορτίου P που μπορεί να φέρει η ενισχυμένη δοκός, καθώς και την αντοχή της μετά από την απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Και για τις δύο δοκούς M3 και M4 (Σχήματα 6.15 και 6.16, αντίστοιχα) παρουσιάζεται διαφοροποίηση μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών σε σχέση με την τιμή της μετατόπισης δ για την οποία εμφανίζεται το «άλμα» που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Παρατηρείται ότι και στις δύο αυτές περιπτώσεις τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πιο συντηρητικά, καθώς η απώλεια της συνεισφοράς των ινών συμβαίνει για μικρότερες τιμές της μετατόπισης, σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Γενικά, παρατηρείται ότι εμφανίζονται διαφοροποιήσεις μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών M1 και M2 (Σχήματα 6.10 και 6.14) και αντίστοιχα των M3 και M4 (Σχήματα 6.15 και 6.16) σε σχέση με την τιμή του μέγιστου φορτίου P που μπορεί να φέρει η κάθε δοκός, καθώς και στη δυσκαμψία μετά την αρχική ρηγμάτωση. Συγκεκριμένα, η δοκός M2 εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με τη δοκό M1. Επίσης, η δοκός M4 εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με τη δοκό M3. Αντίθετα, μεταξύ των αντίστοιχων αριθμητικών αποτελεσμάτων δεν εμφανίζονται ανάλογες διαφοροποιήσεις. Έτσι, κάποιες αποκλίσεις που προκύπτουν μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, κυρίως για τις δοκούς M2, M3 και M4 (Σχήματα 6.14, 6.15 και 6.16, αντίστοιχα), σε σχέση με την αντοχή και τη δυσκαμψία, οφείλονται και στις διαφορές των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών.



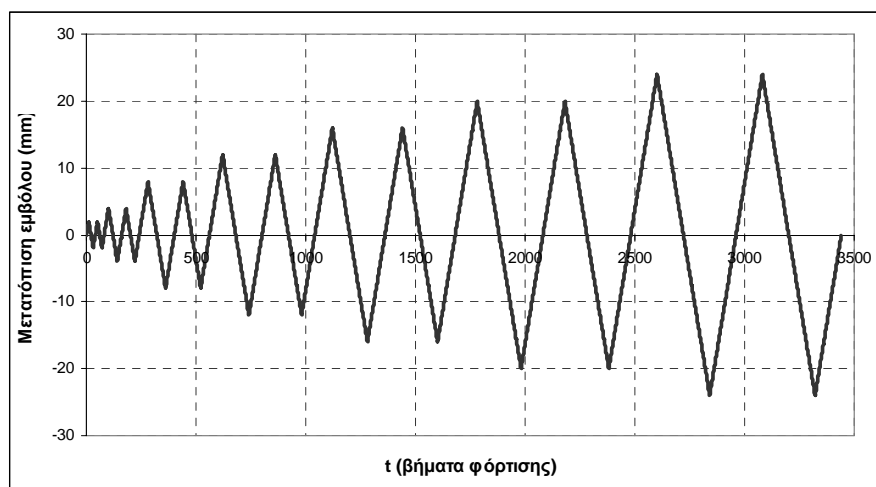
Σχ. 6.15: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M3, υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων.



Σχ. 6.16: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M4, υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων.

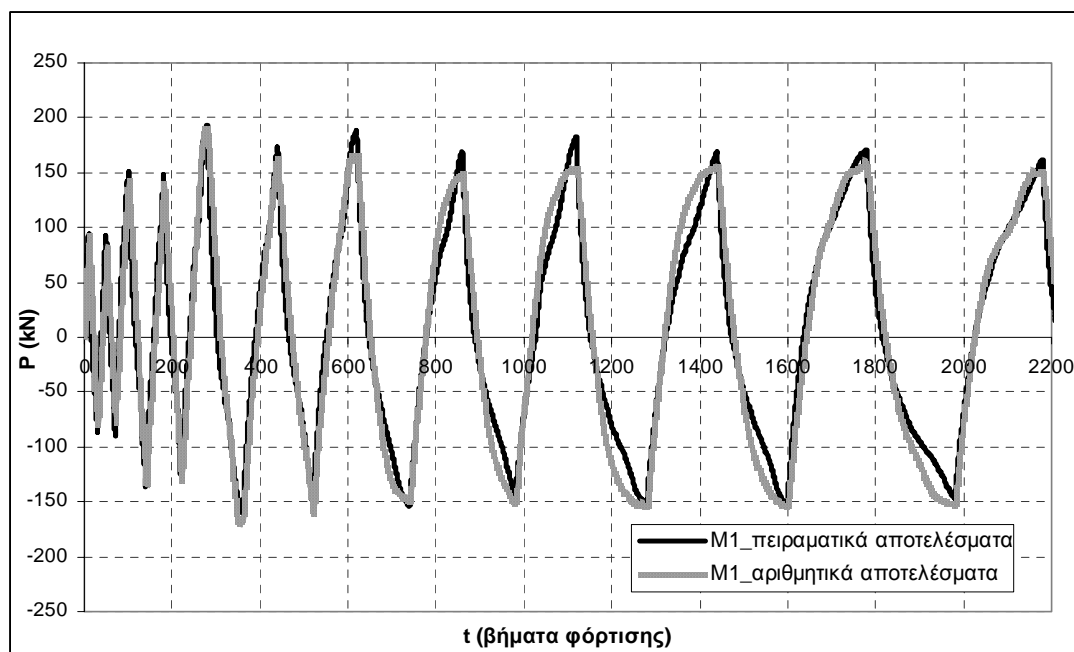
6.6 Συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη

Επόμενο στάδιο της έρευνας αποτέλεσε η αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς των τεσσάρων τύπων των ενισχυμένων δοκών, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων. Το αριθμητικό προσομοίωμα της κάθε ενισχυμένης δοκού σε ανακυκλιζόμενη κάμψη είναι πανομοιότυπο με το αριθμητικό προσομοίωμα της αντίστοιχης δοκού σε στατική μονοτονική κάμψη, με διαφοροποίηση στη διαδικασία επιβολής της φόρτισης. Στα νέα προσομοιώματα υιοθετείται το σύστημα των πλακιδίων του Σχήματος 5.7, μέσω του οποίου εφαρμόζεται η ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων. Η ιστορία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπως καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία και εφαρμόστηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.17. Πρόκειται για επιβολή δύο κύκλων φόρτισης καθορισμένου μέγιστου βέλους κάμψης της δοκού, με αυξανόμενο κάθε φορά εύρος κατά $\pm 4\text{mm}$.



Σχ. 6.17: Ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης υπό τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.

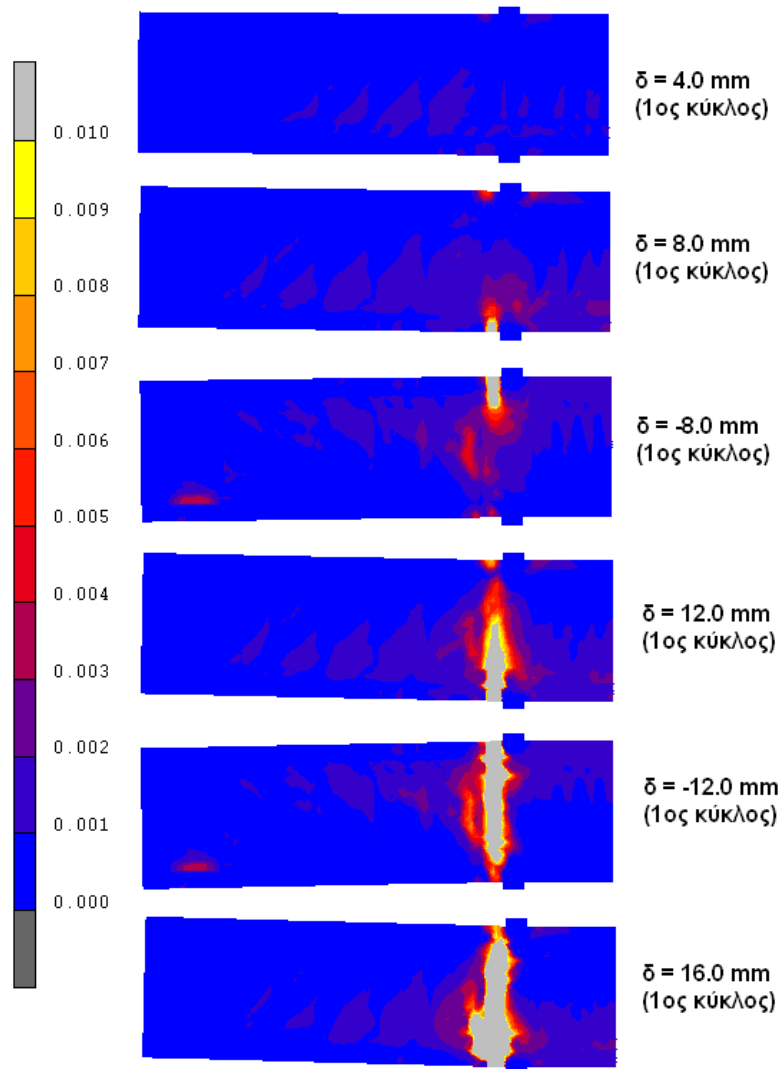
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση του διδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος της ενισχυμένης δοκού M1 υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη, παρουσιάζονται μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά στο Σχήμα 6.18, σε όρους τιμών φορτίου P και βημάτων φόρτισης. Όπως φαίνεται, υπάρχει και στην περίπτωση αυτή, καλή συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων σε ό,τι αφορά στη γενικότερη συμπεριφορά του συστήματος, αλλά και ειδικότερα στη δυσκαμψία του συστήματος και στις τιμές του φορτίου P που μπορεί να φέρει η ενισχυμένη δοκός και κατά τις δύο κατευθύνσεις της φόρτισης.



Σχ. 6.18: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M1, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Στο Σχήμα 6.19 απεικονίζονται τα πεδία των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης, όπως προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση, για επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Σημειώνεται και πάλι ότι στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκών υπάρχουν ταυτόχρονα παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης και στο δίκτυο των Π.Σ. του σκυροδέματος του πυρήνα αλλά και στο δίκτυο των Π.Σ. του τσιμεντοκονιάματος του μανδύα. Στο σχήμα απεικονίζεται ο μέσος όρος των τιμών των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης για τα δύο επάλληλα αυτά δίκτυα. Στο πρώτο στιγμιότυπο απεικονίζονται οι πρώτες ρωγμές που έχουν εμφανιστεί για μετατόπιση ίση με 4.0 mm. Στα δύο επόμενα στιγμιότυπα φαίνεται πως αρχίζει να αναπτύσσεται μία κύρια ρωγμή, τόσο κατά τη θετική όσο και κατά την αρνητική φορά της φόρτισης. Στη συνέχεια, με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων, οι δύο κύριες αυτές ρωγμές που εμφανίζονται στις αντίστοιχες εφελκόμενες περιοχές της δοκού, αναπτύσσονται σε μήκος και εύρος, μέχρι τελικά να ενωθούν σχηματίζοντας μια ρωγμή που διατρέχει όλο το ύψος της δοκού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.19 για επιβαλλόμενη μετατόπιση ίση με 16.0 mm, οδηγώντας στην αστοχία του μέλους. Στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η εικόνα της αστοχίας της ενισχυμένης δοκού M1, κατά την πειραματική δοκιμή ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 6.19 και 6.20 παρατηρείται ότι η εικόνα της ρηγμάτωσης που προκύπτει από το διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή κάμψης.

Στα Σχήματα 6.21, 6.22 και 6.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις των αριθμητικών προσομοιωμάτων των ενισχυμένων δοκών M2, M3 και M4 υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων, μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά, σε όρους τιμών του φορτίου P και βημάτων επιβολής της φόρτισης.

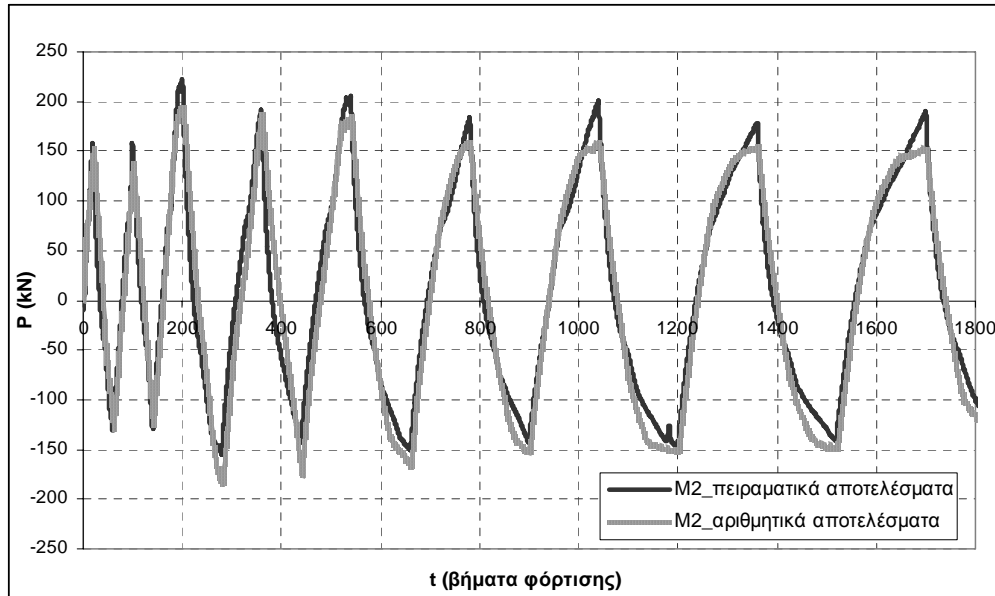


Σχ. 6.19: Παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης για την ενισχυμένη δοκό M1, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων, σε επιλεγμένες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

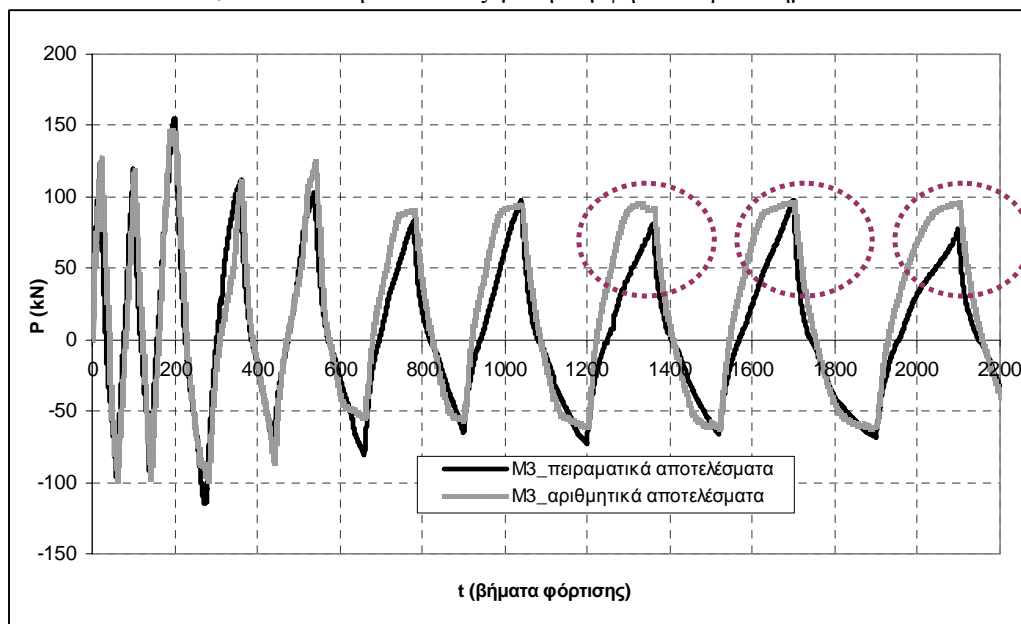


Σχ. 6.20: Εικόνα αστοχίας της ενισχυμένης δοκού M1 στην πειραματική δοκιμή στατικής ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων.

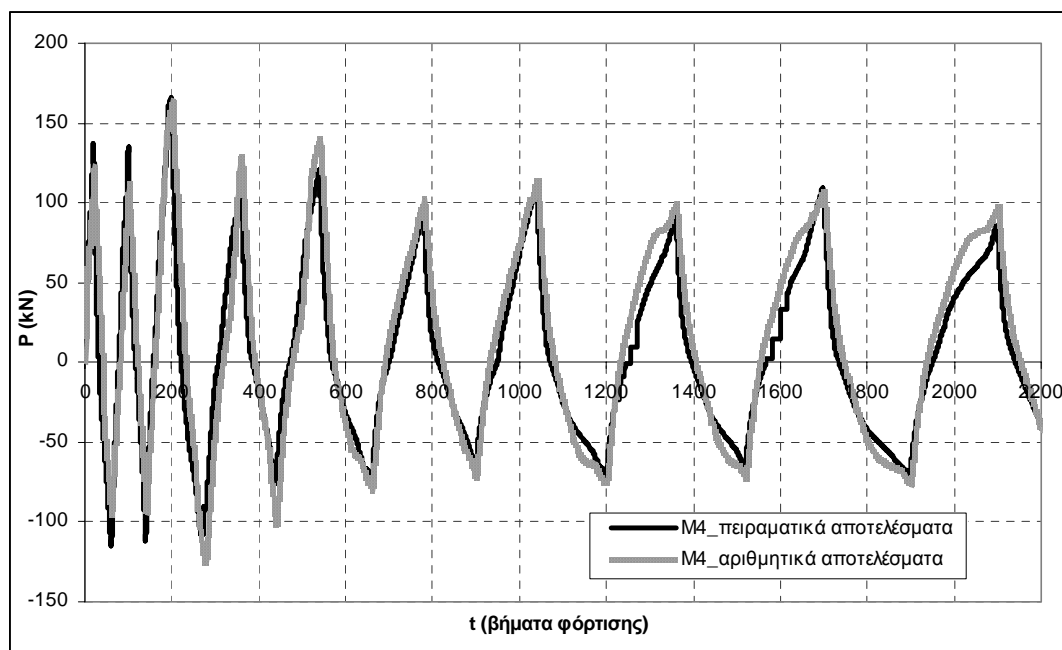
Παρατηρείται ότι γενικά οι αριθμητικές καμπύλες μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες πειραματικές. Αποκλίσεις μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων παρατηρούνται κυρίως στην περίπτωση της δοκού M3, της οποίας ο μανδύας οπλίζεται με δομικό πλέγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.22. Όπως σημειώνεται πάνω στο σχήμα, κατά τους τελευταίους κύκλους φόρτισης και μόνο για τις θετικές τιμές του φορτίου P , η αριθμητική καμπύλη δεν παρακολουθεί με ακρίβεια τους συγκεκριμένους κλάδους της πειραματικής καμπύλης. Αντίθετα, στην περίπτωση της δοκού M4, υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για όλους τους κύκλους φόρτισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.23.



Σχ. 6.21: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M2, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.



Σχ. 6.22: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M3, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

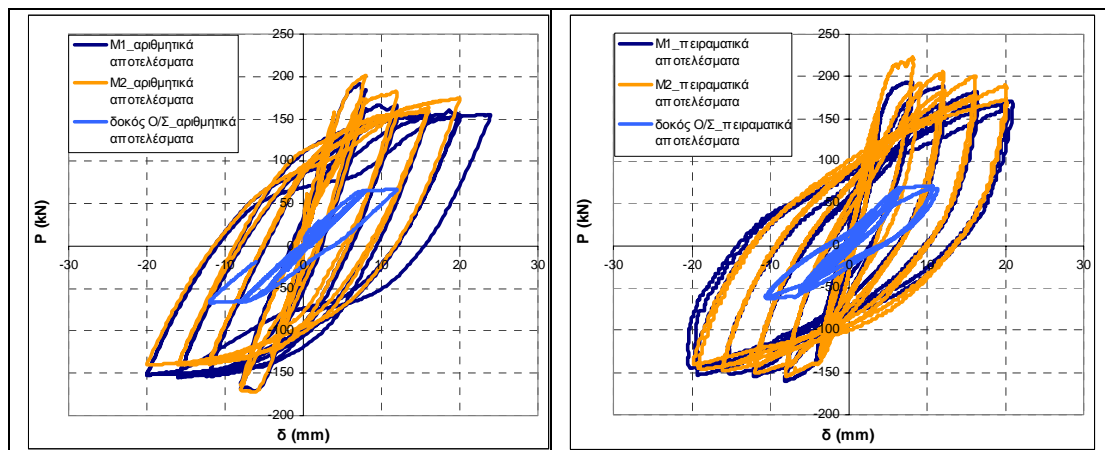


Σχ. 6.23: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την ενισχυμένη δοκό M4, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

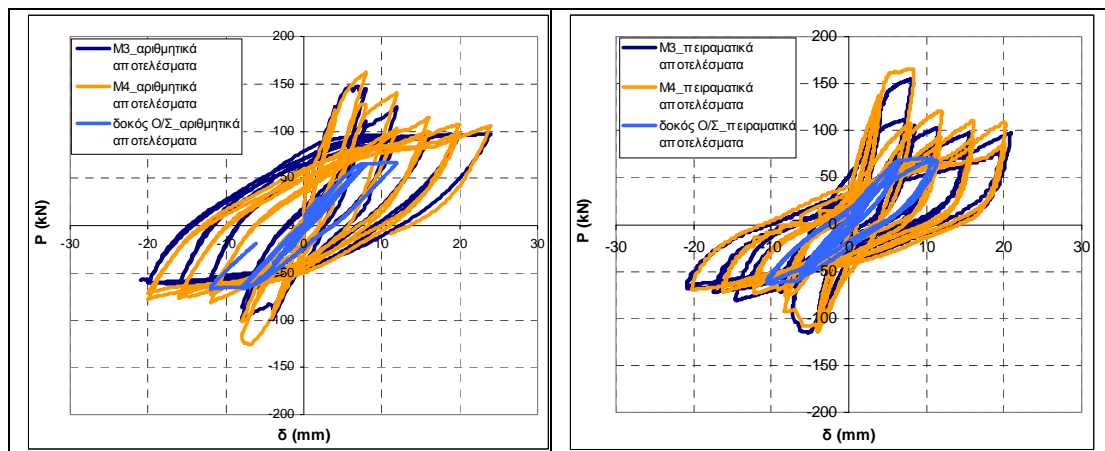
Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, όπως προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση και τις πειραματικές δοκιμές των ενισχυμένων δοκών M1, M2, M3 και M4. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη συμβατική δοκό Ο/Σ, που μελετήθηκε στην Παράγραφο 5.5, η οποία αποτελεί ουσιαστικά τον πυρήνα των ενισχυμένων δοκών M1 και M3 που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο. Πρέπει να τονιστεί ότι δεν έχει μελετηθεί δοκός Ο/Σ χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, όμοια δηλαδή με εκείνες που ενισχύονται με τους μανδύες M2 και M4 και επομένως, στα συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν τα αντίστοιχα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκού Ο/Σ με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό (Σχήμα 6.2). Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψαν αποτελέσματα και για τιμές της μετατόπισης μεγαλύτερες των 30 mm. Τα αριθμητικά προσομοιώματα όμως, δεν ήταν δυνατό να παρακολουθήσουν τις πειραματικές καμπύλες $P-\delta$ για μετατοπίσεις μεγαλύτερες των περίπου 20 mm, λόγω των σημαντικών βλαβών που εμφανίζονται και έχουν ως αποτέλεσμα αριθμητικές αστάθειες που οδηγούν στον τερματισμό της εφαρμοζόμενης επαναληπτικής διαδικασίας Newton-Raphson. Επομένως, πρέπει να τονιστεί ότι οι πειραματικές καμπύλες $P-\delta$ που χρησιμοποιούνται στην ενότητα αυτή για τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, είναι στην πραγματικότητα μέρος μόνο των ολοκληρωμένων διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης του κάθε πειράματος.

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζονται οι αριθμητικές και πειραματικές καμπύλες $P-\delta$ των ενισχυμένων δοκών M1 και M2. Παρατηρείται όμοια υστερητική συμπεριφορά και για τις δύο ενισχυμένες δοκούς, τόσο στα αριθμητικά, όσο και στα πειραματικά αποτελέσματα.

Επίσης, είναι εμφανές ότι η μέγιστη φέρουσα ικανότητα των ενισχυμένων δοκών είναι περίπου τριπλάσια από αυτή της συμβατικής δοκού Ο/Σ, ενώ δεν επηρεάζεται η αύξηση αυτή της φέρουσας ικανότητας από την απουσία εγκάρσιου οπλισμού στη δοκό του πυρήνα (δοκός Μ2). Σε όμοια συμπεράσματα οδηγεί η σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών $P-\delta$ των ενισχυμένων δοκών Μ3 και Μ4, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.25. Η φέρουσα ικανότητα των δοκών που ενισχύονται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, που οπλίζεται με δομικό πλέγμα, είναι περίπου διπλάσια από τη φέρουσα ικανότητα της δοκού του πυρήνα. Επίσης, φαίνεται ότι η απουσία εγκάρσιου οπλισμού στον πυρήνα της ενισχυμένης δοκού Μ2, δεν έχει ιδιαίτερο αντίκτυπο στην υστερητική συμπεριφορά της (Σχήμα 6.24). Όμως, στην περίπτωση της ενισχυμένης δοκού Μ4 (Σχήμα 6.25), φαίνεται ότι η έλλειψη συνδετήρων στη δοκό του πυρήνα, σε συνδυασμό με την περιορισμένη διατμητική συνεισφορά του δομικού πλέγματος του μανδύα, οδηγεί στην εμφάνιση εντονότερης στένωσης στους βρόχους τόσο των πειραματικών, όσο και των αριθμητικών καμπυλών.

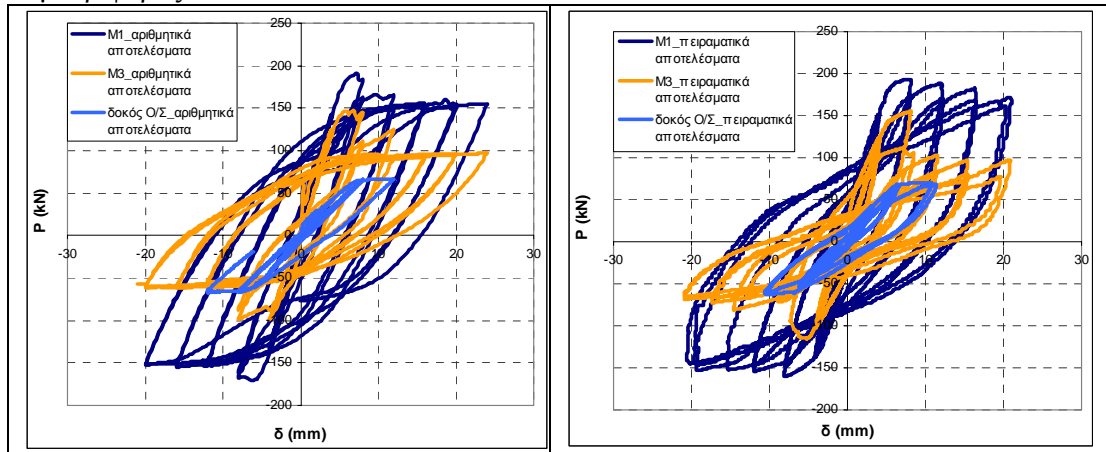


Σχ. 6.24: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών για τις ενισχυμένες δοκούς Μ1 και Μ2 και τη συμβατική δοκό Ο/Σ, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

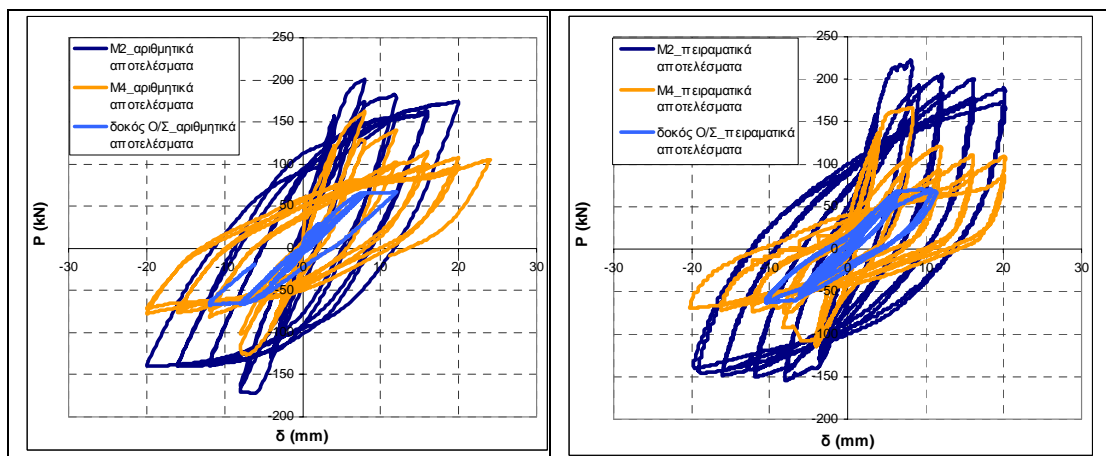


Σχ. 6.25: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών για τις ενισχυμένες δοκούς Μ3 και Μ4 και τη συμβατική δοκό Ο/Σ, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Στο Σχήμα 6.26 συγκρίνονται οι αριθμητικές και πειραματικές καμπύλες $P-\delta$ των ενισχυμένων δοκών M1 και M3, ενώ τα αποτελέσματα για τις ενισχυμένες δοκούς M2 και M4 συγκρίνονται στο Σχήμα 6.27. Παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις ότι μετά από τους αρχικούς κύκλους φόρτισης, η φέρουσα ικανότητα των ενισχυμένων δοκών μειώνεται. Για τις δοκούς που ενισχύονται με μανδύα οπλισμένο με δομικό πλέγμα (M3 και M4), η μείωση της φέρουσας ικανότητας είναι σημαντικότερη και επέρχεται νωρίτερα σε σχέση με τις ενισχυμένες δοκούς των οποίων ο μανδύας οπλίζεται με διαμήκεις ράβδους και συνδετήρες (M1 και M2). Από τη σύγκριση είναι επίσης φανερή η καλύτερη συμπεριφορά που επιδεικνύουν οι δοκοί που ενισχύονται με μανδύα οπλισμένο με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, σε σχέση με τη συμπεριφορά των δοκών που ενισχύονται με μανδύα οπλισμένο με δομικό πλέγμα. Οι υστερητικοί βρόχοι που προκύπτουν για τις ενισχυμένες δοκούς M1 και M2, τόσο από την ανάλυση των αριθμητικών προσομοιωμάτων, όσο και από τις πειραματικές δοκιμές, είναι πολύ πιο πλούσιοι και σταθεροί από τους υστερητικούς βρόχους των ενισχυμένων δοκών M3 και M4, ενδεικτικό της μεγαλύτερης ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και της γενικότερης βελτιωμένης συμπεριφοράς.



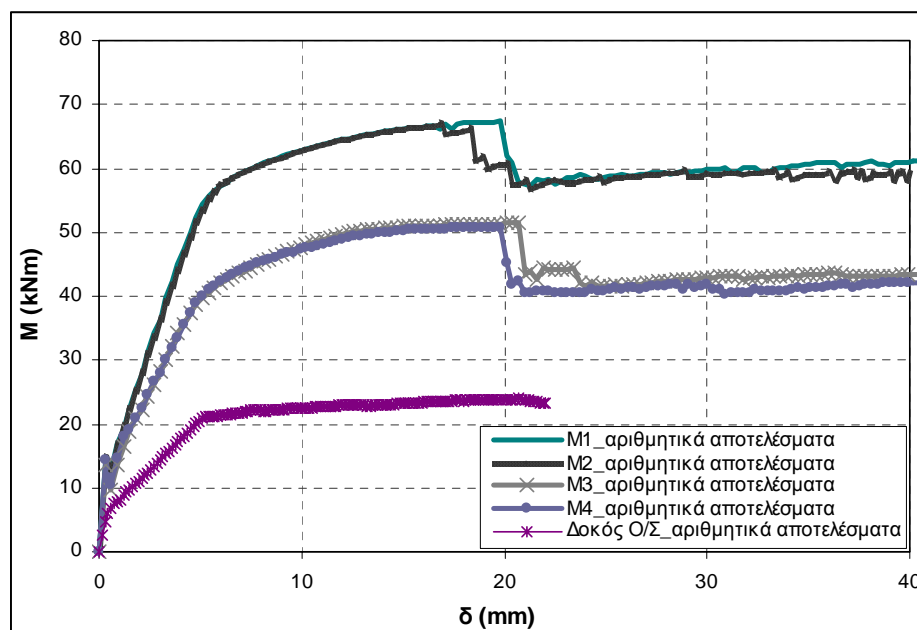
Σχ. 6.26: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών για τις ενισχυμένες δοκούς M1 και M3 και τη συμβατική δοκό Ο/Σ, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.



Σχ. 6.27: Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών για τις ενισχυμένες δοκούς M2 και M4 και τη συμβατική δοκό Ο/Σ, υπό στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη τεσσάρων σημείων.

6.7 Σύνοψη των αποτελεσμάτων

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των τεσσάρων τύπων ενισχυμένων δοκών που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο υπό στατική μονοτονική φόρτιση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.28 σε όρους ροπής κάμψης και επιβαλλόμενης μετατόπισης, μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη της συμβατικής δοκού Ο/Σ.



Σχ. 6.28: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις ενισχυμένες δοκούς M1, M2, M3 και M4 και τη δοκό Ο/Σ, υπό στατική μονοτονική φόρτιση.

Από τη σύγκριση των αριθμητικών καμπυλών προκύπτει ότι η ενίσχυση της συμβατικής δοκού Ο/Σ με τους υπό μελέτη μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται σημαντική ικανότητα παραμόρφωσης του μέλους. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τις πειραματικές δοκιμές στατικής μονοτονικής κάμψης τεσσάρων σημείων, το βέλος κάμψης των ενισχυμένων δοκών ξεπέρασε την τιμή των 60 mm. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, τα αντίστοιχα αριθμητικά προσομοιώματα δε μπορούσαν να παρακολουθήσουν τα πειραματικά αποτελέσματα σε τόσο μεγάλες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης, λόγω των σημαντικών βλαβών της τσιμεντοειδούς μήτρας.

Σχετικά με την αύξηση της αντοχής της ενισχυμένης δοκού, παρατηρείται ότι αυτή είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την αντοχή της αρχικής συμβατικής δοκού Ο/Σ που ενισχύεται. Επίσης, παρατηρείται ότι οι δοκοί που ενισχύονται με μανδύα οπλισμένο με δομικό πλέγμα T131 (M3 και M4) εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με τις δοκούς που ενισχύονται με μανδύα οπλισμένο με διαμήκειες ράβδους Ø10 (M1 και M2). Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων για τη στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη των ενισχυμένων δοκών (Σχήματα 6.26 και 6.27). Βέβαια, τόσο τα αριθμητικά όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα

επιβεβαιώνουν ότι σημαντική αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας μιας δοκού Ο/Σ μπορεί να επιτευχθεί και με την εφαρμογή μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, οπλισμένων με δομικό πλέγμα. Τέλος, συμπεραίνεται ότι η απουσία εγκάρσιου οπλισμού στον πυρήνα των ενισχυμένων δοκών M2 και M4 δεν επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος στην περίπτωση της στατικής μονοτονικής φόρτισης. Στην περίπτωση όμως της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης φάνηκε ότι η απουσία εγκάρσιου οπλισμού στη δοκό του πυρήνα σε συνδυασμό με την περιορισμένη διατμητική συνεισφορά του δομικού πλέγματος, οδηγεί σε ανεπιθύμητη υστερητική συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού M4 (Σχήμα 6.25), που αναδεικνύεται μέσω της σημαντικής στένωσης των υστερητικών βρόχων που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή. Αντίθετα, στην περίπτωση της ενισχυμένης δοκού M2 (Σχήμα 6.24), η ύπαρξη των σχετικά πυκνών συνδετήρων του μανδύα συμβάλλει στην εμφάνιση πλούσιων υστερητικών βρόχων, παρά την απουσία εγκάρσιου οπλισμού στη δοκό του πυρήνα.

Επισημαίνεται ότι οι εικόνες των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης και θραύσης της τσιμεντοειδούς μήτρας που προκύπτουν από τα αριθμητικά προσομοιώματα των ενισχυμένων δοκών βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με τις εικόνες αστοχίας των πειραματικών δοκιμίων. Επομένως, τα αριθμητικά προσομοιώματα που περιγράφονται στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφουν ικανοποιητικά τη συνολική συμπεριφορά των δοκών που ενισχύονται με μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, σε στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη κάμψη.

7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθεται παράδειγμα εφαρμογής της ενίσχυσης έναντι σεισμού μελών μιας υπάρχουσας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος, με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, με τη χρήση κοινού προγράμματος στατικής ανάλυσης. Η διαδικασία αποτίμησης της συμπεριφοράς τόσο της υπάρχουσας, όσο και της ενισχυμένης κατασκευής βασίζεται στη μέθοδο της μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης (pushover), την οποία πολλά συνήθη προγράμματα ανάλυσης κατασκευών έχουν τη δυνατότητα να εκτελέσουν. Τα προγράμματα αυτά όμως, έχουν και κάποιους περιορισμούς, με αποτέλεσμα η χρήση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος να γεννά κάποια ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σωστά η συνεισφορά των ινών, καθώς επίσης και το φαινόμενο της απώλειας της αντοχής του ενισχυμένου μέλους λόγω της απώλειας της συνεισφοράς των ινών.

Επομένως, δίνεται αρχικά ιδιαίτερη σημασία στην ορθή προσομοίωση του σύνθετου υλικού. Στη συνέχεια, παρατίθεται το παράδειγμα εφαρμογής της ενίσχυσης με μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, των μελών ενός υπάρχοντος κτιρίου Ο/Σ και εφαρμόζονται κάποιες πρακτικές λύσεις για το πρόβλημα του συνυπολογισμού της συνεισφοράς των ινών αλλά και της απώλειας της συνεισφοράς τους λόγω της σταδιακής εξόλκευσης από τη μήτρα.

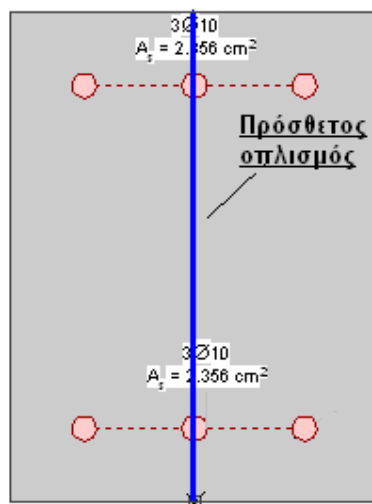
7.2 Προσομοίωση διατομής δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και δοκών ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Αντικείμενο της παρούσας παραγράφου αποτελεί η προσομοίωση διατομών μελών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και μελών Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Στόχος είναι η ορθή προσομοίωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού και τη δυνατότητα εφαρμογής του σε κοινά προγράμματα στατικής ανάλυσης κατασκευών. Η ανάλυση των προαναφερθεισών διατομών πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος ανάλυσης διατομών FAGUS-5 της εταιρείας CUBUS και της εφαρμογής Section Designer του προγράμματος SAP2000-Advanced 14.2.3 της εταιρείας Computers & Structures, Inc. Τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αριθμητικών προσομοιωμάτων που παρατίθενται στα Κεφάλαια 5 και 6. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας της τεχνικής προσομοίωσης των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Σημειώνεται ότι για όλες τις αναλύσεις διατομών που ακολουθούν υιοθετείται η αρχή της επιπεδότητας των διατομών (παραδοχή Bernoulli). Σύμφωνα με αυτή, για γραμμικά μέλη υπό καμπτικές παραμορφώσεις, θεωρείται ότι επίπεδες διατομές που είναι κάθετες στον άξονα του μέλους παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα του μέλους μετά την παραμόρφωση.

7.2.1 Προσομοίωση διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό

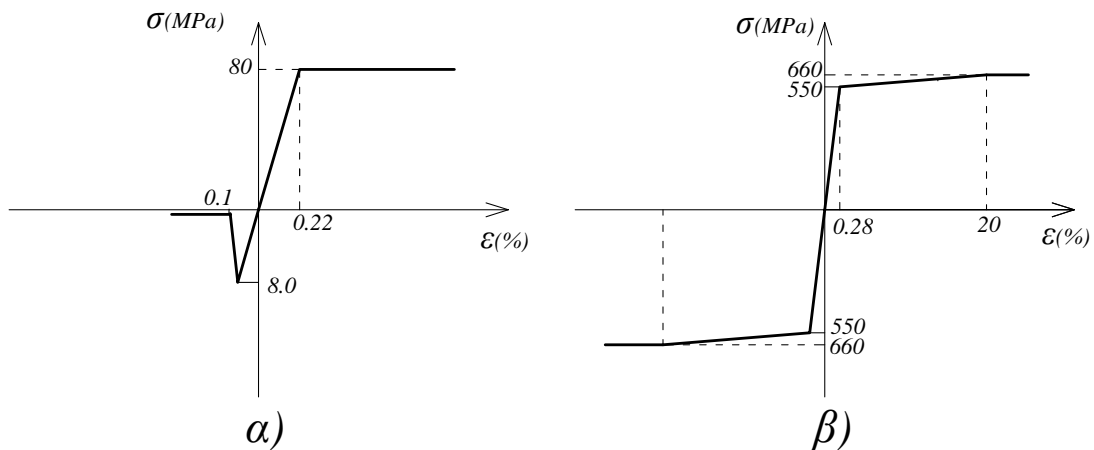
Αρχικά, προσομοιώνεται η διατομή δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό. Πρόκειται για τη δοκό Τύπου Γ της Παραγράφου 5.7. Η πρώτη μέθοδος προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος της διατομής βασίζεται στη λογική της προσομοίωσης που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 5. Προσομοιώνονται δηλαδή ξεχωριστά η συνεισφορά της τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής και η συνεισφορά των χαλύβδινων ινών. Μάλιστα, η συνεισφορά των ινών και εδώ λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός ομογενούς φύλλου χάλυβα με πάχος t_f , που υπολογίζεται βάσει του ογκομετρικού ποσοστού των ινών στο μίγμα, από τη Σχέση (5.5) του Κεφαλαίου 5 και με την ίδια ακριβώς λογική. Αφού εισαχθούν στο πρόγραμμα ανάλυσης διατομών οι ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού και της τσιμεντοειδούς μήτρας, εισάγεται ένας πρόσθετος οπλισμός καθ' ύψος της διατομής, στον οποίο αποδίδονται οι ιδιότητες των χαλύβδινων ινών, με πάχος $t_f = 0.6 \text{ mm}$ (Σχέση (5.5)), όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Η ανάλυση της διατομής πραγματοποιείται με τη βοήθεια των προγραμμάτων ανάλυσης διατομών FAGUS-5 (FAGUS-5 Help 2007) και SAP2000-Section Designer (SAP2000 Manual 2008).



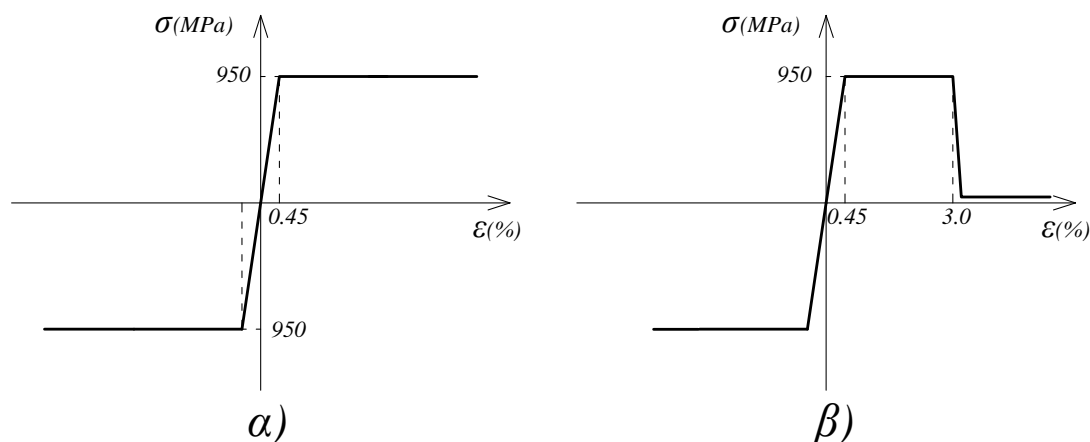
Σχ. 7.1: Προσομοίωση της διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.

Στα Σχήματα 7.2α και β παρουσιάζονται οι νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής και του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού,

αντίστοιχα, όπως εισάγονται και στα δύο προγράμματα ανάλυσης διατομών. Το μέτρο ελαστικότητας της τσιμεντοειδούς μήτρας λαμβάνεται ίσο με 35.5 GPa, ενώ η κλίση του φθίνοντος κλάδου που αντιπροσωπεύει την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας είναι ίση με 10 GPa. Αντίστοιχα, για το χάλυβα του διαμήκους οπλισμού το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 210 GPa. Αν και εισάγεται η ίδια ακριβώς διατομή και στα δύο προγράμματα ανάλυσης διατομών, ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που υιοθετείται για τον πρόσθετο οπλισμό προσομοίωσης της συνεισφοράς των χαλύβδινων ινών, διαφοροποιείται ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε λογισμικού. Για να προσομοιωθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, πρέπει στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του ομογενούς φύλλου χάλυβα να εισαχθεί ένας φθίνων κλάδος που θα αντιπροσωπεύει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών, κατ' αντιστοιχία με το νόμο που θεωρήθηκε και στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων (Κεφάλαιο 5). Όμως, ενώ στο πρόγραμμα SAP2000 υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής από το χρήστη τέτοιων ειδικών νόμων υλικού με φθίνοντες κλάδους, στο πρόγραμμα FAGUS-5 δεν δίνεται αντίστοιχα η ίδια δυνατότητα, καθώς χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι κλασικού τύπου νόμοι υλικού για το χάλυβα και το σκυρόδεμα. Επομένως, για το ομογενές φύλλο χάλυβα των ινών εισάγεται στο FAGUS-5 ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ του Σχήματος 7.3α και στο SAP2000 ο νόμος του Σχήματος 7.3β. Σημειώνεται ότι η διαφοροποίηση της τιμής του ε_1 στο νόμο του Σχήματος 7.3β, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που υιοθετείται για την αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης των δοκών στο Κεφάλαιο 5, επεξηγείται στο Παράρτημα Γ. Το μέτρο ελαστικότητας για το χάλυβα των ινών είναι ίσο με 210 GPa.



Σχ. 7.2: Νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων που θεωρούνται για α) την τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής και β) το χάλυβα του διαμήκους οπλισμού.

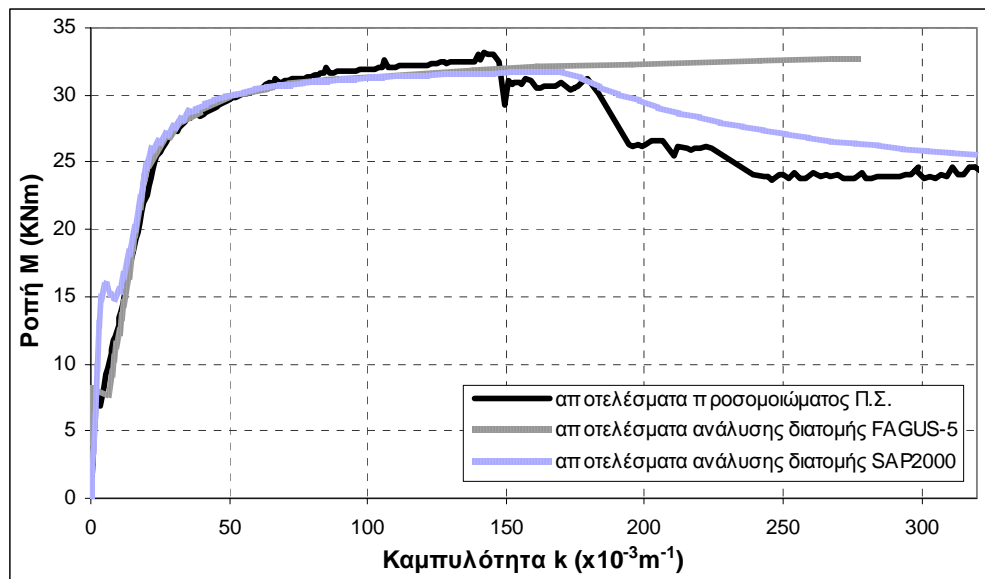


Σχ. 7.3: Νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που θεωρείται για το χάλυβα των ινών και εισάγεται στο πρόγραμμα α) FAGUS-5 και β) SAP2000.

Στο Σχήμα 7.4 συγκρίνονται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της διατομής στα προγράμματα FAGUS-5 και SAP2000 και από την αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής κάμψης της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τριών καμπυλών σε σχέση με την αρχική δυσκαμψία, την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας (που αντικατοπτρίζεται στο «άλμα» που εμφανίζουν στο ίδιο σημείο και οι τρεις καμπύλες), τη δυσκαμψία μετά τη ρηγμάτωση, το σημείο της διαρροής του οπλισμού, αλλά και τις προκύπτουσες τιμές της ροπής. Βέβαια, ο φθίνων κλάδος της καμπύλης που προκύπτει από την ανάλυση του προσομοιώματος Π.Σ. και την ανάλυση της διατομής στο SAP2000 και αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των χαλύβδινων ινών, δεν εμφανίζεται αντίστοιχα στην καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση της διατομής μέσω FAGUS-5. Η βασική αυτή διαφορά μεταξύ της καμπύλης που προκύπτει από την ανάλυση του FAGUS-5 και των δύο άλλων καμπυλών οφείλεται στην αδυναμία εισαγωγής στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, νόμου υλικού με φθίνοντα κλάδο για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ινών. Συγκρίνοντας, στη συνέχεια, τις δύο καμπύλες που περιγράφουν την απώλεια της συνεισφοράς των ινών (προσομοίωμα Π.Σ. και ανάλυση διατομής SAP2000), παρατηρείται κάποια απόκλιση στους κλάδους των καμπυλών που αντιπροσωπεύουν το φαινόμενο αυτό. Πιο συγκεκριμένα, η απώλεια της συνεισφοράς των ινών αντιπροσωπεύεται από σχεδόν κατακόρυφα «άλματα» στο διάγραμμα που προκύπτει από την ανάλυση του προσομοιώματος Π.Σ. Αντίθετα, στην καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση διατομής του SAP2000, η απώλεια της συνεισφοράς των ινών περιγράφεται από έναν πολύ πιο ήπιο φθίνοντα κλάδο, παρόλο που στον αντίστοιχο νόμο $\sigma - \epsilon$ (Σχήμα 7.3β) που εισάγεται στο πρόγραμμα, ο κλάδος που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών είναι σχεδόν κατακόρυφος. Η διαφοροποίηση αυτή στη συμπεριφορά πιθανώς οφείλεται στην παραδοχή της επιπεδότητας των διατομών που γίνεται κατά την ανάλυση διατομών, η οποία όμως δεν ισχύει στην πραγματικότητα για σημαντικά ρηγματωμένα μέλη. Παρά τη διαφοροποίηση αυτή, στη συνέχεια παρατηρείται ότι η καμπύλη που προκύπτει από το SAP2000, σταδιακά συγκλίνει στην καμπύλη του αριθμητικού προσομοιώματος, καταλήγοντας

τελικά στην ίδια τιμή της ροπής ($M = 25 \text{ kNm}$) μετά την απώλεια της συνεισφοράς των ινών.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος είναι κατάλληλη για μέλη με ή χωρίς αξονική δύναμη, σε μονοαξονική κάμψη, λόγω της τοποθέτησης του οπλισμού που αντιστοιχεί στη συνεισφορά των ινών, σε συγκεκριμένη διεύθυνση. Για να ξεπεραστεί ο περιορισμός αυτός διερευνήθηκε μια ακόμη διαφορετική προσέγγιση της προσομοίωσης του σύνθετου υλικού.



Σχ. 7.4: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.

Η δεύτερη μέθοδος προσομοίωσης της διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος βασίζεται στο συνυπολογισμό της συνεισφοράς των ινών μέσω της τροποποίησης των ιδιοτήτων του τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής. Επομένως, θεωρείται ότι η δοκός αποτελείται αποκλειστικά από ένα ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα και τις ράβδους οπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Για το χάλυβα του διαμήκους οπλισμού υιοθετείται και πάλι ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 7.2β και οι ιδιότητες υλικού παραμένουν ίδιες.

Σχετικά με τις ιδιότητες του νέου ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος, υπολογίζεται το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας που ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του αρχικού τσιμεντοκονιάματος και το μέτρο ελαστικότητας των ινών, ανηγμένο σε όλη τη διατομή. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{ισοδ} = E_C \left(\frac{A_C}{A_{ισοδ}} \right) + E_F \left(\frac{A_F}{A_{ισοδ}} \right) \quad (7.1)$$

όπου $E_{ισοδ}$ και $A_{ισοδ}$ το μέτρο ελαστικότητας και το εμβαδό διατομής του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος αντίστοιχα, E_C και A_C το μέτρο ελαστικότητας και το εμβαδό διατομής του αρχικού τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής αντίστοιχα και E_F και A_F το μέτρο ελαστικότητας και το ισοδύναμο εμβαδό των ινών αντίστοιχα. Επίσης, ισχύει:

$$A_C = A_{ισοδ} - A_F \quad (7.2)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές στις Σχέσεις (7.1) και (7.2) προκύπτει:

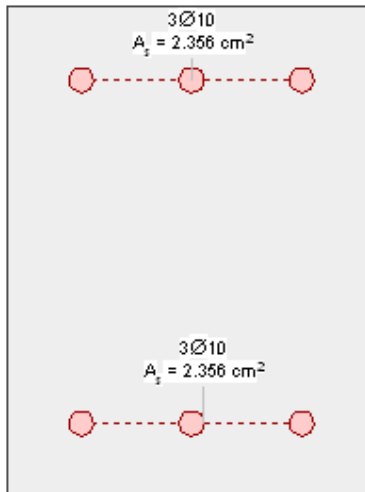
$$E_{ισοδ} = 35.50 \times 0.996 + 210 \times 0.004 \Rightarrow E_{ισοδ} = 36.20 \text{ GPa.}$$

Επίσης, θεωρείται ότι το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα διαθέτει εφελκυστική αντοχή ανάλογη της εφελκυστικής αντοχής του ομογενούς φύλλου χάλυβα της πρώτης μεθόδου προσομοίωσης. Η εφελκυστική αντοχή του αρχικού τσιμεντοκονιάματος δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς εξαντλείται πολύ νωρίς, όπως φαίνεται και από τις καμπύλες του Σχήματος 7.4. Η εφελκυστική αντοχή του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος $f_{ct,ισοδ}$ υπολογίζεται μέσω της αναγωγής της εφελκυστικής αντοχής του ομογενούς φύλλου χάλυβα f_y^F σε όλη τη διατομή του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος μέσω της σχέσης:

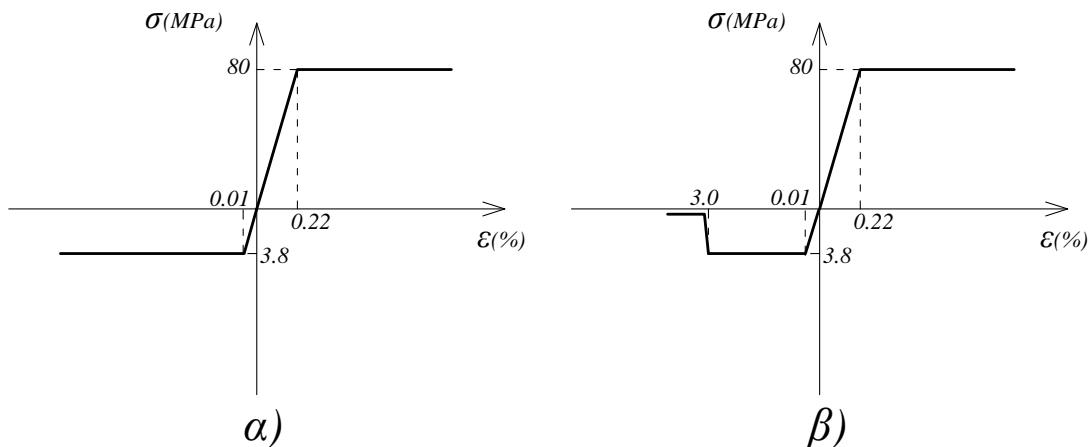
$$f_{ct,ισοδ} = f_y^F v_f a_f \Rightarrow f_{ct,ισοδ} = 950 \times 0.008 \times 0.5 \Rightarrow f_{ct,ισοδ} = 3.8 \text{ MPa} \quad (7.3)$$

όπου $v_f = 0.8\%$ το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και $a_f = 0.5$ ο μειωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ινών στο μίγμα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά τη δεύτερη αυτή προσέγγιση, για το θεωρούμενο ομογενές υλικό υιοθετείται νόμος τάσεων-παραμορφώσεων, με βάση τον οποίο δεν εξαντλείται η εφελκυστική αντοχή, αλλά παραμένει σταθερή αφού φτάσει τη μέγιστη τιμή της, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εφελκυστική αντοχή των ινών κατά την ανάλυση. Βέβαια, στη συνέχεια, θα πρέπει να εισαχθεί στο νόμο $\sigma - \varepsilon$, φθίνων κλάδος που θα προσομοιώνει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 δεν δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής τέτοιων ειδικών νόμων υλικού, σε αντίθεση με το πρόγραμμα SAP2000, θα υπάρχει διαφοροποίηση στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος που εισάγεται στα δύο προγράμματα. Επομένως, για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα εισάγεται στο FAGUS-5 ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ του Σχήματος 7.6α σύμφωνα με τον οποίο η εφελκυστική του αντοχή παραμένει σταθερή, ενώ στο SAP2000 εισάγεται ο νόμος του Σχήματος 7.6β, στον οποίο παρατηρείται ότι ο φθίνων κλάδος που προσομοιώνει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών εισάγεται όπως και στο νόμο του χάλυβα των ινών του Σχήματος 7.3β, αλλά αυτή τη φορά ως απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.



Σχ. 7.5: Προσομοίωση της διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.



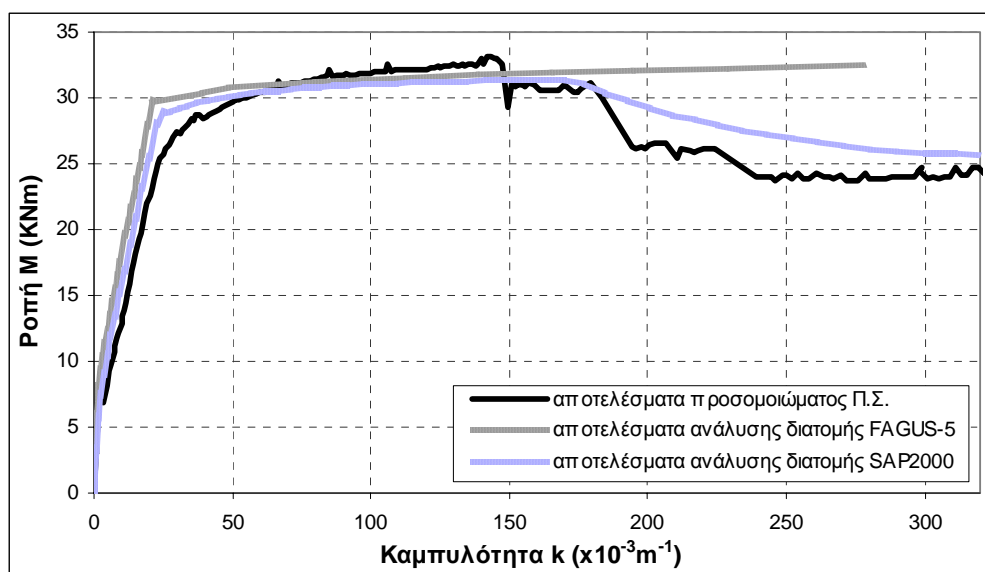
Σχ. 7.6: Νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που θεωρείται για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα και εισάγεται στο πρόγραμμα α) FAGUS-5 και β) SAP2000.

Στο Σχήμα 7.7 συγκρίνονται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη νέα ανάλυση της διατομής μέσω των προγραμμάτων FAGUS-5 και SAP2000 και την αριθμητική προσομοίωση μέσω Π.Σ. της δοκιμής κάμψης της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι οι καμπύλες που προκύπτουν από την ανάλυση της διατομής μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση του αριθμητικού προσομοιώματος με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η αρχική δυσκαμψία του συστήματος προκύπτει ίδια και για τις τρεις αναλύσεις, ενώ διαφοροποιείται μετά την αρχική ρηγμάτωση, καθώς μέσω της νέας τεχνικής προσομοίωσης δε μπορεί να ληφθεί υπόψη η απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του τσιμεντοκονιάματος. Έτσι, ενώ στην καμπύλη του προσομοιώματος Π.Σ. εμφανίζεται ένα κατακόρυφο «άλμα» που αντιστοιχεί στην απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της μήτρας, δεν μπορεί να συμβεί το ίδιο στις δύο καμπύλες που προκύπτουν από την ανάλυση της διατομής. Το γεγονός αυτό αποτελεί

ένα μειονέκτημα της προσέγγισης του σύνθετου υλικού μέσω του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος. Αντίθετα, το σημείο στο οποίο συμβαίνει η διαρροή των οπλισμών, καθώς και η τιμή της μέγιστης ροπής που παραλαμβάνει η διατομή προσεγγίζονται ικανοποιητικά και από τις δύο καμπύλες της ανάλυσης της διατομής.

Όπως και προηγουμένως, λόγω της αδυναμίας εισαγωγής ακριβέστερου νόμου υλικού, η καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση διατομής του FAGUS-5 δεν μπορεί να προσομοιώσει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών, σε αντίθεση με εκείνη που προκύπτει από την ανάλυση της διατομής στο SAP2000. Συγκρίνοντας τις καμπύλες που προκύπτουν από την αριθμητικό προσομοίωμα και την ανάλυση διατομής στο SAP2000, παρατηρείται και πάλι η ίδια απόκλιση στον κλάδο της καμπύλης που περιγράφει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Ενώ στην αριθμητική καμπύλη ο κλάδος αυτός είναι απότομος, ο αντίστοιχος φθίνων κλάδος της καμπύλης του SAP2000 είναι πολύ ομαλός. Παρόλα αυτά, η καμπύλη του SAP2000 σταδιακά συγκλίνει με την αριθμητική καμπύλη, καταλήγοντας στην ίδια τιμή της τελικής ροπής.

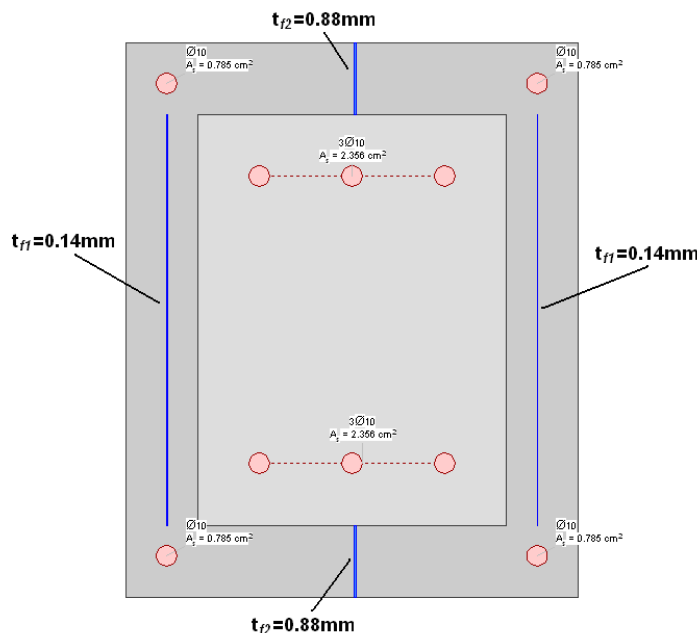
Σημειώνεται ότι η νέα αυτή προσέγγιση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος κατορθώνει να εξάγει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ταυτόχρονα έχει το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί για μέλη σε μονοαξονική και διαξονική κάμψη, με ή χωρίς αξονικό φορτίο.



Σχ. 7.7: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.

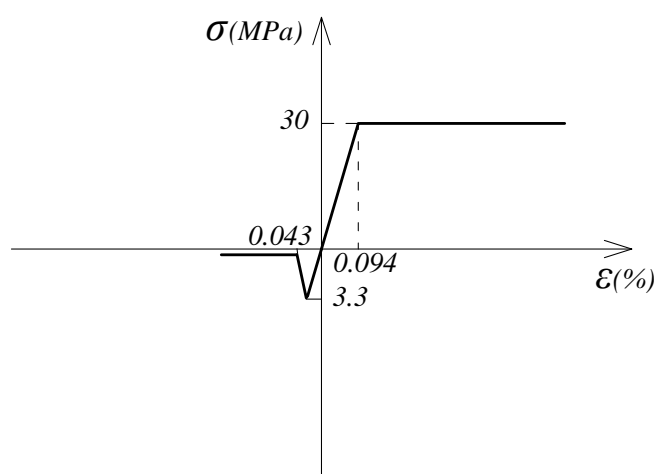
7.2.2 Προσομοίωση διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Αφού αξιολογήθηκε η τεχνική προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που αναπτύχθηκε με σκοπό την εισαγωγή του σύνθετου υλικού σε συνήθη προγράμματα ανάλυσης διατομών και στατικής ανάλυσης κατασκευών, ακολουθεί η προσομοίωση μιας πιο σύνθετης διατομής δοκού Ο/Σ, ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Πρόκειται ουσιαστικά για τη δοκό M1 του Κεφαλαίου 6. Η πρώτη μέθοδος προσομοίωσης του ινοπλισμένου μανδύα της διατομής είναι αντίστοιχη με εκείνη της προηγούμενης υποπαραγράφου. Προσομοιώνονται ξεχωριστά, η συνεισφορά της τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής και η συνεισφορά των χαλύβδινων ινών. Η συνεισφορά των ινών και εδώ λαμβάνεται υπόψη μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα, με πάχος υπολογισμένο βάσει του ογκομετρικού ποσοστού των ινών στο μίγμα, από τη Σχέση (5.5) του Κεφαλαίου 5 και με την ίδια ακριβώς λογική. Αφού εισαχθούν στο πρόγραμμα ανάλυσης διατομών οι ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού, της τσιμεντοειδούς μήτρας του μανδύα και του συμβατικού σκυροδέματος του πυρήνα, εισάγεται πρόσθετος οπλισμός καθ' ύψος της διατομής του μανδύα, στον οποίο αποδίδονται οι ιδιότητες υλικού των χαλύβδινων ινών και πάχος t_f . Το πάχος t_f αυτή τη φορά διαφέρει για τις επιμέρους περιοχές της τσιμεντοειδούς μήτρας του μανδύα στις οποίες ο οπλισμός αυτός αντιστοιχεί, με βάση την ίδια ακριβώς λογική που περιγράφεται στην Παράγραφο 6.4. Στο Σχήμα 7.8 απεικονίζεται η διατομή της δοκού Ο/Σ που ενισχύεται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όπως εισάγεται στα προγράμματα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 και SAP2000. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα διαφορετικά πάχη t_{f1} και t_{f2} των πρόσθετων οπλισμών που προσομοιώνουν τη συνεισφορά των χαλύβδινων ινών.



Σχ. 7.8: Προσομοίωση της διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.

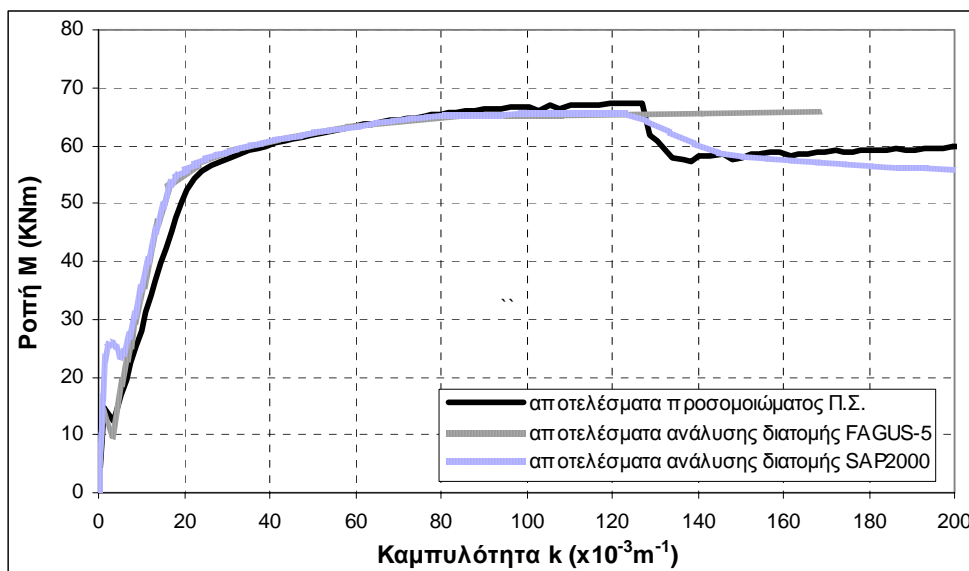
Οι νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων της τσιμεντοειδούς μήτρας υψηλής αντοχής και του χάλυβα του διαμήκου οπλισμού του μανδύα και του πυρήνα, που εισάγονται και στα δύο προγράμματα ανάλυσης διατομών, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.2α και β, αντίστοιχα. Οι ιδιότητες των δύο υλικών παραμένουν οι ίδιες. Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζεται ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ που υιοθετείται για το σκυρόδεμα του πυρήνα. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 32 GPa, ενώ η κλίση του φθίνοντος κλάδου που αντιπροσωπεύει την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι ίση με 10 GPa. Επίσης, στο Σχήμα 7.3α και β παρουσιάζεται ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ για το χάλυβα του ομογενούς φύλλου που προσομοιώνει τη συνεισφορά των ινών, όπως εισάγεται στα προγράμματα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 και SAP2000, αντίστοιχα. Οι ιδιότητες υλικού του χάλυβα των ινών παραμένουν οι ίδιες.



Σχ. 7.9: Νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που θεωρείται για το σκυρόδεμα του πυρήνα της ενισχυμένης δοκού και εισάγεται στα προγράμματα FAGUS-5 και SAP2000.

Στο Σχήμα 7.10 συγκρίνονται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις της διατομής και την αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής κάμψης της ενισχυμένης δοκού. Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τριών καμπυλών σε σχέση με την αρχική δυσκαμψία του συστήματος, την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντοειδούς μήτρας (που αντικατοπτρίζεται στο «άλμα» που εμφανίζουν στο ίδιο σημείο και οι τρεις καμπύλες), το σημείο της διαρροής του οπλισμού, αλλά και τις προκύπτουσες τιμές της ροπής. Και σε αυτή την περίπτωση, ο φθίνων κλάδος της καμπύλης που προκύπτει από την ανάλυση του προσομοιώματος Π.Σ. και αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των χαλύβδινων ινών, δεν εμφανίζεται αντίστοιχα στην καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση της διατομής στο πρόγραμμα FAGUS-5. Αντίθετα, ο φθίνων αυτός κλάδος εμφανίζεται στην καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση διατομής στο SAP2000 λόγω της δυνατότητας ακριβέστερης προσομοίωσης της συμπεριφοράς του υλικού. Βέβαια, όπως και προηγουμένως, η απώλεια της συνεισφοράς των ινών στην καμπύλη του SAP2000 εμφανίζεται με μια πιο ήπια κλίση σε σχέση με τον αντίστοιχο κλάδο της αριθμητικής καμπύλης, ενώ τελικά, οι δύο αυτές καμπύλες συγκλίνουν.

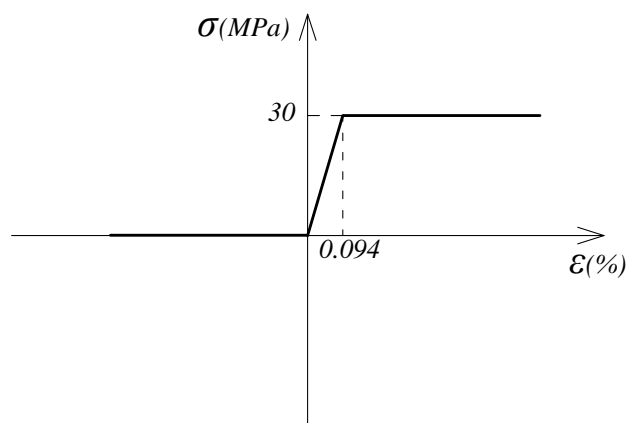
Όπως έχει προαναφερθεί, η τεχνική αυτή της προσομοίωσης του μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος είναι κατάλληλη μόνο για μέλη σε μονοαξονική κάμψη, με ή χωρίς αξονικό φορτίο. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε και σε αυτή την περίπτωση η εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης του σύνθετου υλικού.



Σχ. 7.10: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.

Όπως και προηγουμένως, η δεύτερη μέθοδος προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα βασίζεται στο συνυπολογισμό της συνεισφοράς των χαλύβδινων ινών μέσω της τροποποίησης των ιδιοτήτων υλικού της τσιμεντοειδούς μήτρας. Επομένως, θεωρείται για το μανδύα ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα με νέο ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας και ισοδύναμη εφελκυστική αντοχή, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ινών. Οι τιμές αυτές είναι οι ίδιες με τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη υποπαράγραφο. Οι υπόλοιπες ιδιότητες του τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής, του χάλυβα των οπλισμών και του σκυροδέματος του πυρήνα εισάγονται χωρίς μεταβολές. Σημειώνεται ότι η εφελκυστική αντοχή του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα θεωρείται σταθερή, χωρίς να εξαντλείται αμέσως μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής της, καθώς ουσιαστικά πρόκειται για την εφελκυστική αντοχή των χαλύβδινων ινών. Λόγω της παραπάνω παραδοχής, αγνοείται η εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοκονιάματος, η οποία εξάλλου εξαντλείται πολύ νωρίς, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα του Σχήματος 7.10. Αναφορικά με τους νόμους τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών που εισάγονται στα προγράμματα ανάλυσης διατομών, διαφοροποιούνται και πάλι ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε λογισμικού. Έτσι, για το χάλυβα των ράβδων οπλισμού του μανδύα και του πυρήνα εισάγεται και στα δύο προγράμματα ο νόμος του Σχήματος 7.2β, για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα εισάγεται στο FAGUS-5 ο νόμος του Σχήματος 7.6α και αντίστοιχα στο SAP2000 ο νόμος

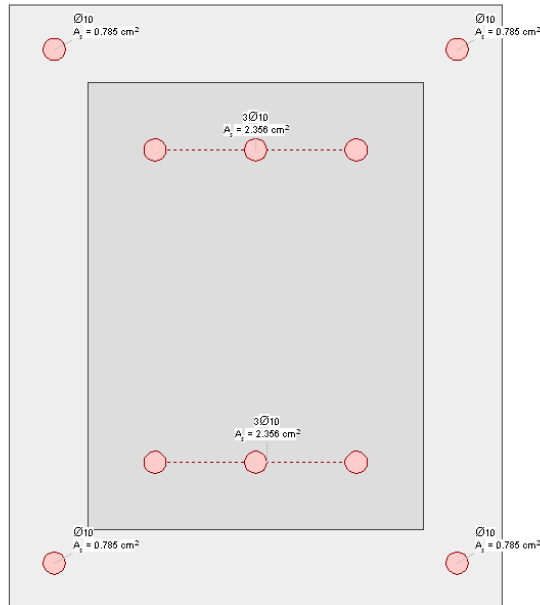
του Σχήματος 7.6β και για το σκυρόδεμα του πυρήνα εισάγεται στο πρόγραμμα SAP2000 ο νόμος του Σχήματος 7.9. Αντίθετα, λόγω περιορισμών του προγράμματος FAGUS-5, θα πρέπει για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα και το σκυρόδεμα του πυρήνα να θεωρηθεί ο ίδιος τύπος νόμου $\sigma - \varepsilon$, με διαφοροποίηση βέβαια στις χαρακτηριστικές τιμές του κάθε υλικού. Στην προκειμένη περίπτωση όμως, και για να ληφθεί υπόψη η εφελκυστική αντοχή των ινών, θεωρείται για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα σταθερή εφελκυστική αντοχή που δεν εξαντλείται. Για το λόγο αυτό θα πρέπει η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα να τεθεί ίση με μηδέν. Πρακτικά, ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ του προγράμματος FAGUS-5 για το σκυρόδεμα του πυρήνα της ενισχυμένης δοκού διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.11. Στο Σχήμα 7.12 απεικονίζεται η διατομή της δοκού Ο/Σ που ενισχύεται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όπως εισάγεται στα προγράμματα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 και SAP2000.



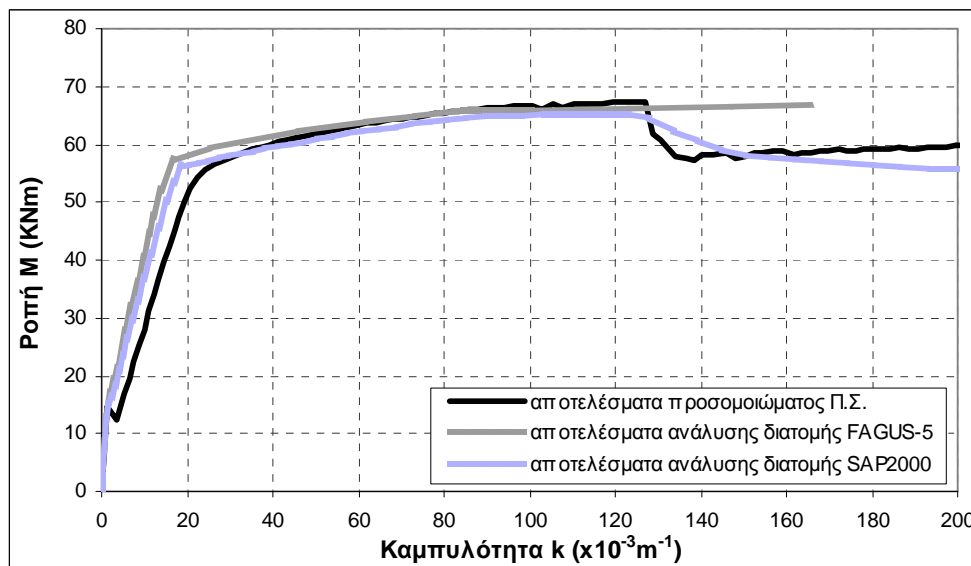
Σχ. 7.11: Ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα του πυρήνα της ενισχυμένης δοκού, όπως διαμορφώνεται στο πρόγραμμα FAGUS-5.

Στο Σχήμα 7.13 συγκρίνονται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις νέες αναλύσεις της διατομής και την αριθμητική προσομοίωση της αντίστοιχης δοκιμής κάμψης της δοκού Ο/Σ που ενισχύεται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τριών καμπυλών σε σχέση με τη γενική συμπεριφορά του συστήματος και πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με την αρχική δυσκαμψία, το σημείο της διαρροής των οπλισμών αλλά και την τιμή της μέγιστης ροπής που παραλαμβάνει η διατομή. Η διαφοροποίηση μεταξύ των διαγραμμάτων έγκειται στο ότι στις καμπύλες που προκύπτουν από τις αναλύσεις της διατομής με ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα στο μανδύα, δεν εμφανίζεται το κατακόρυφο «άλμα», που αντιστοιχεί στην απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του τσιμεντοκονιάματος, καθώς για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα η εφελκυστική αντοχή θεωρείται σταθερή, χωρίς να εξαντλείται αμέσως μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής της. Η απουσία του «άλματος» στο διάγραμμα της ανάλυσης της διατομής έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση των κλάδων των καμπυλών, μεταξύ των σημείων της πρώτης ρηγμάτωσης και της διαρροής των οπλισμών. Σημειώνεται για μία ακόμη φορά, ότι στο πρόγραμμα FAGUS-5 δε λαμβάνεται υπόψη η απώλεια της συνεισφοράς των ινών, λόγω αδυναμίας εισαγωγής κατάλληλου νόμου υλικού, γεγονός που αντικατοπτρίζεται και στα

αποτελέσματα μέσω της απουσίας του αντίστοιχου φθίνοντος κλάδου. Η καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση του SAP2000 κατορθώνει να περιγράψει ικανοποιητικά τη διαδικασία απώλειας της συνεισφοράς των ινών, μέσω όμως ενός πιο ήπιου φθίνοντος κλάδου σε σχέση με τον αντίστοιχο της καμπύλης του αριθμητικού προσομοιώματος.



Σχ. 7.12: Προσομοίωση της διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος στο μανδύα.



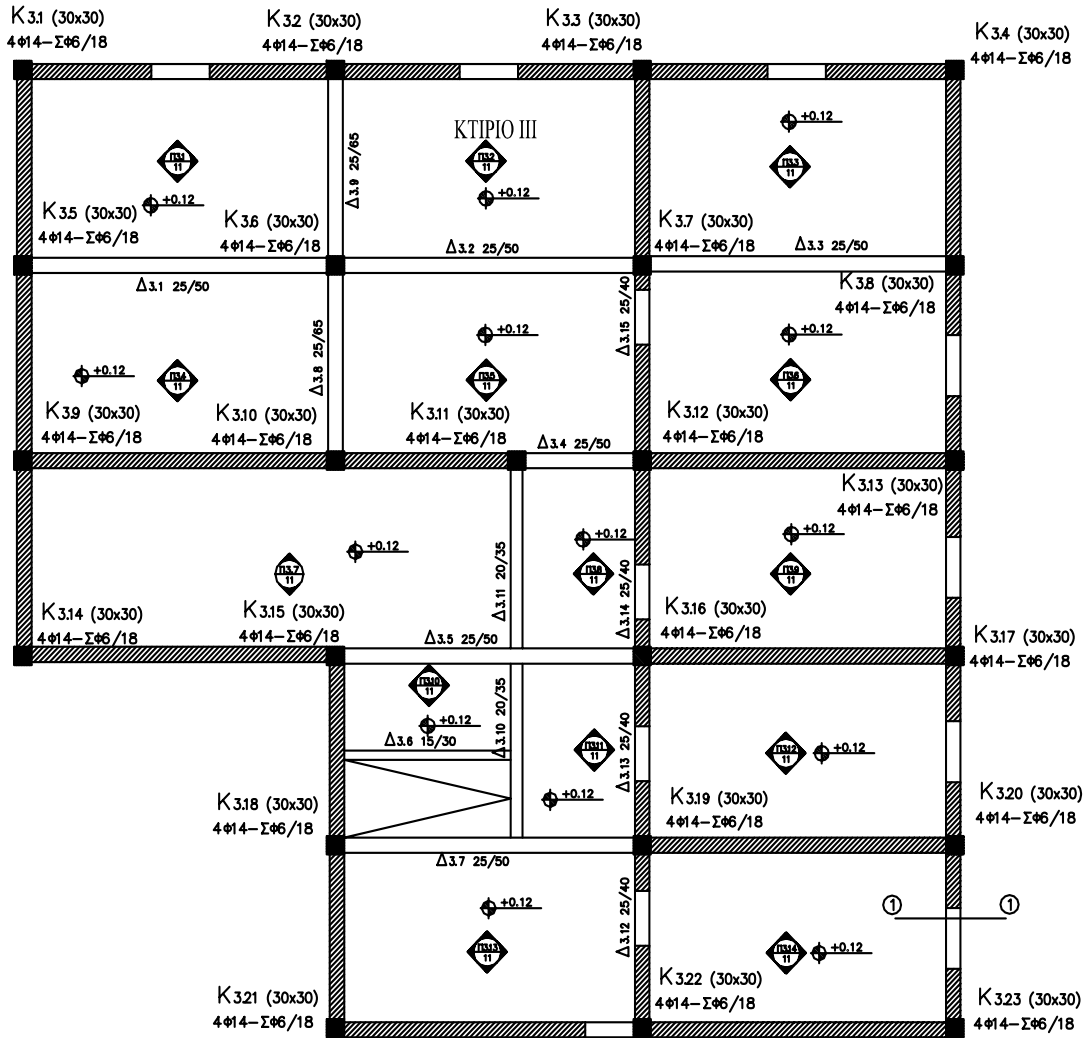
Σχ. 7.13: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμψυλοτήτων της διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος στο μανδύα.

Συμπερασματικά, από τη σύγκριση των τριών καμπυλών του Σχήματος 7.13, προκύπτει ότι η τεχνική της προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα μέσω της τροποποίησης των ιδιοτήτων της τσιμεντοειδούς μήτρας και της εισαγωγής του σύνθετου υλικού ως ένα ομογενές ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα, οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, έχοντας ταυτόχρονα το σημαντικό πλεονέκτημα της καταλληλότητας για μέλη υπό μονοαξονική και διαξονική κάμψη, με ή χωρίς αξονικό φορτίο. Επομένως, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνήθη προγράμματα στατικής ανάλυσης κατασκευών. Βέβαια, όπως αναδείχθηκε και από την παραπάνω μελέτη, θα πρέπει να εισάγονται κάθε φορά οι κατάλληλοι νόμοι υλικού, ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε προγράμματος και να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκτίμηση του σημείου στο οποίο συμβαίνει η απώλεια της συνεισφοράς των ινών.

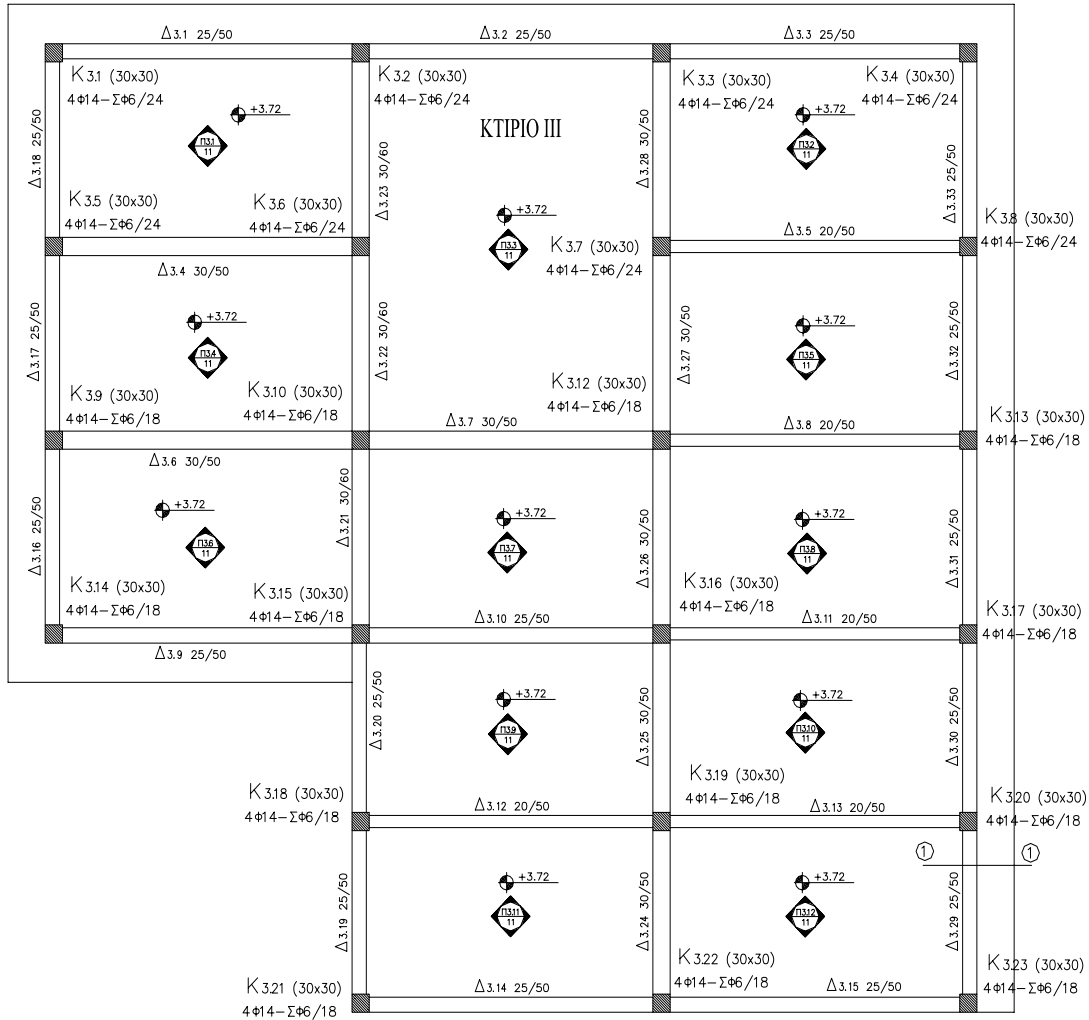
7.3 Πρακτική εφαρμογή αποτίμησης υφιστάμενου κτιρίου Ο/Σ και ενίσχυσης των μελών του με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

7.3.1 Σύντομη περιγραφή του κτιρίου

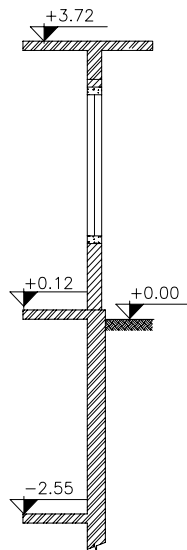
Το κτίριο Ο/Σ που χρησιμοποιείται για την πρακτική εφαρμογή του παρόντος κεφαλαίου βρίσκεται στην πόλη του Βόλου και σχεδιάστηκε μετά τους καταστροφικούς σεισμούς των ετών 1955-1956. Η κατασκευή του φέροντος οργανισμού του κτιρίου ξεκίνησε το 1958 και ολοκληρώθηκε το 1963 με τη σημερινή του μορφή. Πρόκειται για ένα ισόγειο κτίριο Ο/Σ με υπόγειο, το οποίο αποτελείται από πλάκες, δοκούς, τοιχώματα, υποστυλώματα και τοιχοπληρώσεις από συνήθη οπτοπλινθοδομή. Οι ξυλότυποι της πλάκας της οροφής του υπογείου και του ισόγειου παρουσιάζονται ενδεικτικά, στα Σχήματα 7.14 και 7.15, αντίστοιχα, ενώ η Τομή 1-1 που σημειώνεται στα σχέδια των ξυλοτύπων και είναι ενδεικτική των σταθμών του υπό μελέτη κτιρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.16. Τα δομικά μέλη του υπό μελέτη κτιρίου είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα ποιότητας C12/15 και ο χάλυβας του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού των μελών είναι ποιότητας S220.



Σχ. 7.14: Ξυλότυπος πλάκας οροφής υπογείου.



Σχ. 7.15: Ευλότυπος πλάκας οροφής ισογείου.



Σχ. 7.16: Τομή 1-1.

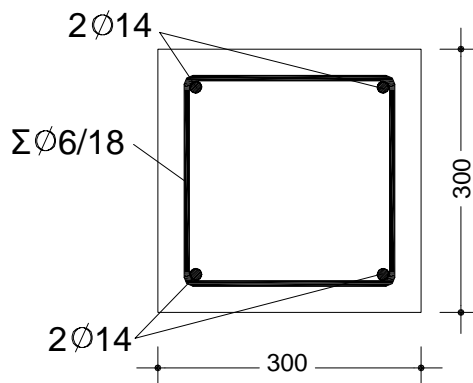
7.3.2 Αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της υφιστάμενης κατασκευής

Η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της υπάρχουσας κατασκευής πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου της μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης (pushover). Για τη μη-γραμμική ανάλυση αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα στατικής και δυναμικής ανάλυσης κατασκευών STATIK-5 της εταιρείας CUBUS, σε συνεργασία με το πρόγραμμα ανάλυσης πλακών CEDRUS-5 και το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 της ίδιας εταιρείας. Υπενθυμίζεται ότι το πρόγραμμα FAGUS-5 παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς σε σχέση με την εισαγωγή νόμων υλικού κατάλληλων για να ληφθεί υπόψη η απώλεια της συνεισφοράς των ινών του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, όπως αναδείχθηκε από τη μελέτη της Παραγράφου 7.2. Παρά το μειονέκτημα αυτό, αποφασίστηκε η χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού έναντι του SAP2000 που δεν έχει τέτοιους περιορισμούς, έτσι ώστε να δοθεί η δυνατότητα πρότασης κάποιων πρακτικών λύσεων στο πρόβλημα του συνυπολογισμού της απώλειας της συνεισφοράς των ινών.

Αρχικά, για την ανάλυση του κτιρίου μορφώνεται το κατάλληλο χωρικό προσομοίωμα. Η διατομή και η διάταξη του οπλισμού των υποστυλωμάτων του κτιρίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.17, όπως προσδιορίστηκαν από τους επί τόπου ελέγχους που διενεργήθηκαν. Το ποσοστό διαμήκους οπλισμού των υποστυλωμάτων ρ_s υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_s = A_s / A_c = 6.8 \% , \quad (7.4)$$

όπου A_s το συνολικό εμβαδό του διαμήκους οπλισμού του υποστυλώματος (4 Φ 14) και A_c το εμβαδό διατομής του σκυροδέματος. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς το ελάχιστο ποσοστό διαμήκους οπλισμού υποστυλώματος $\rho_{s,min}$ είναι ίσο με 10% και επομένως, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού των υφιστάμενων υποστυλωμάτων δεν είναι επαρκές. Σημειώνεται ότι, καθώς οι δοκοί είναι πιο ισχυρές και δεν σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα τους και λόγω της δυσκαμψίας του υπογείου που διαθέτει περιμετρικά τοιχώματα, ουσιαστικά τα δομικά μέλη της κατασκευής που μελετώνται είναι τα υποστυλώματα του ισογείου. Το ύψος των υπό μελέτη υποστυλωμάτων του ισογείου λαμβάνεται ίσο με 3.72 m (Σχήμα 7.16).

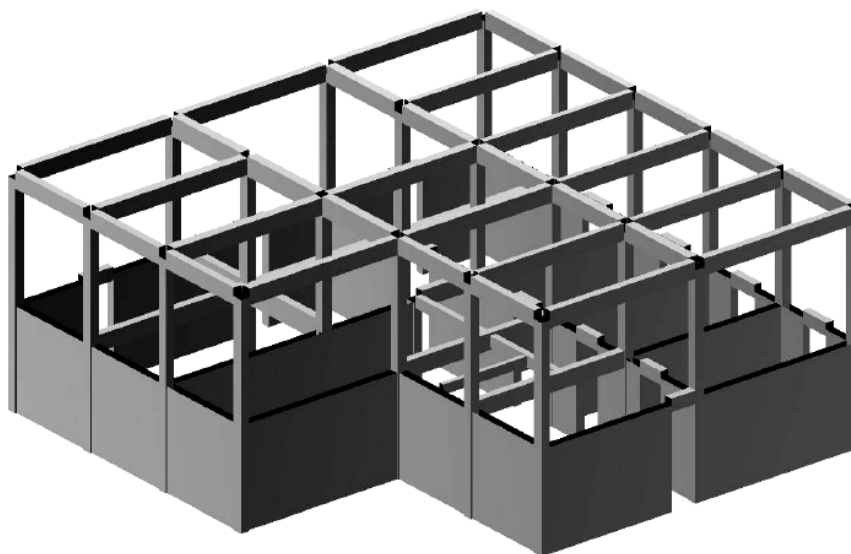


Σχ. 7.17: Σχηματική απεικόνιση της διατομής και της διάταξης των οπλισμών των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής (διαστάσεις σε mm).

Για το σκυρόδεμα κατηγορίας C12/15, το μέτρο ελαστικότητας θεωρείται ίσο με 26 GPa, η θλιπτική αντοχή ίση με 12 MPa και η εφελκυστική αντοχή ίση με 1.6 MPa. Αντίστοιχα, για το χάλυβα των οπλισμών, ποιότητας S220, θεωρείται μέτρο ελαστικότητας ίσο με 210 GPa και τάση διαρροής ίση με 220 MPa.

Αρχικά, υπολογίζονται τα μόνιμα και κινητά φορτία, καθώς και τα φορτία των τοιχοποιιών και στη συνέχεια, επιλύονται οι πλάκες του κτιρίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη βοήθεια του προγράμματος επίλυσης πλακών CEDRUS-5. Οι πλάκες φορτίζονται με τα φορτία που έχουν υπολογιστεί και προκύπτουν αντιδράσεις στις θέσεις των στηρίξεων, με τις οποίες φορτίζεται στη συνέχεια το χωρικό πλαίσιακό προσομοίωμα της κατασκευής. Το χωρικό προσομοίωμα, που δημιουργείται και επιλύεται μέσω του προγράμματος στατικής και δυναμικής ανάλυσης κατασκευών STATIK-5, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.18.

Για την αποτίμηση της αντοχής, χρησιμοποιείται το φάσμα τύπου I του Ευρωκώδικα 8 (EN 1998.01 2004), με ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, συντελεστή επιτάχυνσης $a = 0.24$, κατηγορία σπουδαιότητας Σ1, κατηγορία εδάφους A και συντελεστή εδάφους $S = 1.00$. Τέλος, επιλέγεται επίπεδο επιτελεστικότητας «προστασία ζωής».



Σχ. 7.18: Χωρικό προσομοίωμα του κτιρίου.

Το προσομοίωμα υποβάλλεται σε μια σειρά μη-γραμμικών στατικών αναλύσεων, μεταβάλλοντας κάθε φορά τη γωνία σεισμικής φόρτισης κατά 90° . Επομένως, εκτιμάται η σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής για τις διευθύνσεις σεισμού 0° , 180° , 90° και 270° . Από τη μη-γραμμική στατική ανάλυση προκύπτει η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής για κάθε μία από της παραπάνω περιπτώσεις και υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση d_i^* σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Παράρτημα Β του Μέρους 1 του Ευρωκώδικα 8. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες τιμές της στοχευόμενης μετατόπισης για κάθε διεύθυνση της σεισμικής φόρτισης.

Πίνακας 7.1

Τιμές της στοχευόμενης μετακίνησης d_t^* για τις διαφορετικές διευθύνσεις της σεισμικής φόρτισης.

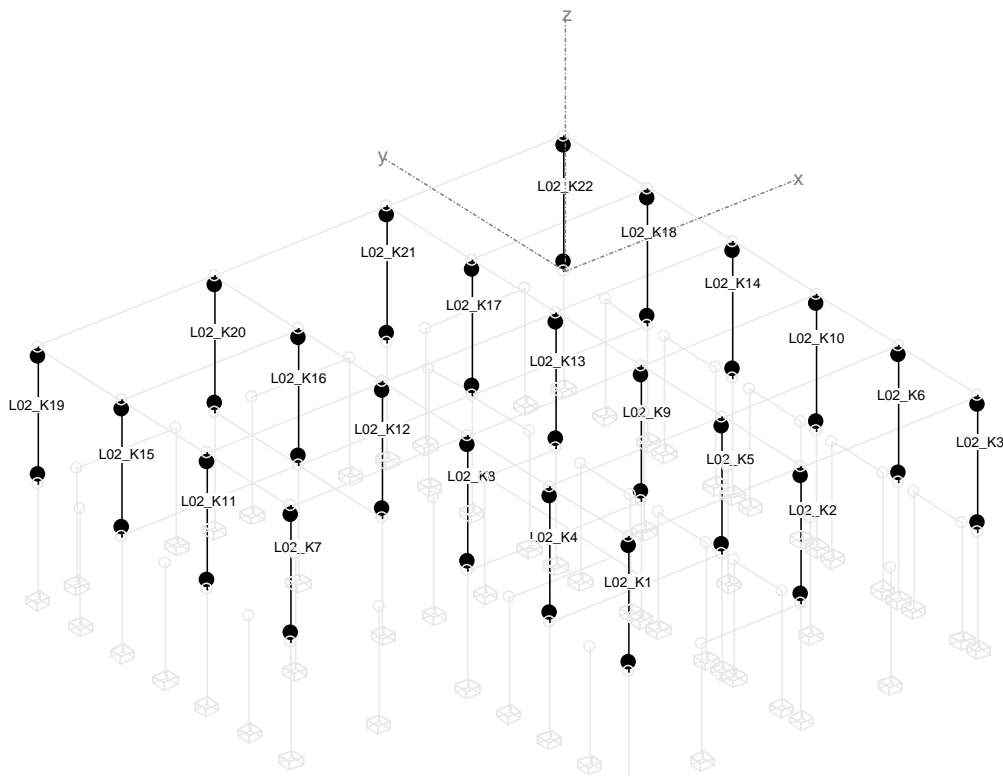
	0°	180°	90°	270°
Στοχευόμενη μετακίνηση d_t^* (σε mm)	30.4	30.8	30.9	30.8

Το επόμενο βήμα για την αποτίμηση της σεισμικής ικανότητας του υφιστάμενου κτιρίου είναι ο υπολογισμός των επιτρεπόμενων τιμών της γωνίας στροφής χορδής για το επίπεδο επιτελεστικότητας «προστασία ζωής», που έχει επιλεγεί. Ο υπολογισμός της επιτρεπόμενης γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων βασίζεται στην Παράγραφο 9.3.1 του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2011) και πραγματοποιείται για κάθε διεύθυνση σεισμού ξεχωριστά. Για το συγκεκριμένο επίπεδο επιτελεστικότητας η επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$\theta_d = 0.5(\theta_y + \theta_u) / \gamma_{Rd}, \quad (7.5)$$

όπου $\gamma_{Rd} = 1.8$, θ_y είναι η γωνία στροφής χορδής κατά τη διαρροή και θ_u η γωνία στροφής χορδής κατά την αστοχία. Η θ_u υπολογίζεται με τη βοήθεια των πινάκων του Παραρτήματος 7B του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σημειώνεται ότι η τιμή της θ_u μεταβάλλεται μέσω ενός διορθωτικού συντελεστή που εξαρτάται από την τιμή του αξονικού φορτίου που δρα σε κάθε υποστύλωμα. Επομένως, η τιμή της επιτρεπόμενης γωνίας στροφής χορδής θ_d θα είναι διαφορετική για κάθε υποστύλωμα, καθώς σε καθένα αντιστοιχεί διαφορετική τιμή της αξονικής δύναμης.

Ο έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής πραγματοποιείται για κάθε υποστύλωμα του ισογείου ξεχωριστά και για κάθε διεύθυνση της σεισμικής φόρτισης. Αφού υπολογιστεί η γωνία στροφής χορδής κάθε υποστυλώματος για τη στοχευόμενη μετακίνηση, συγκρίνεται η τιμή αυτή με την υπολογισμένη επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής, σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται μέσω των Πινάκων 7.2, 7.3, 7.4 και 7.5, που παρατίθενται παρακάτω, για κάθε διεύθυνση της σεισμικής φόρτισης. Για εποπτικούς λόγους, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.19 η αρίθμηση των υποστυλωμάτων που εξετάζονται.



Σχ. 7.19: Αρίθμηση των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής.

Πίνακας 7.2

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 0°.

Υποστυλώμα	Μέγιστη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του σεισμού (mm)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	21	0.57	0.70
L02_K2	21	0.57	0.66
L02_K3	21	0.57	0.69
L02_K4	24	0.63	0.68
L02_K5	24	0.63	0.62
L02_K6	24	0.63	0.66
L02_K7	26	0.70	0.69
L02_K8	26	0.70	0.64
L02_K9	26	0.70	0.62
L02_K10	26	0.70	0.67
L02_K11	29	0.77	0.67
L02_K12	29	0.77	0.61
L02_K13	29	0.77	0.62
L02_K14	29	0.77	0.66
L02_K15	31	0.84	0.67
L02_K16	31	0.84	0.63
L02_K17	31	0.84	0.64
L02_K18	31	0.84	0.66
L02_K19	34	0.90	0.69
L02_K20	34	0.90	0.65
L02_K21	34	0.90	0.65
L02_K22	34	0.90	0.68

Πίνακας 7.3

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 180°.

Υποστώλωμα	Μέγιστη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του σεισμού (mm)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	28	0.75	0.69
L02_K2	28	0.75	0.65
L02_K3	28	0.75	0.69
L02_K4	29	0.77	0.66
L02_K5	29	0.77	0.61
L02_K6	29	0.77	0.66
L02_K7	29	0.79	0.66
L02_K8	29	0.79	0.63
L02_K9	29	0.79	0.61
L02_K10	29	0.79	0.66
L02_K11	30	0.81	0.65
L02_K12	30	0.81	0.61
L02_K13	30	0.81	0.61
L02_K14	30	0.81	0.66
L02_K15	31	0.83	0.64
L02_K16	31	0.83	0.63
L02_K17	31	0.83	0.61
L02_K18	31	0.83	0.66
L02_K19	32	0.86	0.66
L02_K20	32	0.86	0.64
L02_K21	32	0.86	0.63
L02_K22	32	0.86	0.68

Πίνακας 7.4

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 90°.

Υποστώλωμα	Μέγιστη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του σεισμού (mm)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	33	0.87	0.72
L02_K2	31	0.83	0.69
L02_K3	29	0.78	0.71
L02_K4	33	0.87	0.68
L02_K5	31	0.83	0.63
L02_K6	29	0.78	0.67
L02_K7	34	0.92	0.70
L02_K8	33	0.87	0.66
L02_K9	31	0.83	0.65
L02_K10	29	0.78	0.68
L02_K11	34	0.92	0.67
L02_K12	33	0.87	0.63
L02_K13	31	0.83	0.64
L02_K14	29	0.78	0.68
L02_K15	34	0.92	0.68
L02_K16	33	0.87	0.65
L02_K17	31	0.83	0.65
L02_K18	29	0.78	0.67
L02_K19	34	0.92	0.69
L02_K20	33	0.87	0.65
L02_K21	31	0.83	0.66
L02_K22	29	0.78	0.69

Πίνακας 7.5

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 270°.

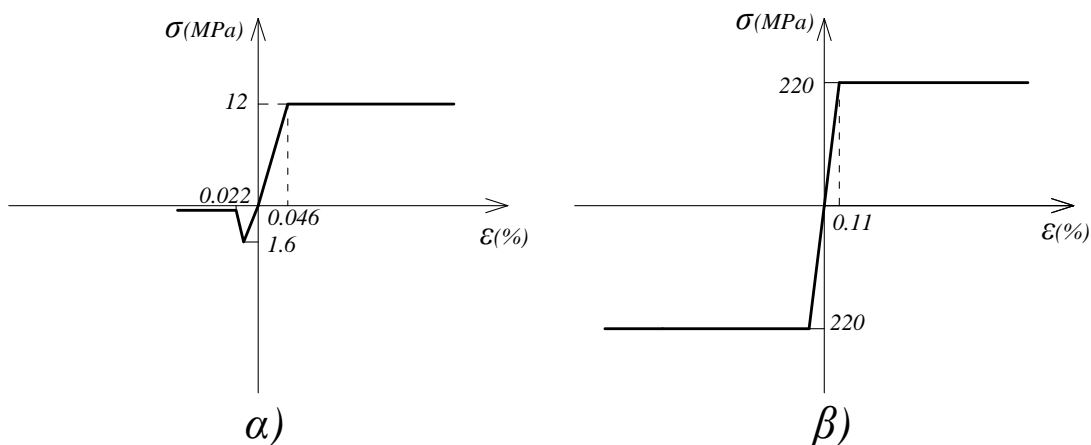
Υποστώλωμα	Μέγιστη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του σεισμού (mm)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	32	0.87	0.70
L02_K2	31	0.83	0.67
L02_K3	29	0.79	0.69
L02_K4	32	0.87	0.68
L02_K5	31	0.83	0.63
L02_K6	29	0.79	0.68
L02_K7	34	0.91	0.69
L02_K8	32	0.87	0.65
L02_K9	31	0.83	0.64
L02_K10	29	0.79	0.68
L02_K11	34	0.91	0.68
L02_K12	32	0.87	0.63
L02_K13	31	0.83	0.63
L02_K14	29	0.79	0.68
L02_K15	34	0.91	0.66
L02_K16	32	0.87	0.63
L02_K17	31	0.83	0.63
L02_K18	29	0.79	0.66
L02_K19	34	0.91	0.70
L02_K20	32	0.87	0.67
L02_K21	31	0.83	0.67
L02_K22	29	0.79	0.70

Από τους παραπάνω πίνακες καθίσταται σαφές ότι η γωνία στροφής χορδής κάθε υποστυλώματος, για τις περισσότερες ή ακόμα και για όλες τις διευθύνσεις σεισμικής φόρτισης, υπερβαίνει την εκάστοτε επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής για την επιλεγμένη στάθμη επιτελεστικότητας «προστασία ζωής». Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να γίνει ενίσχυση της κατασκευής και συγκεκριμένα των υποστυλωμάτων του ισογείου για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του κτιρίου έναντι σεισμού. Η ενίσχυση αποσκοπεί στην αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής του ισογείου με στόχο τόσο τη μείωση των μετακινήσεων και άρα των γωνιών στροφής χορδής των υποστυλωμάτων του, όσο και τη δυνατότητα μεγαλύτερης αντίστασης.

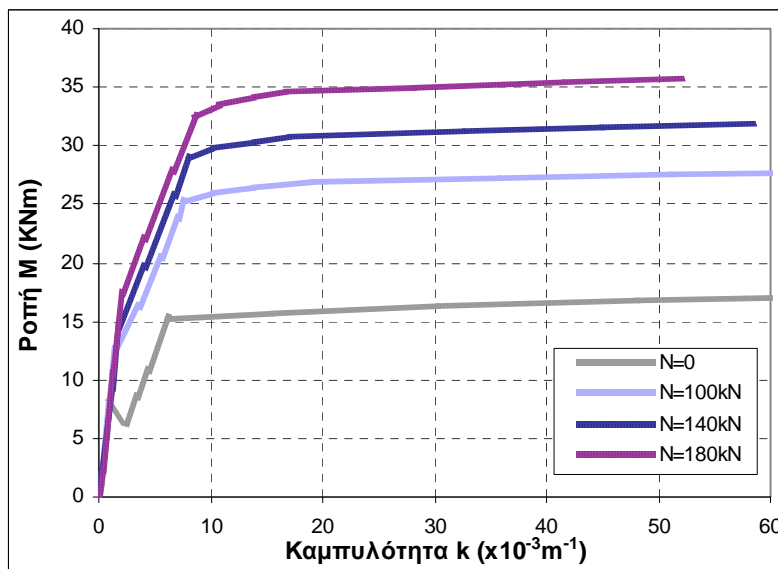
7.3.3 Ανάλυση διατομών των υφιστάμενων και ενισχυμένων υποστυλωμάτων της κατασκευής

Πριν από την εφαρμογή της ενίσχυσης στην υφιστάμενη κατασκευή και την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της μετά την ενίσχυση, κρίθηκε σκόπιμη η ανάλυση διατομών των μη ενισχυμένων και των ενισχυμένων υποστυλωμάτων, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά της ενίσχυσης στην αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής των μελών. Η ανάλυση των διατομών πραγματοποιήθηκε και πάλι με τη βοήθεια του προγράμματος FAGUS-5 της εταιρείας CUBUS.

Αρχικά, πραγματοποιείται η ανάλυση της διατομής των υποστυλωμάτων της υφιστάμενης κατασκευής, θεωρώντας διάφορες τιμές αξονικού φορτίου. Οι διαστάσεις της διατομής, καθώς και η διάταξη των οπλισμών απεικονίζονται στο Σχήμα 7.17. Οι νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων που υιοθετούνται για το σκυρόδεμα τύπου C12/15 και για το χάλυβα ποιότητας S220 παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.20α και β, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 7.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα μη ενισχυμένα υποστυλώματα, σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων και για τιμές αξονικού φορτίου $N=0, 100, 140$ και 180 kN. Όπως είναι αναμενόμενο, η ροπή αντοχής του μέλους αυξάνεται σημαντικά υπό την επίδραση μεγαλύτερων αξονικών φορτίων, εφόσον βέβαια αυτά είναι μικρότερα από το αξονικό φορτίο που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή που μπορεί να φέρει το μέλος.



Σχ. 7.20: Νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων που θεωρούνται για α) το σκυρόδεμα C12/15 και β) το χάλυβα του διαμήκους οπλισμού.



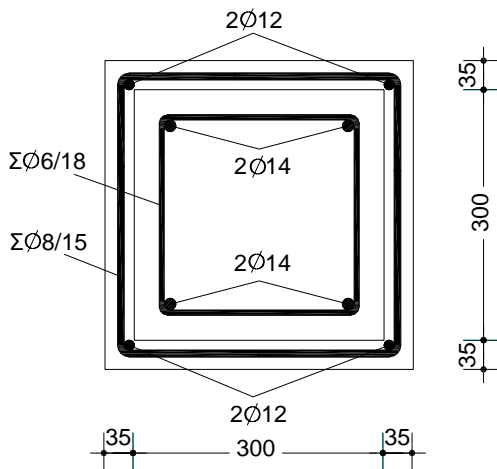
Σχ. 7.21: Διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων για τα μη-ενισχυμένα υποστυλώματα, για διάφορες τιμές αξονικού φορτίου, όπως προκύπτουν από την ανάλυση διατομών στο FAGUS-5.

Στη συνέχεια, μελετώνται τα ενισχυμένα υποστυλώματα μέσω της διαδικασίας ανάλυσης διατομών. Η προτεινόμενη ενίσχυση των υποστυλωμάτων του υπό μελέτη κτιρίου πραγματοποιείται με την εφαρμογή σε αυτά λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Οι μανδύες ενίσχυσης έχουν πάχος 3.5 cm και οπλίζονται με διαμήκεις χαλύβδινες ράβδους και συνδετήρες. Πρόκειται ουσιαστικά για μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος όμοιους με το μανδύα της δοκού M1 του Κεφαλαίου 6, οπλισμένους όμως με διαμήκεις ράβδους Ø12. Στο Σχήμα 7.22 παρουσιάζεται η διατομή και η διάταξη των οπλισμών των ενισχυμένων υποστυλωμάτων. Το ποσοστό οπλισμού ρ_s των ενισχυμένων υποστυλωμάτων προκύπτει μετά από το συνυπολογισμό του διαμήκους οπλισμού και των ιών ως εξής:

$$\rho_s = (A_s + A_f) / A_c = 9.2 \%, \quad (7.6)$$

όπου A_s το συνολικό εμβαδό του διαμήκους οπλισμού του υφιστάμενου υποστυλώματος (4Ø14) και του μανδύα (4Ø12), A_f το ισοδύναμο εμβαδό των ιών στο μανδύα και A_c το εμβαδό διατομής σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος. Σημειώνεται ότι το ποσοστό οπλισμού του ενισχυμένου υποστυλώματος υπολείπεται οριακά του ελάχιστου ποσοστού διαμήκους οπλισμού υποστυλώματος $\rho_{s,\min}$ που είναι, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, ίσο 10%.

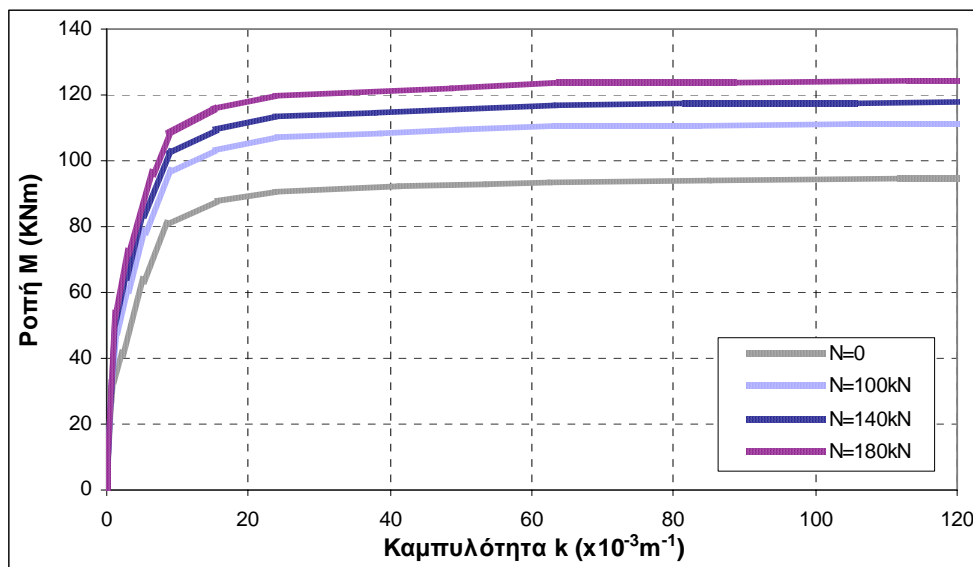
Για την προσομοίωση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα στο πρόγραμμα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 ακολουθείται η τεχνική που περιγράφεται στην Υποπαράγραφο 7.2.2, κατά την οποία ο συνυπολογισμός της συνεισφοράς των χαλύβδινων ιών πραγματοποιείται μέσω της τροποποίησης των ιδιοτήτων υλικού της τσιμεντοειδούς μήτρας και πιο συγκεκριμένα, της εφελκυστικής της αντοχής. Έτσι, θεωρείται για το μανδύα ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα με ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας $E_{i,\text{ισοδ}} = 36.20 \text{ GPa}$ και θλιπτική αντοχή ίση με 80 MPa. Η εφελκυστική αντοχή του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εφελκυστική αντοχή των χαλύβδινων ιών προκύπτει $f_{ct,i,\text{ισοδ}} = 3.8 \text{ MPa}$, ενώ δε λαμβάνεται υπόψη η εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοκονιάματος. Για το θεωρούμενο ομογενές υλικό του μανδύα υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 7.6α, με βάση τον οποίο δεν εξαντλείται η εφελκυστική του αντοχή, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ιών κατά την ανάλυση. Για το χάλυβα του οπλισμού του μανδύα υιοθετείται ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ του Σχήματος 7.2β, με τάση διαρροής 500 MPa και μέτρο ελαστικότητας ίσο με 210 GPa. Τέλος, σημειώνεται ότι, λόγω περιορισμών του προγράμματος FAGUS-5, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα θα πρέπει να θεωρηθεί ίση με μηδέν, όπως έχει ήδη επεξηγηθεί στην Υποπαράγραφο 7.2.2. Στο Σχήμα 7.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών FAGUS-5 για τα ενισχυμένα υποστυλώματα, σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων και για τιμές αξονικού φορτίου $N=0, 100, 140$ και 180 kN.



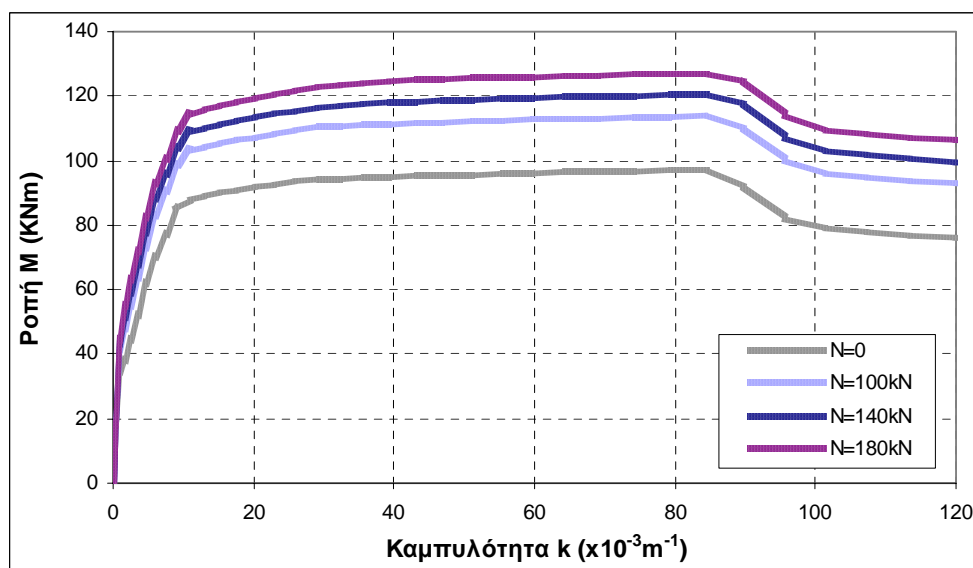
Σχ. 7.22: Σχηματική απεικόνιση της διατομής και της διάταξης των οπλισμών των ενισχυμένων υποστυλωμάτων (διαστάσεις σε mm).

Αν και η αποτίμηση τόσο της υφιστάμενης, όσο και της ενισχυμένης κατασκευής πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος STATIK-5 που συνεργάζεται με το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών FAGUS-5, κρίθηκε σκόπιμο σε αυτό το σημείο να πραγματοποιηθεί η ανάλυση διατομής των ενισχυμένων υποστυλωμάτων και με το πρόγραμμα SAP2000. Η αξία των νέων αυτών αναλύσεων βασίζεται στο γεγονός ότι το λογισμικό SAP2000 παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής κατάλληλου νόμου υλικού με φθίνοντα κλάδο, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η απώλεια της συνεισφοράς των ινών του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα, όπως έχει ήδη περιγραφεί στην Παράγραφο 7.2. Επομένως, το μόνο δεδομένο που διαφοροποιείται σε σχέση με την ανάλυση του FAGUS-5 είναι ο θεωρούμενος νόμος $\sigma-\varepsilon$ για το ισοδύναμο τσιμεντοκονίαμα του μανδύα ενίσχυσης. Πρόκειται ουσιαστικά, για το νόμο του Σχήματος 7.6β, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την απώλεια της συνεισφοράς των ινών μέσω του φθίνοντος κλάδου που αντιστοιχεί στην απώλεια της ισοδύναμης εφελκυστικής αντοχής του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.

Στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών του SAP2000 για τα ενισχυμένα υποστυλώματα, σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων και για τιμές αξονικού φορτίου $N=0, 100, 140$ και 180 kN. Συγκρίνοντας τις καμπύλες των Σχημάτων 7.23 και 7.24 για κάθε τιμή του αξονικού φορτίου, παρατηρείται ότι είναι όμοιες σε σχέση με τη δυσκαμψία του ενισχυμένου μέλους, το σημείο της διαρροής και τις τιμές της ροπής αντοχής. Η μοναδική διαφοροποίησή τους έγκειται στην ύπαρξη του φθίνοντος κλάδου στις καμπύλες που προκύπτουν από την ανάλυση στο SAP2000, που περιγράφει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα. Επίσης, και στα δύο αυτά σχήματα, παρατηρείται και πάλι η αναμενόμενη αύξηση της αντοχής του μέλους λόγω της επιρροής του αξονικού φορτίου.



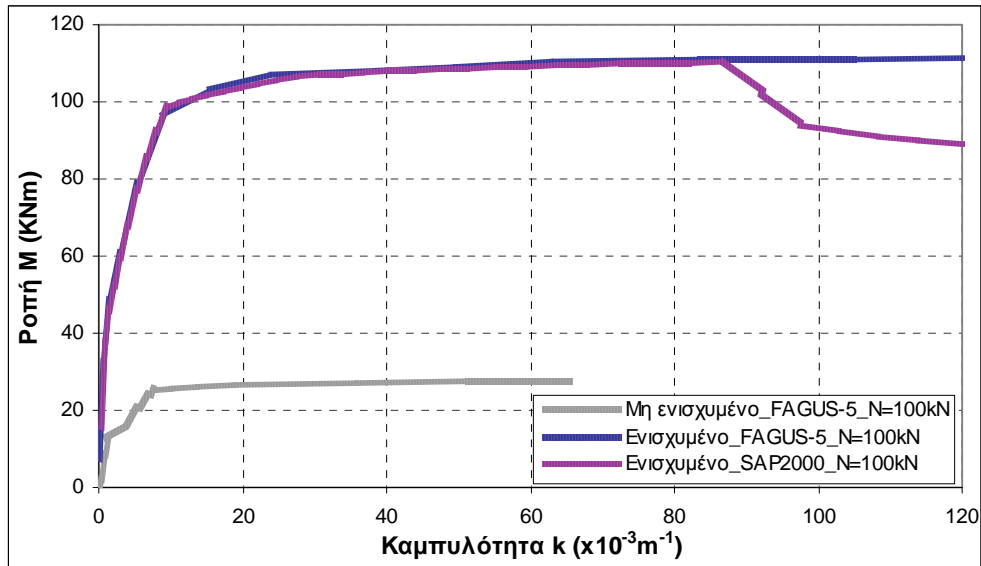
Σχ. 7.23: Διαγράμματα ροπών-καμυλοτήτων για τα ενισχυμένα υποστυλώματα, για διάφορες τιμές αξονικού φορτίου, όπως προκύπτουν από την ανάλυση διατομών στο FAGUS-5.



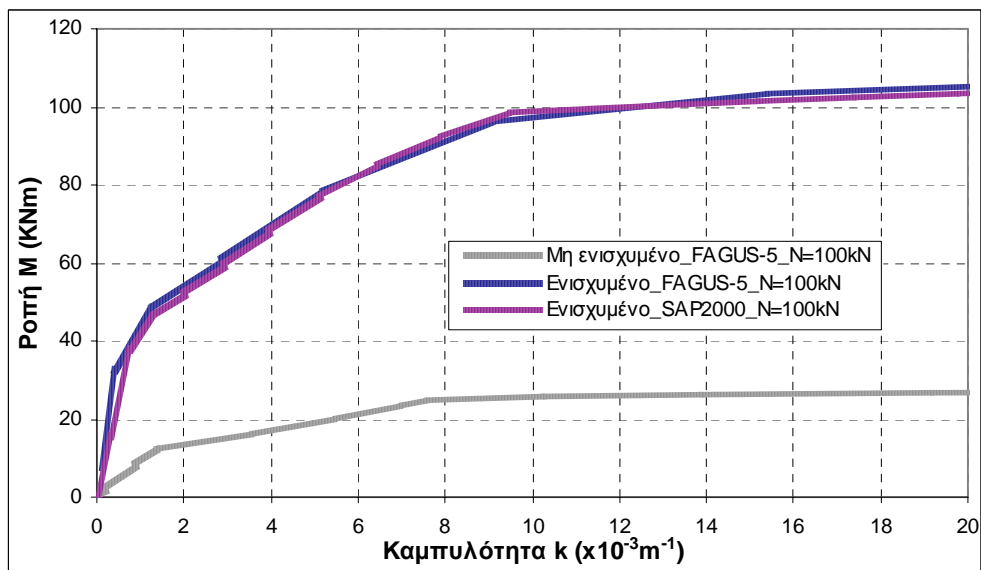
Σχ. 7.24: Διαγράμματα ροπών-καμυλοτήτων για τα ενισχυμένα υποστυλώματα, για διάφορες τιμές αξονικού φορτίου, όπως προκύπτουν από την ανάλυση διατομών στο SAP2000.

Στο Σχήμα 7.25 γίνεται η σύγκριση των διαγραμμάτων ροπών-καμυλοτήτων που προκύπτουν από την ανάλυση διατομής του μη-ενισχυμένου υποστυλώματος στο FAGUS-5 και του ενισχυμένου μέλους στα προγράμματα FAGUS-5 και SAP2000 για επιλεγμένη τιμή του αξονικού φορτίου $N = 100 \text{ kN}$. Είναι εμφανής η μεγάλη αύξηση της αντοχής του μέλους που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των συγκεκριμένων μανδύων. Η ροπή αντοχής του ενισχυμένου υποστυλώματος είναι περισσότερο από τέσσερις φορές μεγαλύτερη αυτής του μη-ενισχυμένου για τη συγκεκριμένη τιμή του αξονικού φορτίου. Σημειώνεται δε ότι, στην περίπτωση του μηδενικού αξονικού φορτίου, η ροπή αντοχής του μέλους σχεδόν εξαπλασιάζεται μετά την ενίσχυση. Επίσης, από την καμπύλη του SAP2000 για το

ενισχυμένο μέλος προκύπτει ότι οι ίνες συνεισφέρουν στην αντοχή για αρκετά μεγάλες τιμές της καμπυλότητας, ενώ και αμέσως μετά από την απώλεια της συνεισφοράς τους, οι τιμές της ροπής αντοχής του μέλους παραμένουν αρκετά υψηλές. Τέλος, στο Σχήμα 7.26 που αποτελεί λεπτομέρεια του Σχήματος 7.25 για μικρές τιμές της καμπυλότητας, φαίνεται η σημαντική αύξηση, τόσο της αρχικής δυσκαμψίας του υποστυλώματος, όσο και της δυσκαμψίας του μετά την αρχική ρηγμάτωση, που οφείλεται στην ενίσχυση του μέλους με το μανδύα.

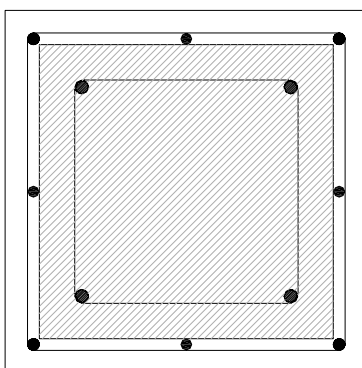


Σχ. 7.25: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων που προκύπτουν από την ανάλυση διατομής του μη-ενισχυμένου υποστυλώματος (FAGUS-5) και του ενισχυμένου υποστυλώματος (FAGUS-5 και SAP2000) για αξονικό φορτίο $N=100 \text{ kN}$.



Σχ. 7.26: Λεπτομέρεια του Σχήματος 7.25 για τιμές τις καμπυλότητας έως $20 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, που αναδεικνύει την αύξηση της δυσκαμψίας του μέλους μετά την ενίσχυση.

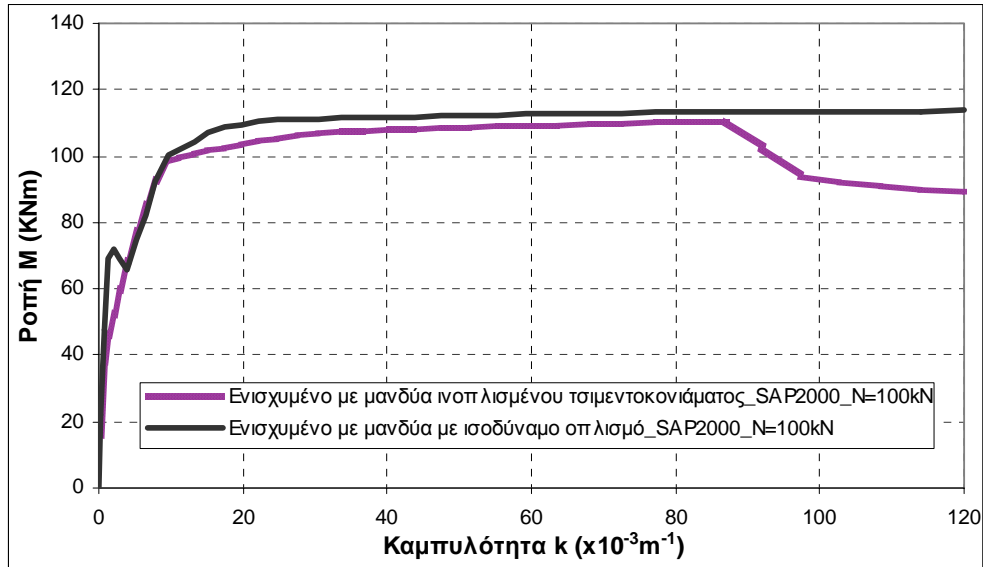
Τέλος, έχει αξία να σχολιαστεί η σημασία της προσθήκης χαλύβδινων ινών στην τσιμεντοειδή μήτρα του μανδύα ενίσχυσης. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί ανάλυση της διατομής υποστυλώματος όμοιου με το υπό μελέτη ενισχυμένο υποστύλωμα του Σχήματος 7.22, στο μανδύα του οποίου θα αντικατασταθεί η ποσότητα των χαλύβδινων ινών με διαμήκεις ράβδους, βάρους αντίστοιχου με αυτού των ινών του μανδύα. Η διατομή του θεωρούμενου ενισχυμένου υποστυλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.27, όπως εισάγεται στο πρόγραμμα ανάλυσης διατομών SAP2000. Όπως φαίνεται, έχουν προστεθεί στο μανδύα τέσσερις ράβδοι, κάθε μία από τις οποίες έχει εμβαδό διατομής ίσο με 0.94 cm^2 . Για την τσιμεντοειδή μήτρα υιοθετείται ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 7.2, ενώ για τις νέες διαμήκεις ράβδους θεωρείται ο νόμος του Σχήματος 7.20β με τάση διαρροής 475 MPa . Η τιμή αυτή προσδιορίζεται με βάση τις ιδιότητες του χάλυβα των ινών, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία και να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έτσι, η τάση διαρροής του χάλυβα των ινών που είναι ίση με 950 MPa πολλαπλασιάζεται με το μειωτικό συντελεστή $a_f = 0.5$ που λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ινών στο μίγμα. Η ανάλυση πραγματοποιείται με θεωρούμενη αξονική δύναμη $N = 100 \text{ kN}$.



Σχ. 7.27: Απεικόνιση της διατομής του θεωρούμενου ενισχυμένου υποστυλώματος, στο μανδύα του οποίου η ποσότητα των ινών έχει αντικατασταθεί με διαμήκη οπλισμό.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του θεωρούμενου υποστυλώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.28 σε όρους ροπών-καμπυλότητας και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ανάλυσης της διατομής του υποστυλώματος που ενισχύεται με το μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Παρατηρείται ότι ο θεωρούμενος μανδύας με τον ισοδύναμο διαμήκη οπλισμό προσδίδει στο υφιστάμενο υποστύλωμα αυξημένη δυσκαμψία και αντοχή, που είναι ανάλογες με εκείνες που προσδίδει ο μανδύας ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Παρόλα αυτά, η θετική επιρροή της παρουσίας των ινών στην τσιμεντοειδή μήτρα του μανδύα δεν περιορίζεται στην ικανότητα του σύνθετου υλικού να αυξάνει τη δυσκαμψία και την καμπτική αντοχή του υφιστάμενου μέλους που ενισχύει. Καθώς οι ίνες είναι κατανομημένες σε όλο τον όγκο του μανδύα και τυχαία προσανατολισμένες στο χώρο, μπορούν να παραλαμβάνουν και διατμητικές τάσεις, αυξάνοντας τη διατμητική αντοχή του συστήματος. Αλλά η σημαντικότερη συνεισφορά τους στη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς του μανδύα και κατ' επέκταση του ενισχυμένου μέλους είναι ο έλεγχος της ρηγμάτωσης. Μετά τη ρηγμάτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας, οι ίνες ενεργοποιούνται «γεφυρώνοντας» τις αναπτυσσόμενες ρωγμές, με αποτέλεσμα αυτές να περιορίζονται

καθώς απορροφάται μέρος της ενέργειας διάδοσής τους. Έτσι, η ανθεκτικότητα (durability) του μέλους αυξάνεται σημαντικά.



Σχ. 7.28: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων που προκύπτουν από την ανάλυση διατομής του υποστυλώματος που ενισχύεται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και του υποστυλώματος που ενισχύεται με το μανδύα με ισοδύναμο διαμήκη σπλισμό ($N=100$ kN).

7.3.4 Ενίσχυση της υφιστάμενης κατασκευής με την εφαρμογή λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Μετά από την ανάδειξη της συνεισφοράς της ενίσχυσης μέσω λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στην αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής των μελών της υφιστάμενης κατασκευής, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των μανδύων αυτών σε όλα τα υποστυλώματα του ισογείου. Στο Σχήμα 7.22 απεικονίζεται η διατομή των ενισχυμένων υποστυλωμάτων. Στην προηγούμενη Υποπαράγραφο έχουν ήδη δοθεί όλες οι λεπτομέρειες για τη διαδικασία εισαγωγής της νέας διατομής στο πρόγραμμα FAGUS-5.

Η διαδικασία αποτίμησης της συμπεριφοράς του ενισχυμένου κτιρίου είναι ίδια με εκείνη που ακολουθήθηκε για την υφιστάμενη κατασκευή και πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου της μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται και πάλι το φάσμα τύπου I του Ευρωκώδικα 8, με ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, συντελεστή επιτάχυνσης $a = 0.24$, κατηγορία σπουδαιότητας Σ1, κατηγορία εδάφους Α και συντελεστή εδάφους $S = 1.00$. Τέλος, επιλέγεται επίπεδο επιτελεστικότητας «προστασία ζωής».

Το νέο προσομοίωμα του ενισχυμένου κτιρίου υποβάλλεται σε μια σειρά μη-γραμμικών στατικών αναλύσεων, μεταβάλλοντας κάθε φορά τη γωνία σεισμικής φόρτισης κατά 90° . Επομένως, εκτιμάται η σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής για τις διευθύνσεις σεισμού 0° , 180° , 90° και 270° . Από τη μη-γραμμική στατική ανάλυση προκύπτει η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής για κάθε μία από της παραπάνω περιπτώσεις και υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση d_i^* για το ενισχυμένο κτίριο, σύμφωνα με τη

διαδικασία που περιγράφεται στο Παράρτημα Β του Μέρους 1 του Ευρωκώδικα 8. Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες τιμές της στοχευόμενης μετακίνησης για κάθε διεύθυνση της σεισμικής φόρτισης.

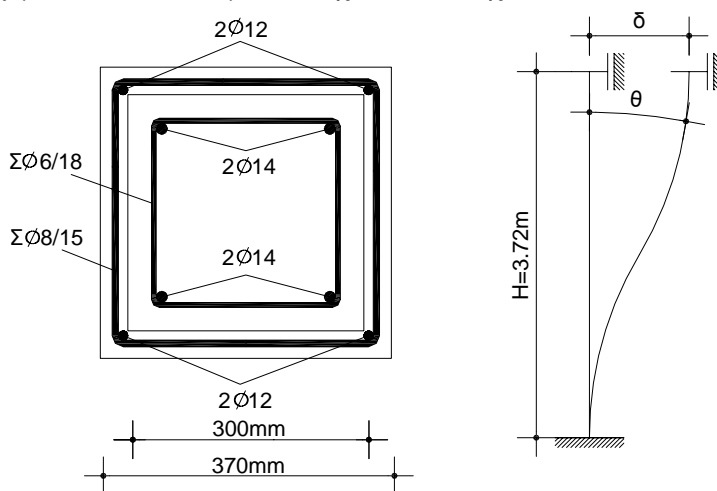
Πίνακας 7.6

Τιμές της στοχευόμενης μετακίνησης d_t^* του ενισχυμένου κτιρίου, για τις διαφορετικές διευθύνσεις της σεισμικής φόρτισης.

	0°	180°	90°	270°
Στοχευόμενη μετακίνηση d_t^* (σε mm)	16.6	16.7	17.0	16.9

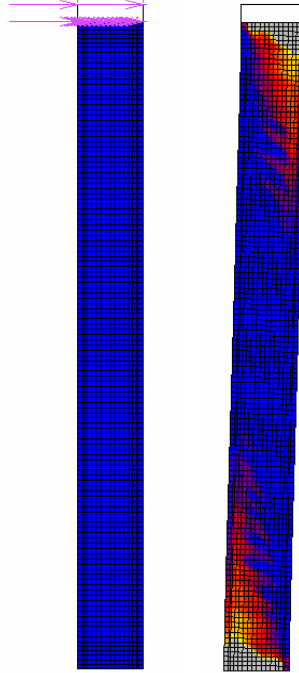
Για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του ενισχυμένου κτιρίου πρέπει να υπολογιστούν οι επιτρεπόμενες τιμές της γωνίας στροφής χορδής για κάθε ενισχυμένο υποστύλωμα. Καθώς όμως δεν υπάρχει κάποιος κανονισμός με βάση τον οποίο να μπορούν να υπολογιστούν οι επιτρεπόμενες γωνίες στροφής χορδής για το ενισχυμένο κτίριο, ακολουθείται μια διαφορετική διαδικασία για τον έλεγχο των ενισχυμένων υποστυλωμάτων. Συγκεκριμένα, μορφώνεται ένα δισδιάστατο προσομοίωμα του υποστυλώματος με τη βοήθεια της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, ακολουθώντας ακριβώς τη διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης που έχει περιγραφεί στα Κεφάλαια 5 και 6. Στόχος είναι να συγκριθούν οι γωνίες στροφής χορδής των ενισχυμένων υποστυλωμάτων της υπό μελέτη κατασκευής με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την ανάλυση του αριθμητικού προσομοιώματος. Ουσιαστικά, μέσω αυτής της διαδικασίας θα ελεγχθεί εάν για τις αναπτυσσόμενες πλαστικές στροφές της κατασκευής, οι ίνες του μανδύα ενίσχυσης των υποστυλωμάτων παραμένουν ενεργές, καθώς στην περίπτωση που έχουν αστοχήσει και έχει χαθεί η συνεισφορά τους, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της κατασκευής δε θα είναι έγκυρα.

Οι διαστάσεις και η διάταξη οπλισμών του ενισχυμένου υποστυλώματος που προσομοιώνεται αριθμητικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.29 και είναι πανομοιότυπες με αυτές των ενισχυμένων υποστυλωμάτων της κατασκευής.



Σχ. 7.29: Διαστάσεις και διάταξη των οπλισμών του ενισχυμένου υποστυλώματος που προσομοιώνεται αριθμητικά.

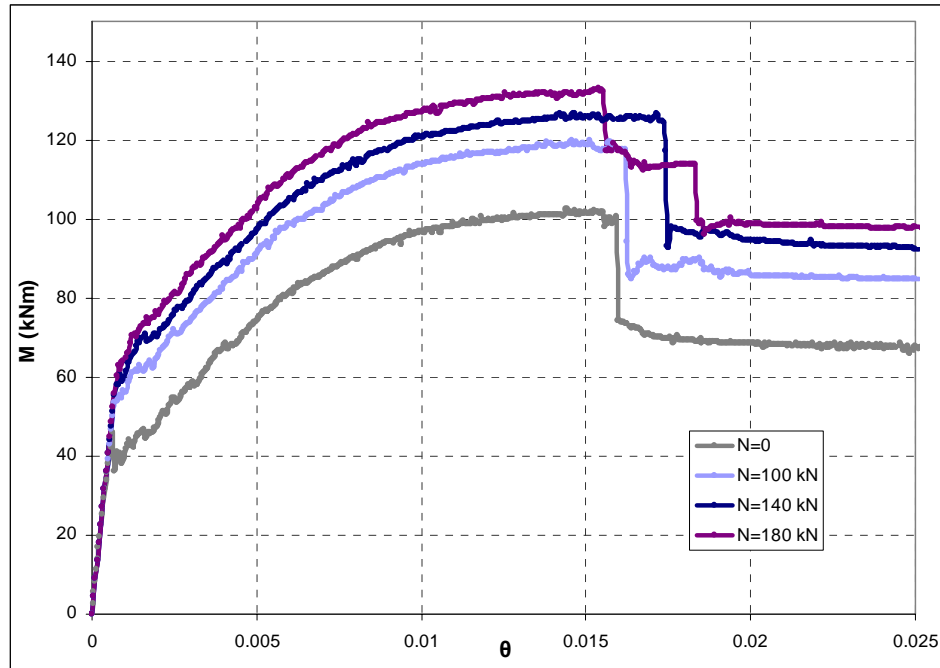
Στο άνω άκρο του υποστυλώματος εφαρμόζεται οριζόντια φόρτιση με τη μορφή επιβαλλόμενων μετατοπίσεων μέσα από 500 βήματα φόρτισης, σε συνδυασμό με σταθερό αξονικό φορτίο. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται αναλύσεις για διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης N , και συγκεκριμένα για $N=0, 100, 140$ και 180 kN. Στο Σχήμα 7.30 παρουσιάζεται το προσομοίωμα του ενισχυμένου υποστυλώματος μετά τη διακριτοποίηση, μαζί με μια ενδεικτική απεικόνιση των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης του μέλους για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 100$ mm.



Σχ. 7.30: Αριθμητικό προσομοίωμα του ενισχυμένου υποστυλώματος και ενδεικτική απεικόνιση των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta = 100$ mm.

Οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης ($P-\delta$) που προκύπτουν από τις αναλύσεις για τις διάφορες τιμές της αξονικής δύναμης, μετατρέπονται σε καμπύλες ροπής-γωνίας στροφής χορδής ($M-\theta$). Η ροπή είναι $M = P \times H/2$ και η γωνία στροφής χορδής $\theta = \delta/H$, όπου H το ύψος του υποστυλώματος. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις διάφορες τιμές της αξονικής δύναμης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.31. Σε όλες τις καμπύλες εμφανίζεται ένας σχεδόν κατακόρυφος φθίνων κλάδος που αντιπροσωπεύει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών του μανδύα ενίσχυσης με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη σημαντική πτώση της αντοχής των ενισχυμένων μελών. Παρατηρείται ότι η απώλεια της συνεισφοράς των ινών συμβαίνει για διαφορετική τιμή της γωνίας στροφής χορδής του υποστυλώματος, ανάλογα με το μέγεθος της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης. Με σκοπό την άρση των αβεβαιοτήτων που μπορεί να υπεισέλθουν στις αριθμητικές δοκιμές, υιοθετείται η λογική εισαγωγής ενός συντελεστή ασφαλείας. Έτσι, προτείνεται η εισαγωγή ενός συντελεστή ασφαλείας με τιμή ίση με 1.50, με τον οποίο διαιρούνται οι τιμές της γωνίας στροφής χορδής για τις οποίες εμφανίζονται τα «άλματα» των καμπυλών $M-\theta$. Οι διαιρεμένες τιμές θα αποτελέσουν τις οριακές τιμές της γωνίας στροφής χορδής, με τις οποίες θα συγκριθούν οι γωνίες στροφής χορδής των υποστυλωμάτων όπως προέκυψαν από τη μη-

γραμμική στατική ανάλυση του ενισχυμένου κτιρίου, ανάλογα με το αξονικό φορτίο που δρα σε καθένα από αυτά. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται μέσω των Πινάκων 7.7, 7.8, 7.9 και 7.10, που παρατίθενται παρακάτω, για κάθε διεύθυνση της σεισμικής φόρτισης. Η αρίθμηση των υποστυλωμάτων παραμένει η ίδια και έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 7.19.



Σχ. 7.31: Καμπύλες ροπής-γωνίας στροφής χορδής που προκύπτουν από τις αναλύσεις του αριθμητικού προσομοιώματος του ενισχυμένου υποστυλώματος για διαφορετικές τιμές της αξονικής δύναμης.

Πίνακας 7.7

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της ενισχυμένης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 0°.

Υποστώλωμα	Αξονική δύναμη N (kN)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	31.96	0.42	1.06
L02_K2	81.05	0.42	1.06
L02_K3	67.96	0.42	1.06
L02_K4	62.88	0.43	1.06
L02_K5	145.82	0.43	1.13
L02_K6	104.04	0.43	1.07
L02_K7	53.17	0.44	1.06
L02_K8	113.90	0.44	1.07
L02_K9	140.69	0.44	1.13
L02_K10	101.56	0.44	1.07
L02_K11	82.34	0.44	1.06
L02_K12	151.66	0.44	1.13
L02_K13	150.16	0.44	1.13
L02_K14	103.88	0.44	1.07
L02_K15	83.05	0.45	1.06
L02_K16	145.60	0.45	1.13
L02_K17	118.26	0.45	1.07
L02_K18	109.10	0.45	1.07
L02_K19	59.98	0.46	1.06
L02_K20	106.64	0.46	1.07
L02_K21	106.33	0.46	1.07
L02_K22	80.54	0.46	1.06

Πίνακας 7.8

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της ενισχυμένης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 180°.

Υποστώλιωμα	Αξονική δύναμη N (kN)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	60.99	0.43	1.06
L02_K2	77.53	0.43	1.06
L02_K3	38.40	0.43	1.06
L02_K4	90.20	0.44	1.06
L02_K5	141.33	0.44	1.13
L02_K6	80.28	0.44	1.06
L02_K7	87.49	0.44	1.06
L02_K8	125.74	0.44	1.08
L02_K9	128.81	0.44	1.08
L02_K10	75.71	0.44	1.06
L02_K11	114.56	0.45	1.07
L02_K12	153.59	0.45	1.13
L02_K13	141.76	0.45	1.13
L02_K14	76.40	0.45	1.06
L02_K15	108.96	0.46	1.07
L02_K16	124.61	0.46	1.08
L02_K17	145.89	0.46	1.13
L02_K18	77.42	0.46	1.06
L02_K19	80.52	0.46	1.06
L02_K20	107.97	0.46	1.07
L02_K21	104.39	0.46	1.07
L02_K22	58.02	0.46	1.06

Πίνακας 7.9

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της ενισχυμένης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 90°.

Υποστώλιωμα	Αξονική δύναμη N (kN)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	19.62	0.45	1.06
L02_K2	29.62	0.46	1.06
L02_K3	13.09	0.46	1.06
L02_K4	97.41	0.45	1.06
L02_K5	165.66	0.46	1.07
L02_K6	108.70	0.46	1.07
L02_K7	22.84	0.45	1.06
L02_K8	104.09	0.45	1.07
L02_K9	133.65	0.46	1.08
L02_K10	86.28	0.46	1.06
L02_K11	109.79	0.45	1.07
L02_K12	162.96	0.45	1.07
L02_K13	147.85	0.46	1.13
L02_K14	91.48	0.46	1.06
L02_K15	79.96	0.45	1.06
L02_K16	112.52	0.45	1.07
L02_K17	115.20	0.46	1.07
L02_K18	79.12	0.46	1.06
L02_K19	112.96	0.45	1.07
L02_K20	174.24	0.45	1.07
L02_K21	160.49	0.46	1.07
L02_K22	112.97	0.46	1.07

Πίνακας 7.10

Έλεγχος της γωνίας στροφής χορδής των υποστυλωμάτων της ενισχυμένης κατασκευής για διεύθυνση σεισμού 270°.

Υποστώλωμα	Αξονική δύναμη N (kN)	Γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος (%)	Επιτρεπόμενη γωνία στροφής χορδής (%)
L02_K1	68.82	0.45	1.06
L02_K2	109.23	0.45	1.07
L02_K3	74.42	0.46	1.06
L02_K4	74.63	0.45	1.06
L02_K5	140.80	0.45	1.13
L02_K6	87.99	0.46	1.06
L02_K7	91.34	0.44	1.06
L02_K8	141.63	0.45	1.13
L02_K9	137.65	0.45	1.08
L02_K10	87.04	0.46	1.06
L02_K11	90.92	0.44	1.06
L02_K12	155.96	0.45	1.13
L02_K13	147.99	0.45	1.13
L02_K14	89.44	0.46	1.06
L02_K15	94.33	0.44	1.06
L02_K16	131.54	0.45	1.08
L02_K17	125.13	0.45	1.08
L02_K18	91.08	0.46	1.06
L02_K19	47.34	0.44	1.06
L02_K20	74.30	0.45	1.06
L02_K21	91.02	0.45	1.06
L02_K22	47.99	0.46	1.06

Από τους παραπάνω πίνακες καθίσταται σαφές ότι η γωνία στροφής χορδής κάθε ενισχυμένου υποστυλώματος για όλες τις διευθύνσεις σεισμικής φόρτισης, βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων, καθώς δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση την εκάστοτε επιτρεπόμενη τιμή της γωνίας στροφής χορδής, όπως αυτή διαμορφώνεται μέσα από τη διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης που ακολουθήθηκε.

Τέλος, στον Πίνακα 7.11 συνοψίζονται και ταυτόχρονα συγκρίνονται οι μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις και οι μέγιστες στροφές πλαστικών αρθρώσεων που εμφανίζουν τα υποστυλώματα για κάθε διεύθυνση σεισμικής φόρτισης, πριν και μετά την ενίσχυση. Μέσω της σύγκρισης αυτής αναδεικνύεται η σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά του ενισχυμένου κτιρίου σε σχέση με την υφιστάμενη κατασκευή, αποδεικνύοντας αποτελεσματική τη μέθοδο ενίσχυσης με την εφαρμογή λεπτών μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στα υποστυλώματα του υπό μελέτη κτιρίου.

Πίνακας 7.11

Σύγκριση των μέγιστων ανελαστικών μετατοπίσεων και μέγιστων πλαστικών στροφών των υποστυλωμάτων για κάθε διεύθυνση σεισμού, πριν και μετά την ενίσχυση.

Διεύθυνση σεισμού	Μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις (m)		Μέγιστες στροφές πλαστικών αρθρώσεων (mrad)	
	ΠΡΙΝ την ενίσχυση	ΜΕΤΑ την ενίσχυση	ΠΡΙΝ την ενίσχυση	ΜΕΤΑ την ενίσχυση
0°	0.034	0.018	9.50	2.04
180°	0.032	0.016	12.82	1.74
90°	0.034	0.017	9.76	3.30
270°	0.034	0.017	9.52	2.25

8 ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ

8.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η παρούσα διατριβή αφιερώνεται στην αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και επικεντρώνεται στη χρήση του σύνθετου υλικού για δομικές εφαρμογές. Πρόκειται για μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής στην οποία προστίθενται λείες χαλύβδινες ίνες με αγκιστροειδή άκρα. Η αριθμητική προσομοίωση επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Δημιουργούνται αριθμητικά προσομοιώματα για τα επιμέρους προβλήματα που μελετώνται και αξιολογούνται μέσω της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά.

Αρχικά, αντιμετωπίστηκε αριθμητικά το πρόβλημα της εξόλκευσης μεμονωμένης χαλύβδινης ίνας με αγκιστροειδή άκρα από τη μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής. Μορφώθηκε ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που λαμβάνει υπόψη τα μη-γραμμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται στο φυσικό πρόβλημα, όπως η πλαστικοποίηση της ίνας, η πλαστικοποίηση και ρηγμάτωση της μήτρας και οι συνθήκες επαφής και τριβής στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας. Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης για τον προσδιορισμό παραμέτρων όπως ο συντελεστής τριβής και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας ίνας και μήτρας. Αποδείχθηκε ότι το προτεινόμενο αριθμητικό προσομοίωμα είναι ικανό να περιγράψει τη συμπεριφορά του συστήματος ίνας και μήτρας σε όλα τα στάδια της εξόλκευσης, καθώς και τους μηχανισμούς που την καθορίζουν. Επίσης, μορφώθηκε ένα απλούστερο δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που είναι ικανό να δώσει αποτελέσματα παρόμοια με εκείνα του ακριβούς και ρεαλιστικότερου τρισδιάστατου προσομοιώματος, αλλά με το σημαντικό πλεονέκτημα του πολύ μικρότερου υπολογιστικού κόστους. Με εργαλείο το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση μέσω της οποίας αναδείχθηκε η σημασία του μηχανισμού αγκύρωσης που προσφέρει η γεωμετρία του αγκιστροειδούς άκρου της ίνας, καθώς και η επιρροή του στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Επίσης, πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς των ινών που εξολκεύονται με διαφορετικές γωνίες ως προς τη διεύθυνση φόρτισης. Το αριθμητικό προσομοίωμα είναι ικανό να αποδώσει τους πρόσθετους μηχανισμούς που καθίστανται κρίσιμοι κατά τη λοξή εξόλκευση των ινών, όπως η κάμψη της ίνας στο σημείο εξόδου της από τη μήτρα και η αστοχία σε θλίψη της τσιμεντοειδούς μήτρας στην ίδια περιοχή, η αλληλεπίδραση των οποίων διαφοροποιεί τη συμπεριφορά του συστήματος για διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού.

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκαν αριθμητικά οι δοκιμές κάμψης δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, είτε χωρίς συμβατικό οπλισμό, είτε με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό.

Παρουσιάστηκε μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, σύμφωνα με την οποία η συνεισφορά της τσιμεντοειδούς μήτρας και των χαλύβδινων ινών στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά, καθώς προσομοιώνονται μέσω δύο διαφορετικών επάλληλων στρώσεων Π.Σ., για τα οποία υιοθετούνται κατάλληλοι νόμοι υλικού. Τόσο για τον καθορισμό παραμέτρων απαραίτητων για την υλοποίηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων, όσο και για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα των αντίστοιχων δοκιμών κάμψης δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά απέδειξε την αξιοπιστία της μεθόδου προσομοίωσης. Τόσο τα αριθμητικά, όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, με και χωρίς συμβατικό οπλισμό, ανέδειξαν το σημαντικό ρόλο του διαμήκους οπλισμού στην ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων. Στην περίπτωση της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς διαμήκη οπλισμό, η αστοχία επήλθε για σημαντικά μικρότερες τιμές της δύναμης και κυρίως της μετατόπισης, καθώς η κύρια ρωγμή εξελίχθηκε γρήγορα, χωρίς τη δυνατότητα περαιτέρω παραμόρφωσης και ανάληψης φορτίου. Αντίθετα, η χρήση ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε συνδυασμό με συμβατικό οπλισμό, οδήγησε στη δημιουργία δοκών με υψηλότερη φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία σε σχέση με μια αντίστοιχη δοκό Ο/Σ και ταυτόχρονα διατήρηση της ικανότητας παραμόρφωσης σε ανάλογα επίπεδα. Επίσης, αναδείχθηκε η ευεργετική συνεισφορά των ινών στη συνολική συμπεριφορά των δοκών αυτών, η οποία μάλιστα διατηρήθηκε για αρκετά μεγάλες τιμές του βέλους κάμψης.

Ακολούθησε η μόρφωση των πιο σύνθετων αριθμητικών προσομοιωμάτων δοκιμών κάμψης δοκών Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του συγκεκριμένου τύπου μανδύα για την ενίσχυση μελών από Ο/Σ. Και πάλι, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά, με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας της ακολουθούμενης μεθόδου προσομοίωσης του σύνθετου υλικού. Τόσο τα αριθμητικά, όσο και τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, ανέδειξαν τη θετική επιρροή της ενίσχυσης με τους λεπτούς μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στην αντοχή, τη δυσκαμψία και τη συνολική συμπεριφορά των δοκών, υπό στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη κάμψη. Παρατηρήθηκε ότι οι δοκοί που ενισχύθηκαν με μανδύα οπλισμένο με δομικό πλέγμα εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με τις δοκούς που ενισχύθηκαν με μανδύα οπλισμένο με διαμήκεις ράβδους Ø10, τόσο για στατική μονοτονική, όσο και για στατική ανακυκλιζόμενη κάμψη. Ακόμη, είναι σημαντικό το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκε κανενός είδους αστοχία της διεπιφάνειας μεταξύ της δοκού Ο/Σ και του μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος κατά τις πειραματικές δοκιμές. Έτσι, φάνηκε ότι τα δύο σώματα συνεργάζονται πλήρως, παρόλο που δεν έγινε καμία ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας της δοκού Ο/Σ πριν τη σκυροδέτηση του μανδύα στα δοκίμια των ενισχυμένων δοκών και δε συνδέθηκαν τα δύο σώματα με κάποιο άλλο μηχανικό μέσο.

Τέλος, καθώς η χρήση των μελετώμενων μανδύων ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος αποσκοπεί κυρίως στην ενίσχυση μελών υφιστάμενων κατασκευών Ο/Σ έναντι σεισμού, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στη μέθοδο προσομοίωσης του σύνθετου υλικού σε ευρείας χρήσης λογισμικά στατικής ανάλυσης. Ακολούθως, η προτεινόμενη μέθοδος προσομοίωσης εφαρμόστηκε σε παράδειγμα ενίσχυσης έναντι σεισμού μελών ενός υφιστάμενου κτιρίου Ο/Σ με μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, μέσω του οποίου αναδείχθηκε η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης τεχνικής.

8.2 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, προτείνονται αριθμητικά προσομοιώματα για την αντιμετώπιση τόσο του προβλήματος της δοκιμής εξόλκευσης μιας ίνας από τσιμεντοειδή μήτρα, όσο και του προβλήματος της προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως υλικό δομικών μελών αλλά και μανδύων ενίσχυσης υφιστάμενων δομικών μελών. Το προτεινόμενο αριθμητικό προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης λαμβάνει υπόψη όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα του φυσικού προβλήματος και αναπαράγει όλους τους μηχανισμούς που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος ίνας και μήτρας κατά την εξόλκευση, ενώ ταυτόχρονα αναδεικνύει τους κρισιμότερους από αυτούς σε κάθε περίπτωση. Έτσι, το αριθμητικό αυτό προσομοίωμα μπορεί να αποτελέσει εργαλείο στα χέρια του μελετητή κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού ενός μείγματος ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και της διερεύνησης της αποτελεσματικότητας διαφορετικών τύπων ινών. Αντίστοιχα, η μέθοδος που προτείνεται για την αριθμητική προσομοίωση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και βασίζεται στην ξεχωριστή προσομοίωση της συνεισφοράς της τσιμεντοειδούς μήτρας και των ινών, παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι της συνήθους μεθόδου που χρησιμοποιείται σε μελέτες της βιβλιογραφίας, κατά την οποία το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα αντιμετωπίζεται ως ένα ομοιόμορφο υλικό και προτείνονται καταστατικά μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του. Συγκεκριμένα, δίνει τη δυνατότητα διεξαγωγής αριθμητικών δοκιμών μεταβάλλοντας εύκολα παραμέτρους, όπως το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, καθώς και της προσομοίωσης κάθε πιθανής ανομοιογενούς κατανομής των ινών καθ' ύψος της διατομής ενός δομικού μέλους ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Επίσης, μέσω της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης του σύνθετου υλικού λαμβάνεται υπόψη η απόκριση του συστήματος ίνας και μήτρας σε όλο το φάσμα λειτουργίας του, από την ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων από της ίνες μετά από την απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του τσιμεντοκονιάματος, έως την απώλεια της συνεισφοράς των ινών λόγω της σταδιακής εξόλκευσής τους από τη μήτρα. Όλα αυτά γίνονται με αξιόπιστο τρόπο, όπως αποδείχθηκε από το μεγάλο αριθμό προσομοιωμάτων πειραματικών δοκιμών που περιλαμβάνονται στην παρούσα διατριβή.

Επίσης, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την εισαγωγή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως υλικό δομικών μελών ή μανδύων ενίσχυσης δομικών μελών Ο/Σ, σε ευρείας χρήσης λογισμικά στατικής ανάλυσης. Ακόμη, στα πλαίσια της πρακτικής

εφαρμογής της ενίσχυσης έναντι σεισμού των μελών ενός υφιστάμενου κτιρίου Ο/Σ με μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και συγκεκριμένα στο στάδιο της αποτίμησης της συμπεριφοράς της ενισχυμένης κατασκευής, προτείνεται μια διαδικασία ελέγχου των ενισχυμένων υποστλωμάτων, η οποία βασίζεται στην αριθμητική προσομοίωση των ενισχυμένων μελών.

Επιπλέον, μέσα από την παρούσα μελέτη, τονίζεται η σημασία της διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών πάνω στα προβλήματα που αντιμετωπίζονται αριθμητικά και της ύπαρξης πειραματικών αποτελεσμάτων που αρχικά θα βοηθήσουν στον καθορισμό παραμέτρων απαραίτητων για τη μόρφωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων και στη συνέχεια, μέσα από τη σύγκριση τους με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα, θα οδηγήσουν στην αξιολόγηση και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Ακόμη, μέσα από τη διαδικασία μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων, αναδεικνύονται τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν και αναπτύσσεται η μεθοδολογία με την οποία αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν. Ταυτόχρονα, προσδιορίζονται και τα είδη των πειραμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων είναι αναγκαίο να έχει στη διάθεσή του ο μελετητής προκειμένου να καθορίσει τις τιμές διαφόρων παραμέτρων, έτσι ώστε να προχωρήσει στην αξιόπιστη αριθμητική αντιμετώπιση του προβλήματος που μελετά. Συγκεκριμένα, για την αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης μιας χαλύβδινης ίνας με αγκιστροειδή άκρα και γενικότερα μιας ίνας με μηχανικά βελτιωμένο σχήμα από τσιμεντοειδή μήτρα, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας στο αρχικό στάδιο της εξόλκευσης και του συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο σωμάτων και μπορεί να πραγματοποιηθεί ως εξής:

- Για τον προσδιορισμό της συνάφειας που αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό της διεπιφάνειας ίνας και μήτρας κατά το αρχικό στάδιο της εξόλκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης μίας ευθύγραμμης ίνας, αντίστοιχης όμως με αυτή που μελετάται.
- Η τιμή του συντελεστή τριβής μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα αριθμητικά προσομοιώματα της δοκιμής εξόλκευσης της μελετώμενης ίνας για διάφορους συντελεστές τριβής, με τα αποτελέσματα της αντίστοιχης πειραματικής δοκιμής εξόλκευσης.

Σχετικά με την αριθμητική προσομοίωση μελών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και μελών Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού μιας σειράς άλλων παραμέτρων. Θα πρέπει καταρχήν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του ισοδύναμου υλικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των ινών στα αριθμητικά προσομοιώματα Π.Σ. και για το σκοπό αυτόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών κάμψης δοκών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, όπως περιγράφεται παρακάτω:

- Ο προσδιορισμός της τάσης διαρροής του ισοδύναμου υλικού μπορεί να βασιστεί σε αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών κάμψης δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό.
- Οι χαρακτηριστικές τιμές της παραμόρφωσης που καθορίζουν το φθίνοντα κλάδο του νόμου $\sigma - \varepsilon$ που υιοθετείται για το ισοδύναμο υλικό και προσομοιώνει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών λόγω της σταδιακής εξόλκευσής τους από τη μήτρα, συστήνεται να προσδιοριστούν μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών κάμψης δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό, με τα αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Τέλος, λόγω της ύπαρξης φθίνοντος κλάδου στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του ισοδύναμου υλικού που προσομοιώνει τη συνεισφορά των ινών, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αριθμητική διερεύνηση της εξάρτησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων από την πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου δικτύου των Π.Σ., έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των χρησιμοποιούμενων προσομοιωμάτων.

Στις περιπτώσεις εισαγωγής του σύνθετου υλικού σε ευρείας χρήσης λογισμικά στατικής ανάλυσης κατασκευών θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο φαινόμενο της απώλειας της συνεισφοράς των ινών, που οφείλεται στη σταδιακή εξόλκευσή τους από τη μήτρα. Όπως αναδείχθηκε μέσα από την παρούσα μελέτη, θα πρέπει να ελεγχθούν και πιθανώς να επαναπροσδιοριστούν οι τιμές των παραμορφώσεων που καθορίζουν το φθίνοντα κλάδο που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών, καθώς μπορεί να προκύψουν διαφοροποιήσεις στη λύση λόγω, κυρίως, της παραδοχής της επιπεδότητας των διατομών που γίνεται σε τέτοιου είδους λογισμικά, η οποία όμως δεν ισχύει στην πραγματικότητα για σημαντικά ρηγματωμένα μέλη. Η διερεύνηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ανάλυσης της διατομής, τόσο ενός μέλους από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, όσο και ενός ενισχυμένου μέλους και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από κάποιο αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα Π.Σ. ή κάποια πειραματική δοκιμή. Τέλος, μέσα από το παράδειγμα ενίσχυσης έναντι σεισμού των μελών ενός υφιστάμενου κτιρίου Ο/Σ με μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, αναδεικνύεται η ανάγκη εισαγωγής ενός νέου συντελεστή ασφαλείας. Συγκεκριμένα, στο στάδιο της αποτίμησης της συμπεριφοράς της ενισχυμένης κατασκευής, κατά τον έλεγχο των γωνιών στροφής χορδής των ενισχυμένων υποστλωμάτων, προτείνεται η εισαγωγή συντελεστή ασφαλείας που θα συνεκτιμήσει την αβεβαιότητα σε σχέση με την τιμή της γωνίας στροφής χορδής, στην οποία εμφανίζεται η απώλεια της συνεισφοράς των ινών και επομένως, η μείωση της φέρουσας ικανότητας του ενισχυμένου μέλους.

Με βάση τα παραπάνω, τα πρωτότυπα σημεία της παρούσας διατριβής μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Προτείνεται τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της δοκιμής εξόλκευσης μιας χαλύβδινης ίνας με μηχανικά βελτιωμένο σχήμα από τσιμεντοειδή μήτρα, που λαμβάνει υπόψη τα μη-γραμμικά φαινόμενα του φυσικού προβλήματος και είναι

ικανό να αναπαράγει τους μηχανισμούς που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος ίνας και μήτρας κατά την εξόλκευση. Το αριθμητικό προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης ινών με διαφορετική γεωμετρία, αλλά και την προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης ινών με διάφορες γωνίες προσανατολισμού σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής.

- Προτείνεται μία νέα μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, σύμφωνα με την οποία οι συνεισφορές της τσιμεντοειδούς μήτρας και των χαλύβδινων ινών στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά, καθώς προσομοιώνονται μέσω δύο διαφορετικών επάλληλων στρώσεων Π.Σ., για τα οποία υιοθετούνται κατάλληλοι νόμοι υλικού. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στην αριθμητική προσομοίωση τόσο δομικών μελών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, όσο και μελών Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες από το σύνθετο υλικό.
- Αναπτύσσονται οι μεθοδολογίες που θα πρέπει να ακολουθηθούν για τον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων του νόμου υλικού που υιοθετείται για το ισοδύναμο υλικό που προσομοιώνει τη συμπεριφορά των ινών στα αριθμητικά προσομοιώματα δομικών μελών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Ταυτόχρονα, αναδεικνύονται τα πειραματικά αποτελέσματα που είναι αναγκαίο να έχει στη διάθεσή του ο μελετητής - ερευνητής, ώστε να προχωρήσει με ασφάλεια στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.
- Παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την εισαγωγή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως υλικό δομικών μελών ή μανδύων ενίσχυσης δομικών μελών Ο/Σ, σε ευρείας χρήσης λογισμικά στατικής ανάλυσης κατασκευών. Επίσης, αναδεικνύονται τα σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και προτείνονται τεχνικές για τον έλεγχο και την αντιμετώπισή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η τιμή της γωνίας στροφής χορδής ενός ενισχυμένου μέλους για την οποία χάνεται η συνεισφορά των ινών του μανδύα ενίσχυσης.

8.3 Προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διατριβή, επισημαίνονται κάποια θέματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης:

- Ιδιαίτερη αξία θα είχε η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών λοξής εξόλκευσης των ινών με αγκιστροειδή άκρα από τη μήτρα τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής, για διάφορες γωνίες φόρτισης. Μέσω αυτών των πειραματικών αποτελεσμάτων θα μπορούσε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων. Κυρίως όμως, μετά από στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, θα μπορούσε να προσδιοριστεί για το συγκεκριμένο υλικό ο μειωτικός συντελεστής a_f που λαμβάνει υπόψη τον τυχαίο προσανατολισμό των ινών στο μίγμα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσε να συνδεθεί άμεσα η απόκριση σε εξόλκευση μιας μεμονωμένης ίνας με την απόκριση των ινών στο μίγμα ινοπλισμένου

τσιμεντοκονιάματος. Υπενθυμίζεται ότι στα πλαίσια της αριθμητικής προσομοίωσης του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υιοθετήθηκε τιμή για το συντελεστή a_f από τη βιβλιογραφία.

- Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας, που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας του ελέγχου των γωνιών στροφής χορδής κατά το στάδιο της αποτίμησης της συμπεριφοράς της ενισχυμένης κατασκευής, προσδιορίστηκε για το υπό μελέτη ενισχυμένο μέλος, τη δεδομένη καταπόνηση και τα συγκεκριμένα αποτελέσματα του αριθμητικού προσομοιώματος του ενισχυμένου μέλους. Έτσι, η θεωρούμενη τιμή του συντελεστή ασφαλείας δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε περίπτωση. Θα ήταν χρήσιμη επομένως μια αριθμητική διερεύνηση με στόχο τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή ασφαλείας ανάλογα με το είδος του ενισχυμένου μέλους και το είδος της καταπόνησης.
- Παρόλο που στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προσομοιώνεται αριθμητικά η συμπεριφορά του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως υλικό μανδύων ενίσχυσης υφιστάμενων μελών Ο/Σ, δεν αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης οι τεχνικές εφαρμογές των μανδύων αυτού του τύπου σε μέλη υφιστάμενων κατασκευών Ο/Σ. Επομένως, θα είχε ενδιαφέρον η διερεύνηση των κατασκευαστικών λεπτομερειών, του τρόπου διαμόρφωσης των αγκυρώσεων και της εξασφάλισης της συνέχειας των ροών των δυνάμεων κατά την ενίσχυση των μελών μιας υφιστάμενης κατασκευής Ο/Σ με τους υπό μελέτη μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

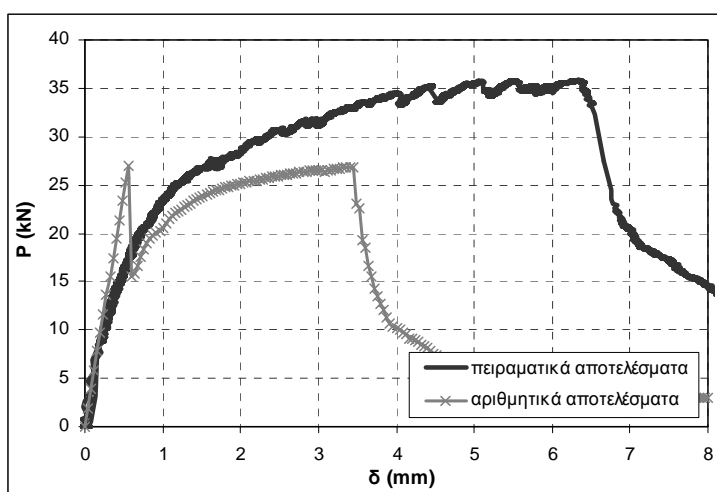
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ Π.Σ.

Α.1 Προσδιορισμός της τάσης διαρροής του ισοδύναμου υλικού

Όπως έχει αναφερθεί, σύμφωνα με τον κατασκευαστή των ινών, η τάση διαρροής τους είναι της τάξης των 1400 MPa. Όμως, τόσο από τις πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης των ινών από τσιμεντοειδή μήτρα υψηλής αντοχής, όσο και από αναλύσεις των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων, αποδείχθηκε ότι η ίνα κατά την εξόλκευσή της δεν εξαντλεί τη μέγιστη αντοχή της, καθώς ολισθαίνει έξω από τη μήτρα. Επομένως, κρίθηκε μη ρεαλιστική η υιοθέτηση τάση διαρροής ίσης με 1400 MPa στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του χάλυβα των ινών, η συνεισφορά των οποίων λαμβάνεται υπόψη μέσω της θεώρησης ενός ισοδύναμου ομογενοποιημένου στρώματος υλικού κατά την αριθμητική προσομοίωση των δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε ο υπολογισμός μια ισοδύναμης τάσης διαρροής για το χάλυβα των ινών, f_y^F .

Αρχικά, υπολογίστηκε η τιμή της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται κατά την εξόλκευση της ίνας από την τσιμεντοειδή μήτρα. Από τη στατιστική επεξεργασία των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η μέση τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης P που παραλαμβάνει η ίνα είναι ίση με 80.996 N (§4.2). Επίσης, καθώς η διάμετρος της ίνας είναι ίση με 0.4 mm, το εμβαδό της διατομής της είναι ίσο με 0.1256mm². Επομένως, η ζητούμενη τιμή της τάσης προκύπτει ίση με 645 MPa. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε το αριθμητικό προσομοίωμα της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (δοκός Τύπου Β, §5.6) υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, εισάγοντας στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του χάλυβα των ινών (βλ. Σχήμα 5.6ε, §5.4.2) τάση διαρροής ίση με την τιμή της υπολογισμένης ισοδύναμης τάσης. Για την προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών θεωρήθηκε ένα ομογενοποιημένο στρώμα υλικού με ισοδύναμο πάχος $t_f = 0.6$ mm. Η τιμή αυτή προσδιορίστηκε με βάση το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, το πάχος των στοιχείων της τσιμεντοειδούς μήτρας και το συντελεστή a_f που λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ινών στο μίγμα και τέθηκε ίσος με 0.5 με βάση τη βιβλιογραφία (Σχέση (5.5), §5.4.1). Στο Σχήμα Α.1 συγκρίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν, με τα αντίστοιχα πειραματικά. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται φανερό η σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή που δίνουν τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με το αριθμητικό προσομοίωμα. Για να αιτιολογηθεί αυτή η διαφορά, θα πρέπει να ανατρέξουμε στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.41 και 4.42 της Παραγράφου 4.6, που αφορούν σε αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιωμάτων δοκιμών εξόλκευσης ινών με διάφορες γωνίες φόρτισης. Σ' αυτά είχε παρατηρηθεί ότι για γωνίες φόρτισης 30°-60°, η αρχική δυσκαμψία του συστήματος ίνας και μήτρας μειώνεται σημαντικά. Δεν παρατηρείται όμως, αντίστοιχη μείωση στην τιμή της μέγιστης δύναμης εξόλκευσης, που παραμένει περίπου ίδια για όλες τις μελετώμενες γωνίες φόρτισης.

Τα αποτελέσματα αυτά, δικαιολογούν τη θεώρηση του συντελεστή $a_f = 0.5$ σε ότι αφορά στον υπολογισμό της δυσκαμψίας του ισοδύναμου υλικού στα προσομοιώματα των δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος. Άλλωστε, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για όλες τις ινοπλισμένες δοκούς, η αρχική δυσκαμψία προσεγγίζεται ικανοποιητικά. Από την άλλη πλευρά όμως, για τον υπολογισμό της αντοχής του ισοδύναμου υλικού θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας μεγαλύτερος συντελεστής. Όμως, ο μειωτικός συντελεστής a_f που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους του χάλυβα των ινών, επηρεάζει τόσο τη δυσκαμψία όσο και την αντοχή που συνολικά προσφέρει το ομογενές στρώμα χάλυβα που προσομοιώνει τη συνεισφορά των ινών. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η ροπή αντοχής που προκύπτει από το αριθμητικό προσομοίωμα για $f_y^F = 645$ MPa υπολείπεται της ροπής αντοχής που προκύπτει από το πείραμα.



Σχ. Α.1: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων με τα αντίστοιχα αριθμητικά, θεωρώντας τάση διαρροής του χάλυβα των ινών ίση με 645 MPa.

Γενικώς, για να ληφθεί υπόψη σωστά η επιρροή του τυχαίου προσανατολισμού των ινών στα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκών, θα έπρεπε να υιοθετηθούν δύο διαφορετικοί συντελεστές: ένας για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας και ένας για τον υπολογισμό της αντοχής του ισοδύναμου υλικού. Αυτό όμως δεν είναι δυνατό γιατί ο υπολογισμός και των δύο παραπάνω μεγεθών γίνεται μέσω μιας μοναδικής παραμέτρου, του ισοδύναμου πάχους του χάλυβα των ινών. Κατά συνέπεια, από τη στιγμή που δεν είναι δυνατή η διαφοροποίηση της τιμής του πάχους (γιατί τότε θα οδηγούμασταν σε διαφοροποίηση και της δυσκαμψίας), θα πρέπει να εκτιμηθεί μια νέα ισοδύναμη τάση διαρροής του χάλυβα των ινών, έτσι ώστε τελικά το αποτέλεσμα να είναι το ίδιο.

Έτσι, αποφασίστηκε να γίνει ο υπολογισμός της f_y^F , ώστε η ροπή αντοχής που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση να είναι αντίστοιχη με αυτή της πειραματικής. Αυτό γίνεται με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών κάμψης των δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό, ώστε να μην υπάρχει επιρροή της συνεισφοράς άλλου μηχανισμού στη συνολική αντοχή της δοκού. Για το

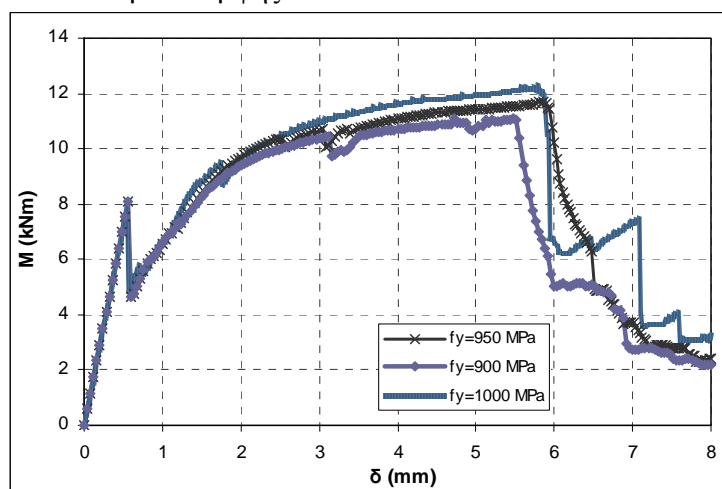
σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμών κάμψης τριών ή/και τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση που είχαν διεξαχθεί στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για κάθε ένα από αυτά τα πειράματα υπολογίστηκε η μέγιστη τιμή της ροπής αντοχής, $\max M$ και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα Α.1.

Πίνακας Α.1

Μέγιστες τιμές της ροπής αντοχής της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό όπως προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές κάμψης.

α/α πειράματος	τύπος κάμψης	$\max M$ (kNm)
1	τριών σημείων	11.43
2	τριών σημείων	13.54
3	τεσσάρων σημείων	10.82
4	τεσσάρων σημείων	11.41
5	τεσσάρων σημείων	10.87
6	τριών σημείων	10.91
Μέσος όρος		11.50

Το επόμενο βήμα ήταν να προσδιοριστεί μια τιμή ισοδύναμης τάσης διαρροής για το χάλυβα των ινών τέτοια, ώστε εάν εφαρμοστεί στο αριθμητικό προσομοίωμα της αντίστοιχης δοκιμής κάμψης να προκύψει μέγιστη τιμή της ροπής αντοχής περίπου ίση με το μέσο όρο των μέγιστων τιμών της ροπής αντοχής των πειραματικών δοκιμών. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θεωρώντας τάση διαρροής $f_y^F = 900, 950$ και 1000 MPa, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα Α.2. Παρατηρείται ότι για τιμή της ισοδύναμης τάσης διαρροής του χάλυβα των ινών $f_y^F = 950$ MPa προκύπτει μέγιστη ροπή αντοχής της δοκού ίση με 11.68 kNm. Καθώς η τιμή αυτή προσεγγίζει περισσότερο το μέσο όρο των μέγιστων τιμών ροπής των πειραματικών αποτελεσμάτων, αποφασίστηκε να υιοθετηθεί ως η ισοδύναμη τάση διαρροής του χάλυβα των ινών για όλα τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμών κάμψης.



Σχ. Α.2: Αριθμητικά αποτελέσματα για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, θεωρώντας διάφορες τιμές για την τάση διαρροής του χάλυβα των ινών.

A.2 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τιμών ε_1 και ε_2 του νόμου σ - ε του ισοδύναμου υλικού

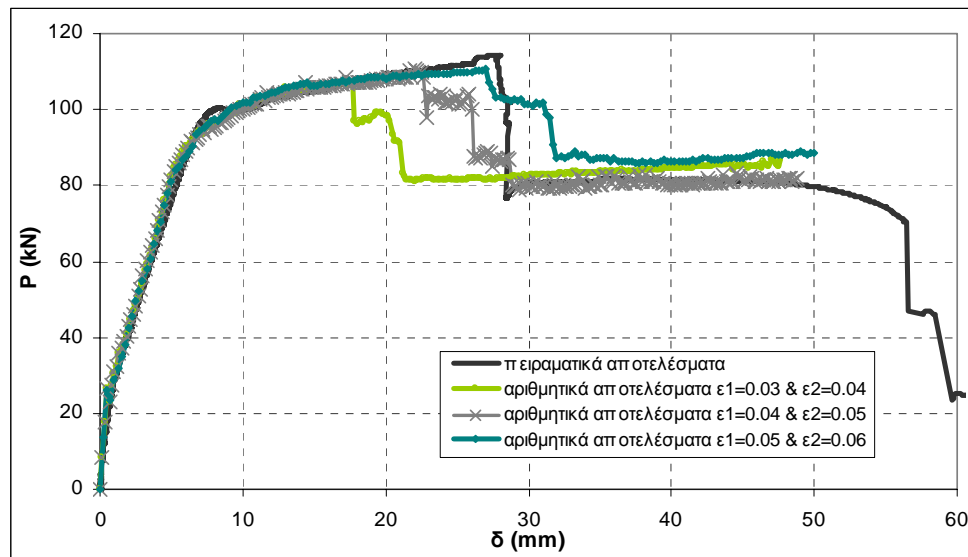
Οι χαρακτηριστικές τιμές της παραμόρφωσης ε_1 και ε_2 είναι εκείνες που καθορίζουν το φθίνοντα κλάδο του νόμου τάσεων – παραμορφώσεων (βλ. Σχήμα 5.6ε, §5.4.2) που υιοθετείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του χάλυβα των ινών του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, κατά την αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης. Η επιλογή των τιμών ε_1 και ε_2 είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ο φθίνων κλάδος που καθορίζουν αντιπροσωπεύει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών του σύνθετου υλικού λόγω της σταδιακής εξόλκευσής τους από την τσιμεντοειδή μήτρα. Επομένως, αναμένεται να έχει άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών κάμψης των δοκών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών αυτών τιμών βασίστηκε στα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, υπό στατική μονοτονική φόρτιση τεσσάρων σημείων. Χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή, τα πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό Τύπου Γ που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.29 (§5.7.2). Σημειώνεται ότι αποφασίστηκε να μη χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία προσδιορισμού των χαρακτηριστικών τιμών ε_1 και ε_2 τα πειραματικά αποτελέσματα της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς συμβατικό οπλισμό (Τύπος Β). Παρατηρήθηκε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης τριών ή/και τεσσάρων σημείων υπό στατική μονοτονική φόρτιση που χρησιμοποιήθηκαν στην Παράγραφο Α.1 για τον προσδιορισμό της τάσης διαρροής του χάλυβα των ινών, παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους σε σχέση με την τιμή της μετατόπισης για την οποία συμβαίνει η απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Λόγω της ασυνέπειας των αποτελεσμάτων αυτών, που θα εισήγαγε σημαντική αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των τιμών ε_1 και ε_2 , αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τα πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό.

Αρχικά, μορφώθηκε το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της δοκού με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση σε σχέση με την τιμή της παραμόρφωσης ε_1 που εισάγεται στο προσομοίωμα μέσω του νόμου σ – ε του χάλυβα των ινών. Στην παραμόρφωση ε_2 δόθηκαν αντίστοιχα τιμές τέτοιες ώστε η κλίση του φθίνοντα κλάδου που καθορίζεται κάθε φορά να μην είναι τόσο μεγάλη που να οδηγεί σε αριθμητική αστάθεια και δυσκολία σύγκλισης του αλγορίθμου επίλυσης, αλλά ούτε και τόσο μικρή που να οδηγεί σε αλλοίωση της προσομοίωσης της διαδικασίας απώλειας της συνεισφοράς των ινών. Συγκεκριμένα, τα ζεύγη τιμών που θεωρήθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση για τα ε_1 και ε_2 ήταν 0.03 και 0.04, 0.04 και 0.05 και τέλος, 0.05 και 0.06.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση παρουσιάζονται, μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά, στο Σχήμα Α.3. Όπως ήταν αναμενόμενο, η διαφοροποίηση της τιμής του ε_1 επηρέασε τα αριθμητικά αποτελέσματα ως προς την τιμή της μετατόπισης δ για την οποία εμφανίζεται η πτώση της αντοχής στο

διάγραμμα $P-\delta$ που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Συγκεκριμένα, για μικρότερες τιμές της παραμόρφωσης ε_1 , η απώλεια της συνεισφοράς των ινών συμβαίνει σε μικρότερες τιμές της μετατόπισης δ . Μετά από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, αποφασίστηκε να υιοθετηθεί το ζεύγος τιμών 0.04 και 0.05 για τις παραμορφώσεις ε_1 και ε_2 του νόμου $\sigma-\varepsilon$ του χάλυβα των ινών, καθώς η αριθμητική καμπύλη που προέκυψε από τη θεώρηση των τιμών αυτών προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα.

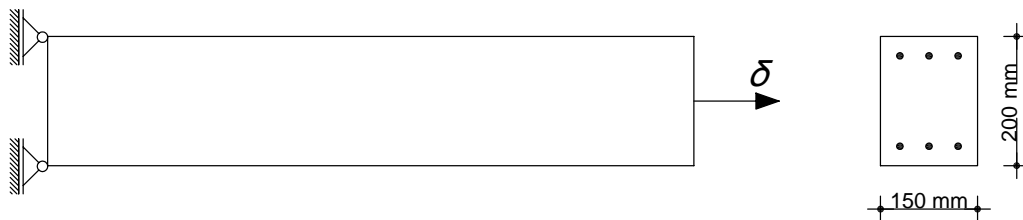


Σχ. Α.3: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης για διάφορες τιμές των ε_1 και ε_2 με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικό οπλισμό, υπό στατική μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων.

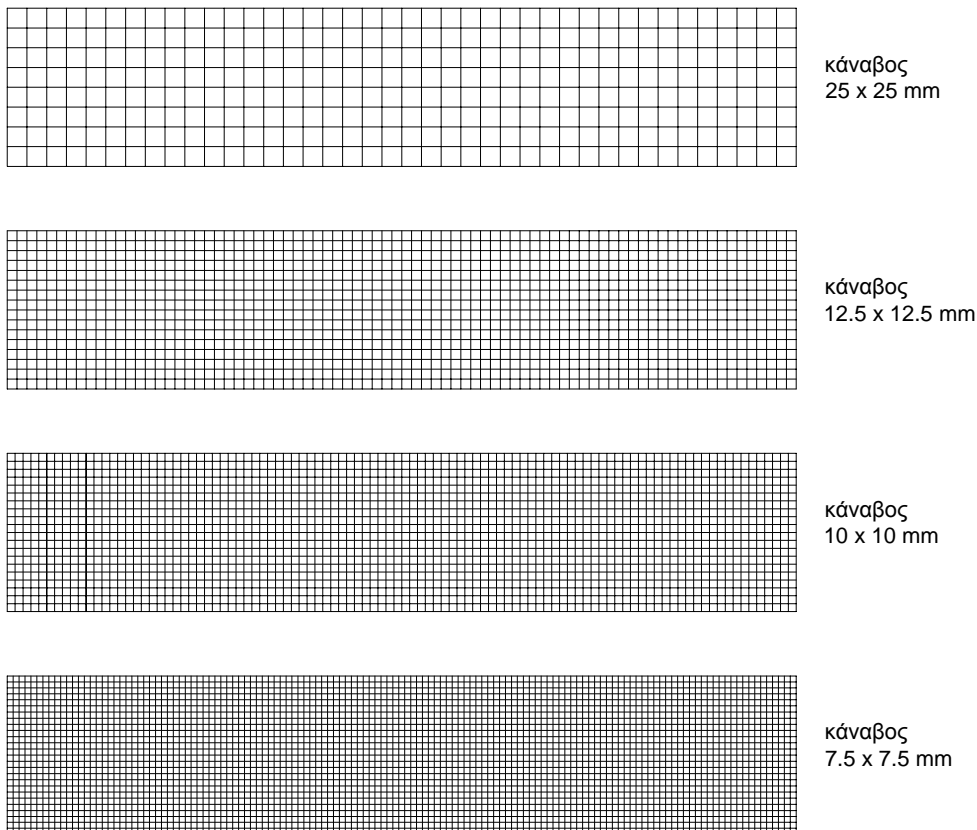
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ Π.Σ.

Όπως είναι γενικά γνωστό, η ύπαρξη φθινόντων κλάδων στους νόμους τάσεων – παραμορφώσεων που εισάγονται σε ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει στο πρόβλημα της εξάρτησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων από την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (mesh sensitivity problem). Επομένως, μετά από τον προσδιορισμό του φθινόντα κλάδου του νόμου $\sigma - \varepsilon$ που υιοθετείται για το ισοδύναμο υλικό που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του χάλυβα των ινών, θεωρήθηκε απαραίτητη η διερεύνηση της ευαισθησίας της λύσης του προβλήματος που μελετάται σε σχέση με την πυκνότητα διακριτοποίησης των προσομοιωμάτων.

Για την πραγματοποίηση της διερεύνησης αυτής μορφώθηκε το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα μιας δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό που εφελκύεται κατά τη διεύθυνση του μήκους του, όπως φαίνεται στο Σχήμα Β.1. Στο αριστερό άκρο της δοκού δεσμεύτηκαν οι οριζόντιες μετατοπίσεις ενώ στο δεξί άκρο επιβλήθηκε σταδιακά οριζόντια μετατόπιση δ . Η εφελκόμενη δοκός ήταν πανομοιότυπη με τη μελετώμενη δοκό Τύπου Γ, σε σχέση με τη διατομή (Σχήμα 5.2, §5.2.1) και τις ιδιότητες των υλικών της (§5.4.2). Επίσης, ακολουθήθηκε και πάλι η διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν διαφορετικής πυκνότητας δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων για τη διακριτοποίηση της δοκού, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των διαφορετικών κανάβων στα αποτελέσματα του προβλήματος. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν κάναβι αποτελούμενοι από στοιχεία επίπεδης έντασης διαστάσεων 25×25 mm, 12.5×12.5 mm, 10×10 mm και 7.5×7.5 mm, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα Β.2. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι για τη μόρφωση όλων των αριθμητικών προσομοιωμάτων των δοκιμών κάμψης των δοκών που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιούνται κάναβι αποτελούμενοι από πεπερασμένα στοιχεία με διάσταση ίση με 10 mm κατά τη διεύθυνση του μήκους της δοκού.

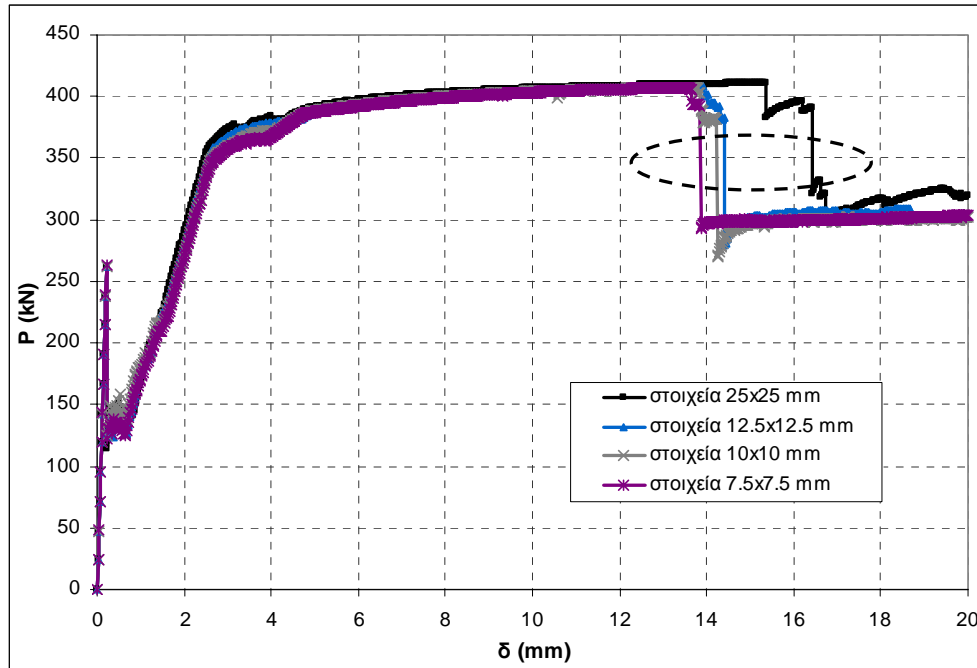


Σχ. Β.1: Σχηματική απεικόνιση της εφελκόμενης δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό και λεπτομέρεια της διατομής της.



Σχ. Β.2: Σχηματική απεικόνιση των δικτύων Π.Σ. διαφορετικής πυκνότητας που υιοθετήθηκαν για τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε.

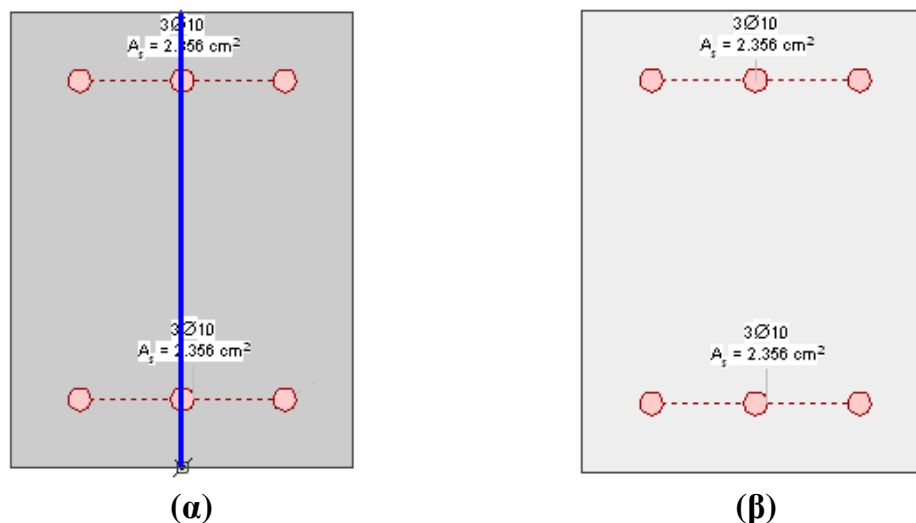
Στο Σχήμα Β.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τα διαφορετικά δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων. Η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην πυκνότητα της διακριτοποίησης αναδεικνύεται μέσω των «αλμάτων» που σημειώνονται στο συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος. Η απότομη αυτή πτώση της αντοχής οφείλεται στην απώλεια της συνεισφοράς των ιών λόγω της εξόλκευσής τους, καθώς το εύρος μιας κύριας ρωγμής αυξάνεται σημαντικά. Παρατηρείται ότι η σημαντικότερη διαφοροποίηση μεταξύ των καμπυλών που προέκυψαν μέσω των διαφορετικών δικτύων Π.Σ. έγκειται στην τιμή της μετατόπισης δ για την οποία συμβαίνει η απώλεια της συνεισφοράς των ιών. Παρόλα αυτά, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, αποδεικνύεται ότι εάν χρησιμοποιηθεί δίκτυο Π.Σ. ελαφρώς πυκνότερο ή και αραιότερο από το δίκτυο που χρησιμοποιείται σε όλα τα αριθμητικά προσομοιώματα της παρούσας διατριβής (στοιχεία με διάσταση ίση με 10 mm κατά τη διεύθυνση του μήκους της δοκού), η διαφοροποίηση στην τιμή της μετατόπισης δ για την οποία χάνεται η συνεισφορά των ιών δεν είναι άξια λόγου.



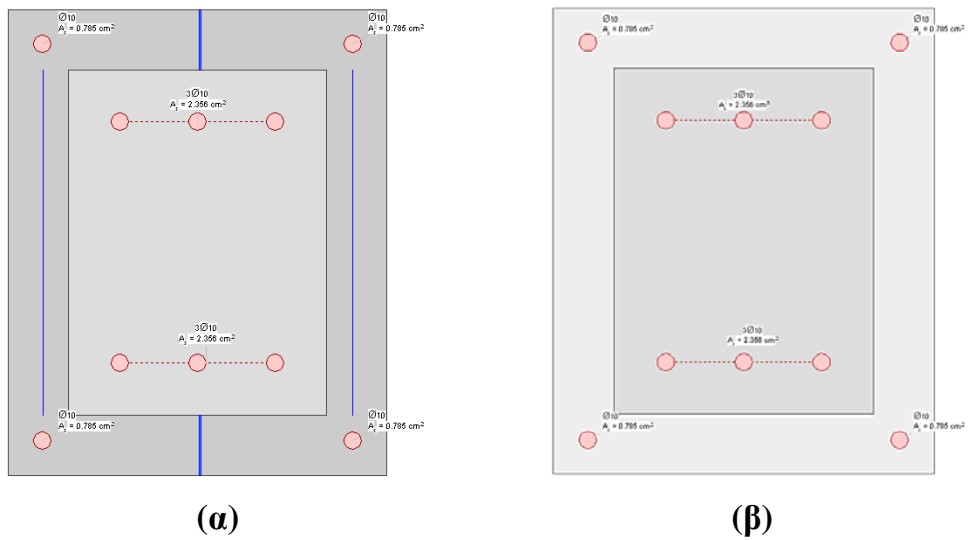
Σχ. Β.3: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη δοκό ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό υπό εφελκυσμό, όπως προκύπτουν για τα διαφορετικής πυκνότητας δίκτυα Π.Σ. που μελετήθηκαν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

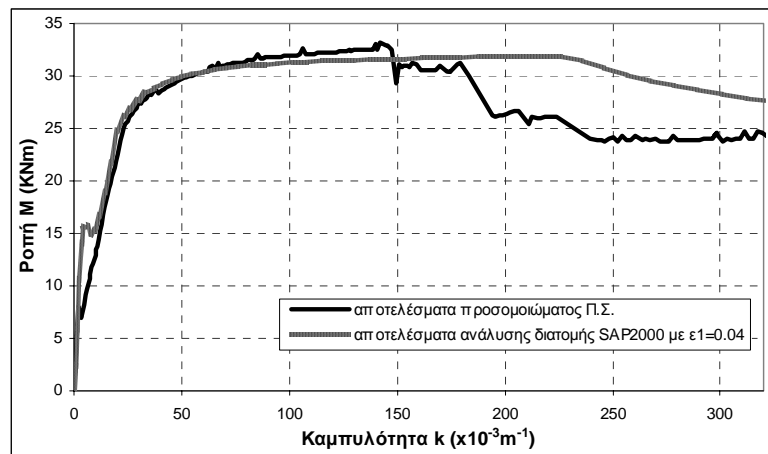
Όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Α, για τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμών κάμψης υιοθετήθηκε το ζεύγος τιμών $\varepsilon_1 = 0.04$ και $\varepsilon_2 = 0.05$ που καθορίζουν το φθίνοντα κλάδο του νόμου $\sigma - \varepsilon$ του ισοδύναμου υλικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των ινών. Ο ίδιος νόμος υλικού χρησιμοποιείται και στην Παράγραφο 7.2 για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ομογενούς φύλλου χάλυβα κατά την ανάλυση των διατομών της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και της δοκού που ενισχύεται με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με τη χρήση του λογισμικού SAP2000. Επίσης, οι χαρακτηριστικές αυτές τιμές εισάγονται και στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος για τις αντίστοιχες αναλύσεις διατομών (§7.2.1 και §7.2.2), έτσι ώστε να καθοριστεί ο φθίνων κλάδος που προσομοιώνει την απώλεια της συνεισφοράς των ινών ως απώλεια της ισοδύναμης εφελκυστικής αντοχής του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος. Η τάση διαρροής του χάλυβα των ινών θεωρείται $f_y^F = 950$ MPa, όπως ακριβώς και στα αριθμητικά προσομοιώματα Π.Σ. Για εποπτικούς λόγους, παρουσιάζονται και πάλι στα Σχήματα Γ.1 και Γ.2 οι διατομές των δοκών που μελετώνται στην Παράγραφο 7.2. Αφού θεωρήθηκαν οι τιμές $\varepsilon_1 = 0.04$ και $\varepsilon_2 = 0.05$ για τους χρησιμοποιούμενους νόμους $\sigma - \varepsilon$, πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις διατομών των προαναφερθέντων δοκών μέσω του SAP2000. Στα Σχήματα Γ.3, Γ.4, Γ.5 και Γ.6 συγκρίνονται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των διατομών με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων.



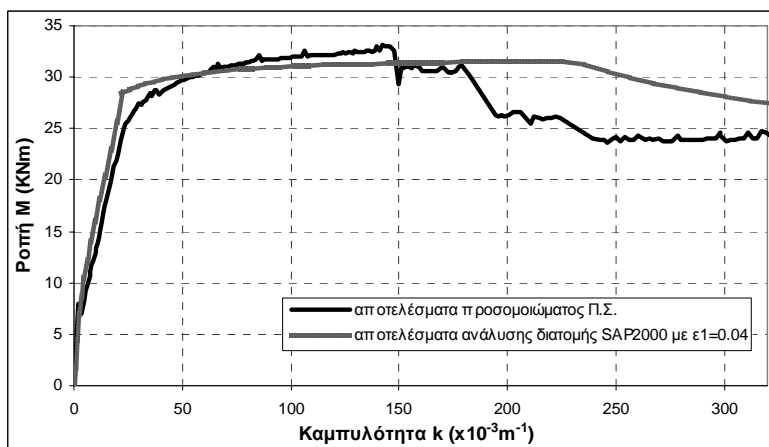
Σχ. Γ.1: Απεικόνιση της διατομής της δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω α) ομογενούς φύλλου χάλυβα και β) ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.



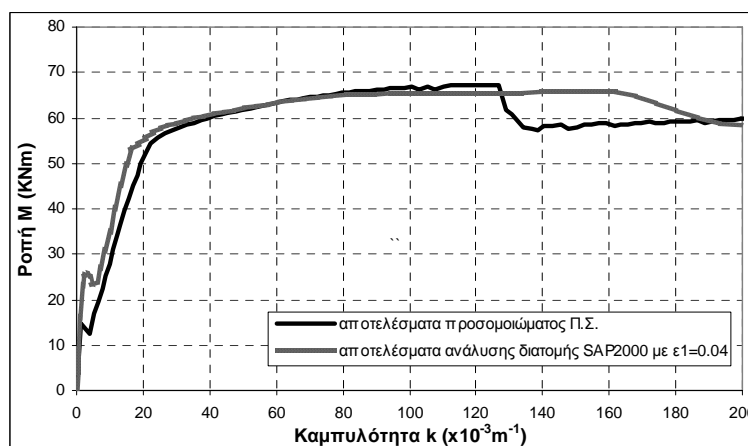
Σχ. Γ.2: Απεικόνιση της διατομής της δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω α) ομογενούς φύλλου χάλυβα και β) ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.



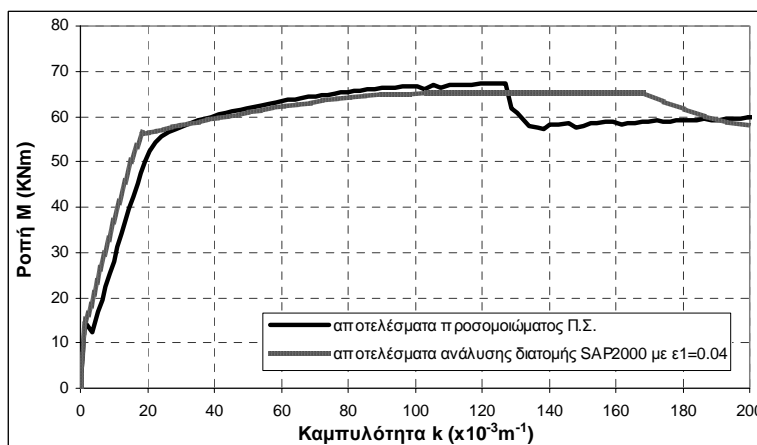
Σχ. Γ.3: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.



Σχ. Γ.4: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη σπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.



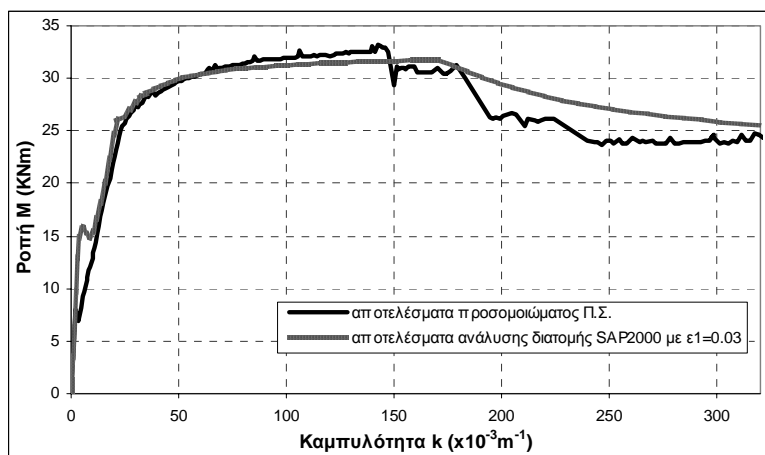
Σχ. Γ.5: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.



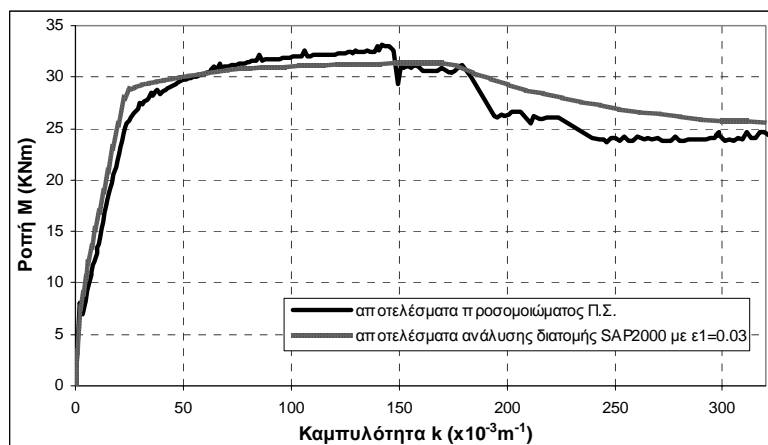
Σχ. Γ.6: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.

Σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιώματων Π.Σ. και των αναλύσεων των διατομών, σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της ροπής αντοχής για κάθε περίπτωση. Επομένως, με τη διατήρηση της τιμής της τάσης διαρροής του χάλυβα των ινών ίση με 950 MPa προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις των διατομών. Όμως παρατηρείται ότι, παρόλο που θεωρήθηκαν οι ίδιες τιμές για τις παραμορφώσεις ε_1 και ε_2 που προσδιορίζουν το φθίνοντα κλάδο του νόμου $\sigma - \varepsilon$ του χάλυβα των ινών κατά την αριθμητική προσομοίωση και την ανάλυση διατομής μέσω του SAP2000, η απώλεια της συνεισφοράς των ινών συμβαίνει για διαφορετικές τιμές της καμπυλότητας. Συγκεκριμένα, στις καμπύλες που προέκυψαν από τις αναλύσεις στο SAP2000 ο φθίνων κλάδος που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών εμφανίζεται για αρκετά μεγαλύτερες τιμές της καμπυλότητας σε σχέση τις αντίστοιχες που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις. Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην παραδοχή της επιπεδότητας των διατομών που γίνεται κατά την ανάλυση διατομών, η οποία όμως δεν ισχύει στην πραγματικότητα για σημαντικά ρηγματωμένα μέλη.

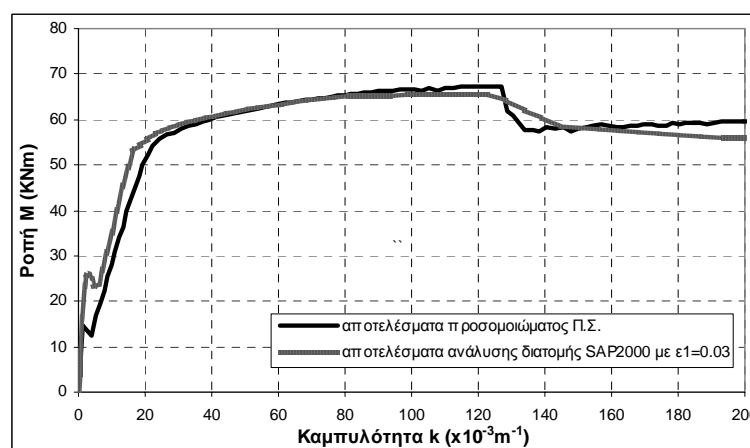
Επομένως, θα πρέπει να προσδιοριστεί μια μικρότερη τιμή της παραμόρφωσης ε_1 που εάν εισαχθεί στο νόμο $\sigma - \varepsilon$ του χάλυβα των ινών και του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος για την ανάλυση διατομών στο SAP2000, θα προκύπτουν αποτελέσματα που θα προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αντίστοιχα αριθμητικά σε σχέση με το φθίνοντα κλάδο που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνεισφοράς των ινών. Η διαδικασία αυτή κρίθηκε απαραίτητη έτσι ώστε να μη θεωρούνται αναξιόπιστα τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διατομών λόγω της υπερεκτίμησης της αντοχής του εκάστοτε μέλους. Όλες οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και πάλι, με τη χρήση του λογισμικού SAP2000, θεωρώντας αυτή τη φορά $\varepsilon_1 = 0.03$ στους αντίστοιχους νόμους υλικού. Οι καμπύλες που προέκυψαν από τις νέες αναλύσεις συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αριθμητικές στα Σχήματα Γ.7, Γ.8, Γ.9 και Γ.10.



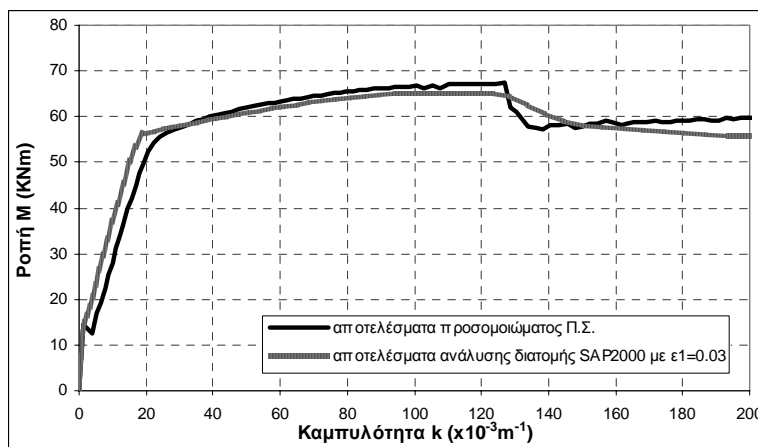
Σχ. Γ.7: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη οπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.



Σχ. Γ.8: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με διαμήκη σπλισμό, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.



Σχ. Γ.9: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ομογενούς φύλλου χάλυβα.



Σχ. Γ.10: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων διατομής δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, για προσομοίωση της συνεισφοράς των ινών μέσω ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.

Σε όλα τα νέα διαγράμματα παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων των προσομοιωμάτων Π.Σ. και εκείνων που προέκυψαν από την ανάλυση διατομών μέσω του SAP2000, θεωρώντας τη χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης $\varepsilon_1 = 0.03$. Επομένως, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η τιμή αυτή στους νόμους $\sigma - \varepsilon$ που εισάγονται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ομογενούς φύλλου χάλυβα και του ισοδύναμου τσιμεντοκονιάματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdollahi A. 1996. Numerical strategies in the application of the FEM to RC structures-I. *Computers & Structures* 58(6): 1171-1182.
- Adhikary BB, Mutsuyoshi H, Sano M. 2000. Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis. *Construction and Building Materials* 14(5): 237-244.
- Alaee FJ, Karihaloo BL. 2003. Retrofitting of Reinforced Concrete Beams with CARDIFRC. *ASCE Journal of Composites for Construction* 7(3): 174-186.
- Armelin HS, Banthia N. 1997. Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from the Pullout of Single Fibers. *ACI Materials Journal* 94(1): 18-31.
- Ashour SA, Wafa FF. 1993. Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal* 90(3): 279-287.
- Balaguru P, Najm H. 2004. High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Mixture Proportions with High Fiber Volume Fractions. *ACI Materials Journal* 101(4): 281-286.
- Balaguru P, Narahari R, Patel M. 1992. Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal* 89(6): 541-546.
- Banholzer B, Brameshuber W, Jung W. 2005. Analytical simulation of pull-out tests – the direct problem. *Cement & Concrete Composites* 27(1): 93-101.
- Banholzer B, Brameshuber W, Jung W. 2006. Analytical evaluation of pull-out tests – The inverse problem. *Cement & Concrete Composites* 28(6): 564-571.
- Banthia N, Trottier JF. 1994. Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers, Part I: Bond-Slip Mechanisms. *ACI Materials Journal* 91(5): 435-446.
- Banthia N, Trottier JF. 1995. Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part II: Toughness Characterization. *ACI Structural Journal* 92(2): 146-154.
- Bartos PJM, Duris M. 1994. Inclined tensile strength of steel fibres in a cement-based composite. *Composites* 25(10): 945-952.
- Bathe KJ. 1996. Finite Element Procedures. *Prentice Hall, Inc.* New Jersey.
- Bentur A, Mindess S. 1983. Concrete beams reinforced with conventional steel bars and steel fibres: properties in static loading. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 5(3): 199-202.
- Cailleux E, Cutard T, Bernhart G. 2005. Pullout of steel fibres from a refractory castable: experiment and modelling. *Mechanics of Materials* 37(4): 427-445.

Casanova P, Rossi P, Schaller I. 1997. Can Steel Fibers Replace Transverse Reinforcements in Reinforced Concrete Beams?. *ACI Materials Journal* 94(5): 341-354.

Chajes MJ, Thomson Jr TA, Januszka TF, Finch Jr WW. 1994. Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. *Construction and Building Materials* 8(3): 191-201.

Chanvillard G, Aïtcin PC. 1996. Pull-out Behavior of Corrugated Steel Fibers. *Advanced Cement Based Materials* 4(1): 28-41.

Chanvillard G. 1999. Modeling the pullout of wire-drawn steel fibers. *Cement and Concrete Research* 29(7): 1027-1037.

Chunxiang Q, Patnaikuni I. 1999. Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending. *Cement & Concrete Composites* 21(1): 73-81.

Cook RD. 1995. Finite Element Modeling for Stress Analysis. *John Wiley & Sons, Inc.* New York.

Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM. 2007. Pullout behaviour of hooked-end steel fibres in self-compacting concrete. Report 07-DEC/E06, University of Minho.

Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM. 2008. Bond-Slip Mechanisms of Hooked-End Steel Fibers in Self-Compacting Concrete. *Materials Science Forum* 587-588: 877-881.

Daniel L, Loukili A. 2002. Behavior of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading. *ACI Structural Journal* 99(3): 248-256.

de Borst R, Nauta P. 1985. Non-orthogonal cracks in a smeared finite element model. *Engineering Computations* 2(1): 35-46.

de Borst R, Remmers JJC, Needleman A, Abellan MA. 2004. Discrete vs smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 28(7-8): 583-607.

Dogan E, Krstulovic-Opara N. 2003. Seismic Retrofit with Continuous Slurry-Infiltrated Mat Concrete Jackets. *ACI Structural Journal* 100(6): 713-722.

Dupont D, Vandewalle L. 2005. Distribution of steel fibers in rectangular sections. *Cement & Concrete Composites* 27(3): 391-398.

EN 1992.01.01. 2004. Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα – Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια.

EN 1998.01. 2004. Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών – Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια.

Ersoy U, Tankut AT, Suleiman R. 1993. Behavior of Jacketed Columns. *ACI Structural Journal* 90(3): 288-293.

- FAGUS-5 Help, Ανάλυση Διατομών, Cubus Hellas Ltd, 2007.
- Fantilli AP, Vallini P. 2007. A Cohesive Interface Model for the Pullout of Inclined Steel Fibers in Cementitious Matrixes. *Journal of Advanced Concrete Technology* 5(2): 247-258.
- Farhat FA, Nicolaidis D, Kanellopoulos A, Karihaloo BL. 2007. High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) - Performance and application to retrofitting. *Engineering Fracture Mechanics* 74(1-2): 151-167.
- Georgiadi-Stefanidi K, Mistakidis E, Pantousa D, Zygomalas M. 2010. Numerical modelling of the pull-out of hooked steel fibres from high-strength cementitious matrix, supplemented by experimental results. *Construction and Building Materials* 24(12): 2489-2506.
- Gray RJ. 1983. Experimental techniques for measuring fibre/matrix interfacial bond shear strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 3(4): 197-202.
- Haddad RH, Shannag MJ, Hamad RJ. 2007. Repair of heat-damaged reinforced concrete T-beams using FRC jackets. *Magazine of Concrete Research* 59(3): 223-231.
- Hussain M, Sharif A, Basunbul IA, Baluch MH, Al-Sulaimani GJ. 1995. Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete beams Strengthened Externally by Steel Plates. *ACI Structural Journal* 92(1): 14-23.
- Ilki A, Akgun D, Goray O, Demir C, Kumbasar N. 2006. Retrofit of concrete members with externally bonded prefabricated SFRC jackets. In: Konsta-Gdoutos MS, editor. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, Springer, Netherlands, 625-632.
- Jones R, Swamy RN, Charif A. 1988. Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates. *The Structural Engineer* 66(5): 85-94.
- Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – Τελικό Εναρμονισμένο Κείμενο. Ο.Α.Σ.Π., Αθήνα, Φεβρουάριος 2011.
- Karypis G, Kumar V. 1995. METIS: Unstructured Graph Partitioning and Sparse Matrix Ordering System. Technical Report, Department of Computer Science, University of Minnesota.
- Khalifa A, Nanni A. 2002. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. *Construction and Building Materials* 16(3): 135-146.
- Krstulovic-Opara N, Al-Shannag MJ. 1999. Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)-Based Shear Retrofit of Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal* 96(1): 105-115.

Laranjeira F, Aguado A, Molins C. 2010a. Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers. *Materials and Structures* 43(6): 875-895.

Laranjeira F, Molins C, Aguado A. 2010b. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers. *Cement and Concrete Research* 40(10): 1471-1487.

Lee Y, Kang ST, Kim JK. 2010. Pullout behaviour of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials* 24(10): 2030-2041.

Leung CKY, Li VC. 1992. Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 40(6): 1333-1362.

Li CY, Mobasher B. 1998. Finite Element Simulations of Fiber Pullout Toughening in Fiber Reinforced Cement Based Composites. *Advanced Cement Based Materials* 7(3-4): 123-132.

Li VC, Wang Y, Backer S. 1990. Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites* 21(2): 132-140.

Markovich I, van Mier JGM, Walraven JC. 2001. Single fiber pullout from hybrid fiber reinforced concrete. *HERON* 46(3): 191-200.

Martinola G, Meda A, Plizzari GA, Rinaldi Z. 2010. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 32(9): 731-739.

Meda A, Plizzari GA, Rinaldi Z, Martinola G. 2009. Strengthening of R/C existing columns with high performance fiber reinforced concrete jacket. In: Alexander et al, editors. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, Taylor & Francis Group, London, 1263-1268.

Mobasher B, Li CY. 1995. Modeling of stiffness degradation of the interfacial zone during fiber debonding. *Composites Engineering* 5(10-11): 1349-1365).

Morton J, Groves GW. 1974. The cracking of composites consisting of discontinuous ductile fibres in a brittle matrix – effect of fibre orientation. *Journal of Materials Science* 9(9): 1436-1445.

MSC Software Corporation, MSC Marc, Volume A: Theory and user information, Version 2010.

MSC Software Corporation, MSC Marc, Volume B: Element library, Version 2010.

Murugappan K, Tan KH, Paramasivam P. 1994. Finite element formulation for the analysis of reinforced fibrous concrete beams. *Finite Elements in Analysis and Design* 18(1-3): 67-74.

Naaman AE. 2003. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology* 1(3): 241-252.

- Naaman AE, Najm H. 1991. Bond-Slip Mechanisms of Steel Fibers in Concrete. *ACI Materials Journal* 88(2): 135-145.
- Naaman AE, Namur GG, Alwan JM, Najm HS. 1991. Fiber Pullout and Bond Slip. I: Analytical Study. *ASCE Journal of Structural Engineering* 117(9): 2769-2790.
- Naaman AE, Namur G, Najm H, Alwan J. 1989. Bond mechanisms in fiber reinforced cement-based composites. Report UMCE 89-9. Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor.
- Naaman AE, Reinhardt HW, Fritz C. 1992. Reinforced Concrete Beams with a SIFCON Matrix. *ACI Structural Journal* 89(1): 79-88.
- Naaman AE, Reinhardt HW. 1996. Characterization of high performance fiber reinforced cement composites-HPFRCC. In: Naaman AE Reinhardt HW, editors. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC 2), Proceedings of the Second International RILEM Workshop*, E&FN Spon, London, 1-24.
- Nassif HH, Najm H. 2004. Experimental and analytical investigation of ferrocement-concrete composite beams. *Cement and Concrete Composites* 26(7): 787-796.
- Nethercot DA. 2002. The importance of combining experimental and numerical study in advancing structural engineering understanding. *Journal of Constructional Steel Research* 58(10): 1283-1296.
- Norris T, Saadatmanesh H, Ehsani MR. 1997. Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets. *ASCE Journal of Structural Engineering* 123(7): 903-911.
- Oluokun AF, Haghayeghi AR. 1998. Flexural Behavior of Reinforced Concrete beams Retrofitted or Repaired with Slurry Infiltrated Mat Concrete. *ACI Structural Journal* 95(6): 654-664.
- Ong KCG, Paramasivam P, Lim CTE. 1992. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using ferrocement laminates. *Journal of Ferrocement* 22(4): 331-342.
- Özcan DM, Bayraktar A, Şahin A, Haktanir T, Türker T. 2009. Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior. *Construction and Building Materials* 23(2): 1064-1077.
- Padmarajaiah SK, Ramaswamy A. 2002. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement. *Cement & Concrete Research* 24(2): 229-241.
- Papanikolaou VK, Kappos AJ. 2007. Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression. *International Journal of Solids and Structures* 44(21): 7021-7048.
- Παπαθεοχάρης Θ, Περδικάρης ΦΚ, Τζάρος Κ. 2008. Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς Δοκών Ινοπλισμένου Σκυροδέματος υπό Στατική Μονοτονική και Ανακυκλιζόμενη

Φόρτιση Κάμψης, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, Άρθρο 1969.

Παπαθεοχάρης Θ, Περδικάρης ΦΚ. 2009. Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς Συμβατικά Οπλισμένων Δοκών Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Μανδύες Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος. 16^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Κύπρος, Άρθρο 011200.

Paramasivam P, Lim CTE, Ong KCG. 1998. Strengthening of RC Beams with Ferrocement Laminates. *Cement and Concrete Composites* 20(1): 53-65.

Paramasivam P, Ong KCG, Lim CTE. 1994. Ferrocement Laminates for Strengthening RC T-Beams. *Cement and Concrete Composites* 16(2): 143-152.

Parra-Montesinos GJ. 2005. High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures. *ACI Structural Journal* 102(5): 668-675.

Purkiss JA, Blagojević P. 1993. Comparison between the short and long term behaviour of fibre reinforced and unreinforced concrete beams. *Composite Structures* 25(1-4): 45-49.

Purkiss JA, Wilson PJ, Blagojević P. 1997. Determination of the load-carrying capacity of steel fibre reinforced concrete beams. *Composite Structures* 38(1-4): 111-117.

Queiroz FD, Vellasco PCGS, Nethercot DA. 2007. Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection. *Journal of Constructional Steel Research* 63(4): 505-521.

Rabbat BG, Russell HG. 1985. Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout. *ASCE Journal of Structural Engineering* 111(3): 505-515.

Robins P, Austin S, Jones P. 2002. Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures* 35(7): 434-442.

Rodriguez M, Park R. 1994. Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns Strengthened by Jacketing. *ACI Structural Journal* 91(2): 150-159.

Rots JG. 1991. Smearred and discrete representations of localized fracture. *International Journal of Fracture* 51(1): 45-59.

Saadatmanesh H, Ehsani MR. 1991. RC Beams Strengthened with GFRP Plates I: Experimental Study. *ASCE Journal of Structural Engineering* 117(11): 3417-3433.

SAP2000 Manual, Computers and Structures, Inc. Berkley, California, USA, June 2008.

Seow PEC, Swaddiwudhipong S. 2005. Failure Surface for Concrete under Multiaxial Load – a Unified Approach. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 17(2): 219-228.

Shannag MJ, Alhassan MA. 2005. Seismic Upgrade of Interior Beam-Column Subassemblages with High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Jackets. *ACI Structural Journal* 102(1): 131-138.

- Shannag MJ, Brincker R, Hansen W. 1996. Interfacial (Fiber-Matrix) Properties of High-Strength Mortar (150 MPa) From Fiber Pullout. *ACI Materials Journal* 93(5): 1-7.
- Shannag MJ, Brincker R, Hansen W. 1997. Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites. *Cement and Concrete Research* 27(6): 925-936.
- STATIK-5 Help, Πρόγραμμα Στατικής και Δυναμικής Ανάλυσης Κτιρίων, Γεφυρών και Μεταλλικών Κατασκευών, Cubus Hellas Ltd, 2007.
- Sujivorakul C, Waas AM, Naaman AE. 2000. Pullout Response of a Smooth Fiber with an End Anchorage. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 126(9): 986-993.
- Swaddiwudhipong S, Seow PEC. 2006. Modelling of steel fiber-reinforced concrete under multi-axial loads. *Cement and Concrete Research* 36(7): 1354-1361.
- Swamy RN, Jones R, Bloxham JW. 1987. Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates. *The Structural Engineer* 65A(2): 59-68.
- Täljsten B, Elfgren L. 2000. Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods. *Composites Part B: engineering* 31(2): 87-96.
- Tan KH, Paramasivam P, Tan KC. 1994. Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal* 91(4): 384-392.
- Tan KH, Paramasivam P, Tan KC. 1995. Cracking Characteristics of Reinforced Steel Fiber Concrete Beams under Short- and Long-Term Loadings. *Advanced Cement Based Materials* 2(4): 127-137.
- Taylor M, Lydon FD, Barr BIG. 1997. Toughness Measurements on Steel Fibre-reinforced High Strength Concrete. *Cement & Concrete Composites* 19(4): 329-340.
- Triantafillou TC, Papanicolaou CG. 2006. Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures* 39(1): 93-103.
- Triantafillou TC, Plevris N. 1992. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures* 25(4): 201-211.
- Tsai JH, Patra A, Wetherhold R. 2005. Finite element simulation of shaped ductile fiber pullout using a mixed cohesive zone/friction interface model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36(6): 827-838.
- Vandoros KG, Dritsos SE. 2008. Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials* 22(3): 264-276.
- Ziraba YN, Baluch MH, Basunbul IA, Sharif AM, Azad AK, Al-Sulaimani GJ. 1994. Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete (RC) Beams with External Plates. *ACI Structural Journal* 91(6): 639-646.

University of Thessaly
Department of Civil Engineering
Laboratory of Structural Analysis and Design

**Numerical simulation of fibre reinforced cementitious
composites for structural applications
- Extended summary -**

Kyriaki Georgiadi-Stefanidi
Civil Engineer, M.Sc.

Submitted to
the Department of Civil Engineering
in Fulfillment of the Requirements
for the Doctoral Degree

Supervisor: Professor Euripidis Mistakidis

Volos 2012

University of Thessaly
Department of Civil Engineering
Laboratory of Structural Analysis and Design

**Numerical simulation of fibre reinforced cementitious
composites for structural applications
- Extended summary -**

Kyriaki Georgiadi-Stefanidi
Civil Engineer, M.Sc.

Submitted to
the Department of Civil Engineering
in Fulfillment of the Requirements
for the Doctoral Degree

Supervisor: Professor Euripidis Mistakidis

Examination Comitee:
Professor E. Mistakidis, Supervisor
Professor P. Perdikaris, Advisor
Professor K. Stylianidis, Advisor

Professor A. Kappos
Professor A. Triantafyllou
Associate Professor S. Karamanos,
Associate Professor E. Bousias

Volos 2012

CONTENTS

1	INTRODUCTION.....	219
2	NUMERICAL SIMULATION OF THE PULL-OUT OF A HOOKED STEEL FIBRE FROM THE CEMENTITIOUS MATRIX.....	223
3	NUMERICAL SIMULATION OF THE BENDING RESPONSE OF FRCM BEAMS.....	231
4	NUMERICAL SIMULATION OF THE BENDING RESPONSE OF RC BEAMS STRENGTHENED BY THIN FRCM JACKETS.....	239
5	EXAMPLE OF THE APPLICATION OF THE FRCM JACKETS FOR THE SEISMIC STRENGTHENING OF STRUCTURAL RC MEMBERS.....	245
6	CONCLUSIONS – INNOVATIVE POINTS.....	253

1 INTRODUCTION

Concrete is a material with low tensile strength and tends to crack under relatively low forces. The same holds, in general, for most kinds of cementitious products. It has been proved that the overall behaviour of concrete or other cementitious mixtures can be improved by the addition of fibres in the mix. Till now, a wide range of fibres has been used for the production of fibre-reinforced cementitious matrices, like steel, synthetic, glass, etc. The present study is limited to the use of steel fibres. The first steel fibres that were used were straight ones. Later, steel fibres of improved shape were introduced, such as crimped, waved and hooked ones. It has been proved by many researchers that their mechanically deformed shape leads to improved performance with respect to the straight ones, as far as the absorption of crack propagation energy is concerned.

Except for other common applications of the steel fibre-reinforced cementitious matrix (SFRCM), such as industrial floors and segments for tunnel linings, it can be used as a material for structural members or as a material for strengthening reinforced concrete (RC) members in the form of jackets. A great number of existing reinforced concrete structures are relatively old and were not built according to the current seismic design regulations. Therefore, it is possible that they lack sufficient longitudinal or transverse reinforcement and they do not meet the standards of modern codes. Moreover, especially in the case of old buildings, the structural materials may be of low quality or may exhibit degradation in their mechanical properties due to environmental factors or aging. Therefore, these structures may present weaknesses in ductility, strength and stiffness. Strengthening or retrofitting of this type of structural members can provide a solution against the aforementioned deficiencies and can be proved essential for avoiding damages and loss of life from earthquakes. The application of FRCM jackets is a technique for the strengthening of this kind of structures.

The use of the FRCM as a structural material arises the demand for reliability and satisfactory performance and therefore, it is important to understand the behaviour of the composite material and the mechanisms that affect it. Generally, the factors that affect the behaviour of the composite material are the strength of the cementitious matrix, the type and length of the fibre, the volumetric ratio of the fibres in the mixture, the bond between the fibre and the matrix, the strength of the fibres and their orientation in the mixture. The beneficial effect of the fibres becomes obvious after matrix cracking has occurred, as they tend to restrict the growth of cracks and undertake the tensile forces immediately after the exhaustion of the tensile strength of the cementitious matrix. As each crack continues to open, the fibres that are “bridging” the crack are being pulled-out from the cementitious matrix. Therefore, the post-cracking behaviour of a SFRCM is influenced by the behaviour and the effectiveness of the steel fibres in the mix. The effectiveness of a single fibre can be determined through the load-slip curve which is obtained by the pull-out test of the fibre from the cementitious matrix.

The objective of the present dissertation is the numerical simulation of the behaviour of a specific type of fibre-reinforced cementitious matrix (FRCM), which is consisted of a high-strength cementitious matrix in which hooked-end steel fibres are added with a volumetric content of 0.8%. The study is realized with the help of the Finite Element Method (FEM). In general, the target is the development of efficient and reliable numerical models for the simulation of each problem treated in the present study.

First, the behaviour of the composite material is studied through the pull-out test of a single hooked-end steel fibre from the high-strength cementitious matrix. A three-dimensional F.E. model is formulated for the simulation of the pull-out behaviour of the steel fibre, which can take effectively into account the various non-linearities which are present in the physical model. For the formulation of the model, the experimental results obtained by a series of pull-out tests of straight steel fibres from the cementitious matrix are utilized. Then the results obtained by the simulation model of the pull-out of the hooked-end steel fibre are compared to the respective experimental ones. The three-dimensional numerical model is also used for the simulation of the pull-out behaviour of inclined fibres, as well as of fibres with different geometries. Finally, a simpler two-dimensional numerical model is proposed, that is able to reproduce in a rather accurate manner the overall behaviour of the fibre-matrix system, just like its more accurate three-dimensional counterpart, having at the same time the big advantage of the low computational cost.

Then, the bending tests of different types of FRCM beams are numerically simulated. More specifically, the bending behaviour of a FRCM without conventional reinforcement and a similar one with longitudinal and transverse reinforcement is numerically investigated. For comparison reasons a conventional RC beam is also numerically simulated. A new method for the numerical simulation of the composite material is proposed, according to which, the contribution of the FRCM is taken into account by means of two different layers of finite elements. The first one represents the cementitious matrix while the second one accounts for the contribution of the steel fibres in a homogenized manner. The validity of the proposed methodology is established by comparing the numerical results with the corresponding experimental ones. Moreover, the proposed simulation models are able to follow the nonlinearities that appear in the respective physical models. After its validation, the proposed simulation technique is used for the formulation of the more complicated numerical models of RC beams strengthened by relatively thin FRCM jackets. The study covers the cases of RC beams with or without stirrups, strengthened by FRCM jackets reinforced with longitudinal and transverse reinforcement or with structural wire mesh. The strengthened RC beams to be modelled were first tested under static monotonic and static fully reversing cyclic loading. Once again, the numerical results are compared to the respective experimental ones, for the verification of the simulation method.

Finally, a technique is proposed for the efficient simulation of the under study FRCM in common structural analysis programs. The proposed methodology is then applied in an example where the structural members of an existing RC building are strengthened by the FRCM jackets and some practical solutions are given for the problem of consideration of the load-carrying capacity reduction of the strengthened member, due to the loss of the contribution of the fibres.

2 NUMERICAL SIMULATION OF THE PULL-OUT OF A HOOKED STEEL FIBRE FROM THE CEMENTITIOUS MATRIX

The aim is the formulation of an accurate three-dimensional F.E. model for the simulation of the pull-out behaviour of the hooked steel fibre, that will be able to take effectively into account the various non-linearities which are present in the physical model, such as the non-linear bonding between the fibre and the matrix in the early stages of the loading, the unilateral contact between the fibre and the matrix, the friction at the contact areas, the plastification of the steel fibre, the plastification or crushing in compression and the cracking in tension of the cementitious matrix.

In order to support the numerical simulation procedure, two series of tests were carried out involving the pull-out of a single fibre from the high-strength cementitious matrix. In the first series of tests the steel fibres were the steel hooked-end fibres under study (Fig.1), while in the second series the fibres were straight ones. These straight fibres were obtained after removing the original fibre's hooked ends. The pull-out tests were carried out by Associate Professor M. Zygomalas at the Laboratory of Experimental Strength of Materials and Structures of the Dep. of Civil Engineering at the Aristotle University of Thessaloniki.

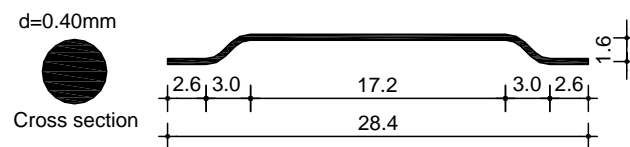


Fig. 1: Dimensions of the steel fibres used (in mm).

The geometry of the model is shown in Fig. 2. The symmetries that exist in the physical model are utilized in order to limit the size of the numerical problem. Therefore, only the one quarter of the original model is considered (using the appropriate boundary conditions), in which a part of the stainless steel fibre is embedded in the cementitious matrix. It is assumed that the crack is formed in a direction perpendicular to the axis of the steel fibre and therefore that the force is applied axially on it. For the cementitious matrix, a cylindrical volume is considered, with diameter large enough so that it can be assumed that the value of this diameter does not influence the results of the analysis. Here, this diameter is taken equal to 7.6 mm.

Due to the specific geometry and the existence of the various already mentioned non-linearities, three-dimensional modelling is used. Both the cementitious matrix and the steel fibre are simulated as two deformable bodies, by 10-node tetrahedral finite elements, as shown in Fig. 3. The much denser discretization of the fibre is necessary in order to simulate accurately the bending behaviour that dominates the pull-out process, as well as to reproduce in detail the elaborate geometry of the fibre.

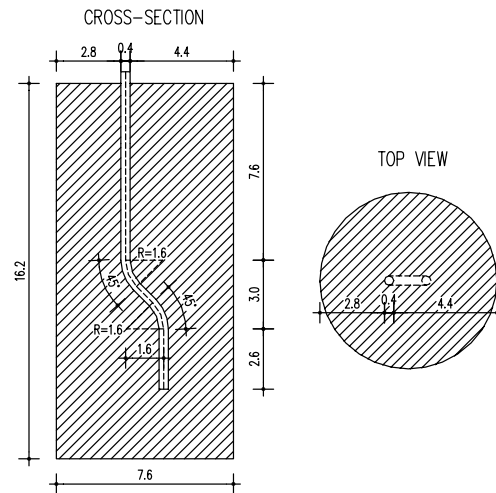


Fig. 2: The considered fibre pull-out problem (dimensions are in mm).

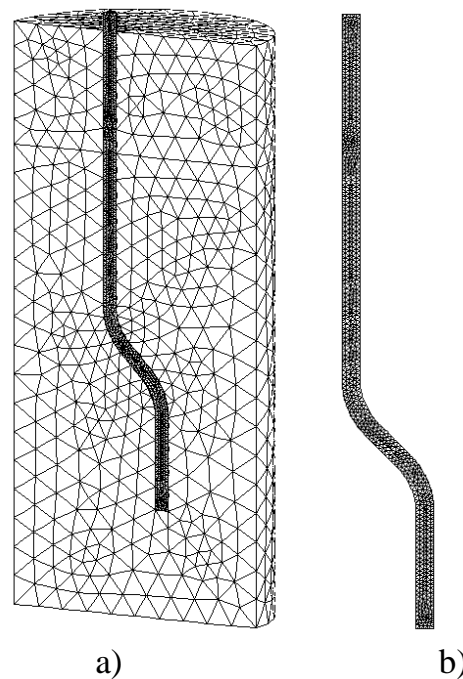


Fig. 3: a) The three-dimensional F.E. mesh of the considered problem. b) Detail of the F.E. mesh of the steel fibre.

The compressive strength of the cementitious matrix is 100 MPa, while the tensile strength is 8 MPa. The stress-strain relationship assumed for the matrix exhibits elastoplastic behaviour for compression and a cracking behaviour in tension. The loss of the tensile strength after cracking is modelled through a softening branch having a slope of 10 GPa. As far as the behaviour of the matrix in compression is concerned, two different cases are considered, according to the confinement conditions. In the lower part of the matrix, the plastification or cracking is limited in an area very close to the fibre, mainly due to the interaction between the matrix and the fibre during the pull-out. This region is considered

to be confined by the rest of the volume of the cementitious matrix. On the other hand, in the upper part of the matrix, damage is expected mainly in the area of the exit point of the fibre, where possible spalling of the matrix can occur. This region is considered as unconfined and therefore, the compressive strength of the matrix is almost zeroed for a strain larger than 0.005. The elasticity modulus of the matrix is 35.5 GPa and the Poisson's ratio is taken equal to 0.2. The stainless steel fibre has a yield stress equal to 1400 MPa, the elasticity modulus is taken equal to 210 GPa and the Poisson's ratio equal to 0.3. The stress-strain relationship that is used for the fibre exhibits elastoplastic behaviour.

During a pull-out test, the load is being transferred through the fibre-matrix interface, first by the bond shear stresses and afterwards by the frictional stresses. Therefore, two different mechanisms must be taken into account.

Here, the bonding mechanism is taken into account by introducing interfacial elements. These elements are actually springs, acting only in the tangential to the interface direction, which are equipped with a non-linear law. The first node of each spring is connected to the fibre. Due to the fact that the discretization densities are not similar for the fibre and for the matrix, the second node of the spring is attached to the closest matrix node, as shown in Fig. 4. The nonlinear behaviour of these elements is estimated after the pull-out tests of straight fibres from the cementitious matrix, as in the case of straight fibres the bond between the two materials is dominant. Fig. 4 gives also, the average experimental pull-out curve obtained by these tests. The horizontal axis of the diagram gives the relative interface displacements, while the vertical axis gives the value of the developed bonding stress. This experimental diagram is approximated by a piecewise linear curve defined by the characteristic values τ_{lin} , τ_{max} and d_u . The pull-out behaviour is more or less linear until the bonding stress reaches the value τ_{lin} . After this value, a significant stiffness reduction is observed, until the value τ_{max} is achieved. For a certain displacement range this value remains constant and after a characteristic displacement value d_u is achieved, the resistance is zeroed. The interfacial elements are assumed to follow this piecewise linear law.

The second mechanism that has to be simulated is the friction one. The pull-out behaviour of a hooked-end fibre is dominated by the mechanical interlock and the plastification of the hooked end. Because of this mechanical interlock, normal forces develop on the fibre-matrix interface during the pull-out process, resulting to the appearance of the friction mechanism in the contact areas. The contact and friction forces are taken into account by introducing unilateral contact and friction conditions between the fibre-matrix interface. For the friction, a simplified Coulomb model is taken into account.

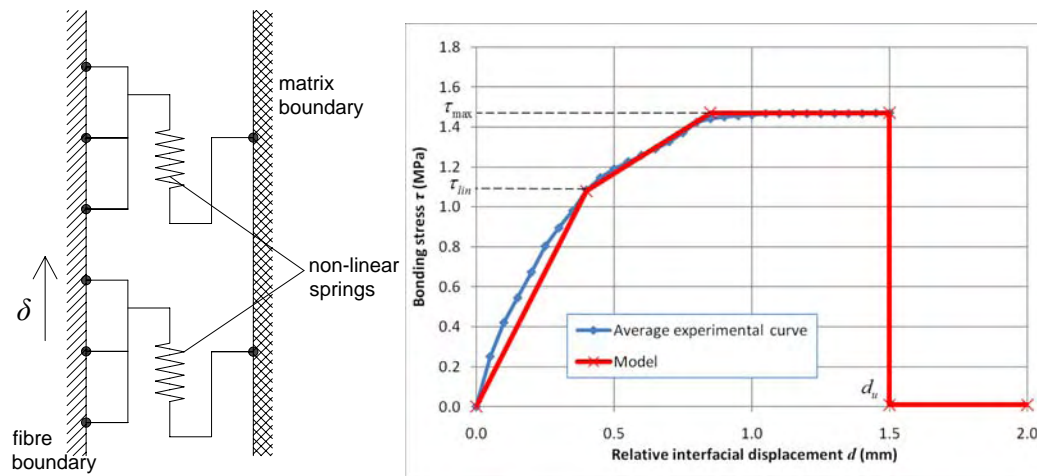


Fig. 4: Schematic presentation of the function of the interfacial elements between the steel fibre and the cementitious matrix and the piecewise linear law adopted for the interfacial elements.

The solution to the above problem is obtained by using the software code MSC-MARC. A Newton-Raphson iterative procedure is applied in order to handle the nonlinearities of the problem. The load is applied in the form of displacement δ , at the top end of the steel fibre. The resulting force P at the point of the applied displacement is monitored. A total displacement of 8 mm is introduced in a series of 400 increments. A relative convergence criterion is adopted, based on the residual forces. The relative forces tolerance is set to 0.01.

Concerning the friction coefficient between the steel fibre and the cementitious matrix, it is decided to perform a parametric analysis considering different values for the friction coefficient in the range between $\mu=0$ and $\mu=0.2$ and to compare the obtained results with the respective experimental ones. The load-displacement ($P - \delta$) diagrams that result from the parametric analysis, together with the average experimental curve are presented in Fig. 5. The average strength value of the experimental results (about 81 N) is well approximated by a friction coefficient of the order of $\mu=0.12$.

The plastic strain fields obtained by the numerical model showed that local plastifications appear in various locations of the hooked end of the fibre, as a result of its tendency to change shape and be pulled-out of the matrix. As the displacement increases, the fibre progressively bends and straightens, until the material of the steel fibre is almost completely plastified in the area between the two bended parts of the hook. Eventually, the fibre slips out of the matrix, not being able to attain its full strength. The cracking or plastification of the cementitious matrix is limited in a narrow region, very close to the hooked end of the fibre and is a result of the interaction between the two bodies. The above verify that the bending of the fibre and its behaviour during the pull-out process plays the most important role in the pull-out response of the fibre-matrix system.

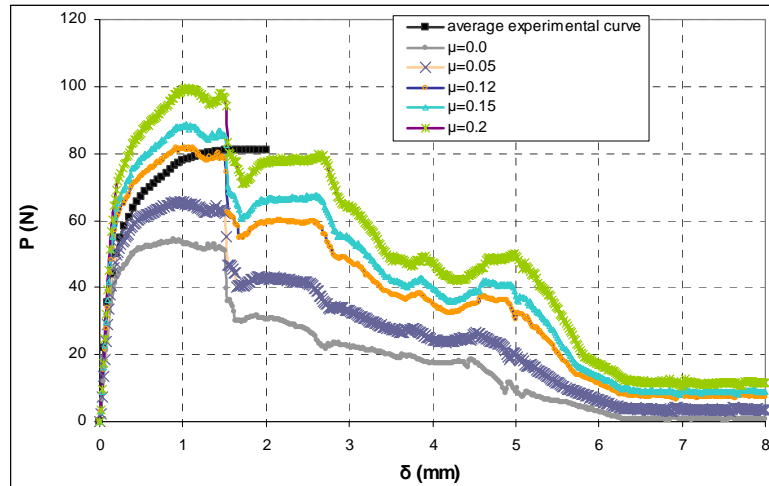


Fig. 5: Comparison of the load-displacement diagrams obtained by the three-dimensional model for various values of the friction coefficient, with the average experimental curve.

In the sequel, the three-dimensional numerical model is used for the investigation of the effect of different fibre geometries to the overall pull-out behaviour. Three different fibre geometries are analyzed. The fibres of type A are the original hooked-end fibres already studied. The fibres of type B are similar to the fibres of type A. The difference between the two types is solely the length of the straight part between the two bended ones, which in the case of type B fibres is doubled with respect to type A fibres. The fibres of type C have only one bended part. The three different fibre geometries are depicted in Fig. 6.

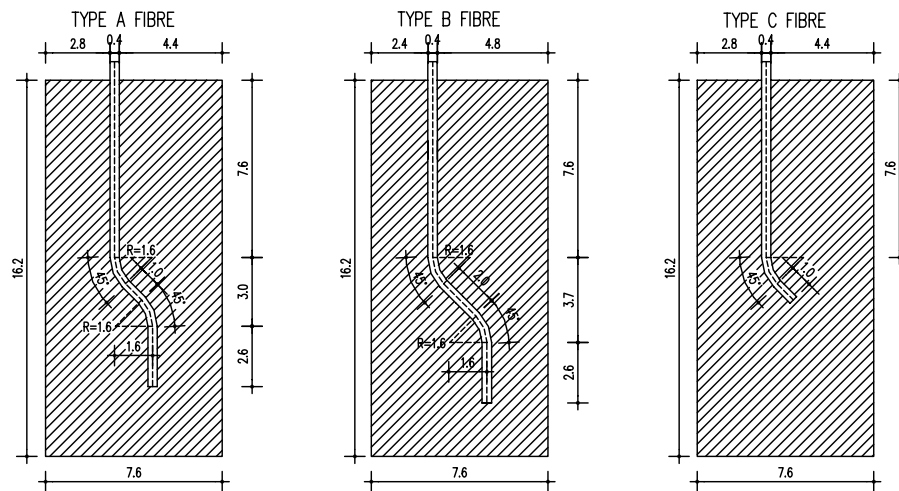


Fig. 6: The three types of fibres considered (dimensions in mm).

The results obtained for the three fibre types for friction coefficient $\mu=0.12$ are given in Fig. 7. It can be noticed that the maximum attained pull-out force value is slightly larger for the case of the type B fibres. Apart from this difference, the shapes of the $P-\delta$ curves are similar for the type A and B fibres. Of course, due to the increased length of type B fibres, the zeroing of the resistance comes for a displacement value that is 1 mm greater compared to the corresponding displacement of the type A fibres. This result is absolutely

compatible with the fact that the length of the straight part of the type B fibre is 1 mm greater. Type C fibres exhibit a significantly reduced resistance, due to the existence of a single bended part. These fibres lose almost completely their resistance after the exhaustion of the bonding strength. Concluding, it can be said that the doubly bended shape of the type A and B fibres leads to significantly improved performance with respect to the type C fibres which exhibit a singly bended shape.

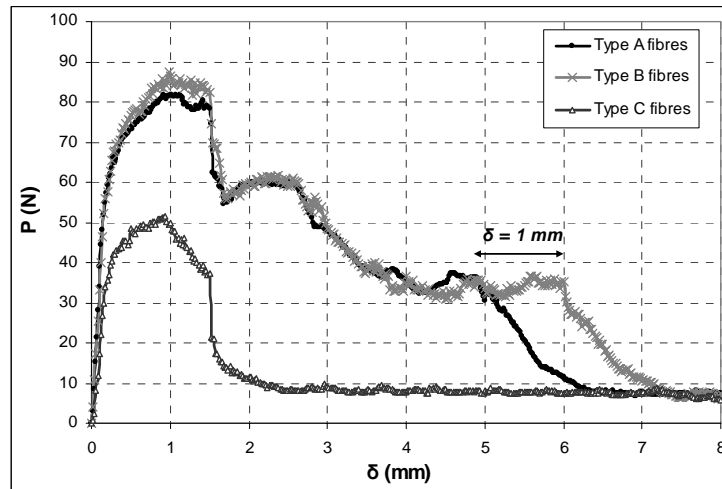


Fig. 7: Load-displacement curves for the three types of fibres.

The three-dimensional model already described, although accurate, has a high computational cost. Therefore, there is a need for simple models that will be able to capture in a rather accurate manner, at least the overall behaviour of the problem at hand. Working towards this direction, a two-dimensional model is developed that should be able to give results similar to its three-dimensional counterpart. The developed two-dimensional model is based on a plane strain finite element formulation. The discretization is realized by using 4-node quadrilateral plane strain elements for the matrix and the steel fibre. In such a model the interacting elements are described by regions having different thicknesses. The elements representing the cementitious matrix are assigned a thickness equal to 7.6 mm, which is the diameter of the cylindrical volume of the matrix in the three-dimensional model. As it was observed in the three-dimensional model, the behaviour of the problem was determined by the shape and the properties of the steel fibre. Therefore, the two-dimensional idealization of the steel fibre has to be as accurate as possible. In order to capture the bending behaviour of the steel fibre, it is discretized by 10 parallel columns of elements. Each one of these columns is assigned a different thickness on the basis of a geometric approximation of the circular shape of the steel fibre. The interaction between the fibre and the matrix is taken into account by considering unilateral contact and friction conditions between the F.E. of the steel fibre and the elements of the cementitious matrix. Moreover, between the two meshes interfacial elements are introduced, in a manner similar to the one used in the case of the three-dimensional model, in order to simulate the bonding between the fibre and the matrix. The friction coefficient is taken equal to 0.12. For the fibre material, elasto-plastic behaviour is considered, as in the case

of the three-dimensional modelling. However, for simplification reasons, a linear elastic material law is used for the cementitious matrix.

Fig. 8 gives the comparison between the load-displacement curves obtained by the two-dimensional and the three-dimensional model. It can be verified that the results obtained by the simplified two-dimensional model are rather close to the ones obtained by the three-dimensional one. Notice that the maximum computed strength is greater in the case of the two-dimensional model. This can be attributed mainly to the fact that linear elastic material behaviour is considered for the cementitious matrix in the two-dimensional model and, therefore, the plastification and cracking of the matrix are not taken into account.

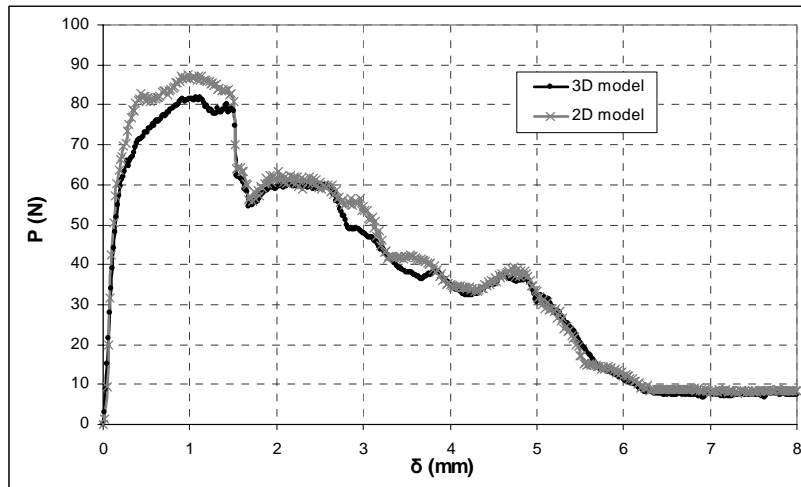


Fig. 8: Comparison of the results obtained by the 2D and 3D numerical models.

As it is known for FRCM, fibres are randomly distributed in the mixture and have also a random orientation. The pull-out behaviour of the fibres that are oriented perpendicularly or almost perpendicularly to a formed crack is dominated by the debonding of the fibre-matrix interface, the friction mechanism and the plastification of the hook due to bending, as it has been already described. However, the fibres which are not oriented perpendicularly or almost perpendicularly to the formed crack, exhibit a more complex behaviour due to additional friction mechanisms, the bending of the fibres at the crack surface and the possible spalling of the matrix. Therefore, fibres with different inclination angles with respect to the cracking plane and for a given crack width can result to different pull-out behaviour. For this reason, the proposed three-dimensional model, appropriately modified, is used to investigate the pull-out behaviour of the hooked fibres with different inclination angles, namely 15°, 30°, 45° and 60°. The geometry of the studied cases is depicted in Fig. 9.

The results obtained by the numerical models simulating the pull-out test of an aligned fibre and of inclined fibres with inclination angles of 15°, 30°, 45° and 60°, are presented in Fig. 10. After comparing the results, it is noticed that the stiffness of the model with 15° inclination angle is increased with respect to the stiffness of the model of the aligned fibre,

but for higher inclination angles the stiffness is decreased significantly. Moreover, it is observed that for inclination angles up to 15°, the values of the pull-out load show an increase of the order of 15% with respect to the ones obtained for an aligned fibre. However, although the inclination angle further increases, the value of the maximum pull-out load remains about the same, as it is seen for the inclination angles of 30°, 45° and 60°. The above, result from the interaction of the additional mechanisms which are present in the problem of the pull-out of inclined fibres, such as the spalling of the matrix near the exit point of the fibre, the bending of the fibre and the additional friction forces at the same area. The three-dimensional model manages to reproduce all the aforementioned mechanisms.

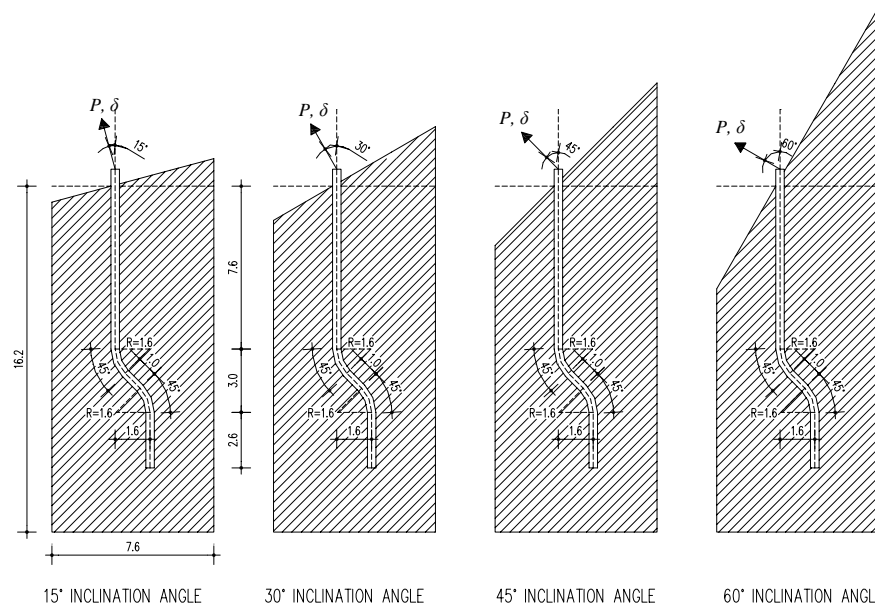


Fig. 9: The considered problem of the pull-out of inclined fibres (dimensions in mm).

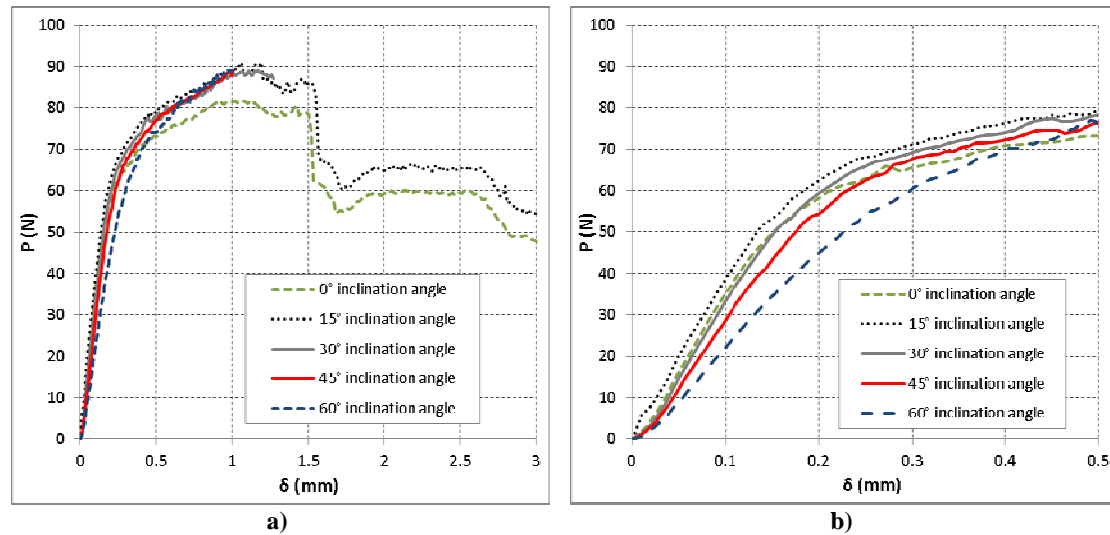


Fig. 10: a) Comparison of the P - δ diagrams obtained by the 3D model for various values of the inclination angle of the fibre, b) detail of previous diagram for small values of the displacement.

3 NUMERICAL SIMULATION OF THE BENDING RESPONSE OF FRCM BEAMS

The aim here is the efficient numerical simulation of the bending behaviour of tested FRCM beams. For the production of the FRCM specimens, a high-strength cementitious matrix with hooked-end steel fibres is used. Two types of FRCM beams are considered. The first type has no conventional steel reinforcement (Type B) while the second one includes longitudinal and transverse steel reinforcement (Type C). For comparison reasons, conventional reinforced concrete (RC) beams (Type A) are also studied. The beams are tested under static monotonic and cyclic loading. All the tests were conducted under the supervision of Professor. P. Perdikaris at the Laboratory of Concrete Technology and Reinforced Concrete Structures of the Dep. of Civil Engineering of the University of Thessaly. The geometric characteristics and the cross-sections of the three types of studied beams are depicted in Fig. 11.

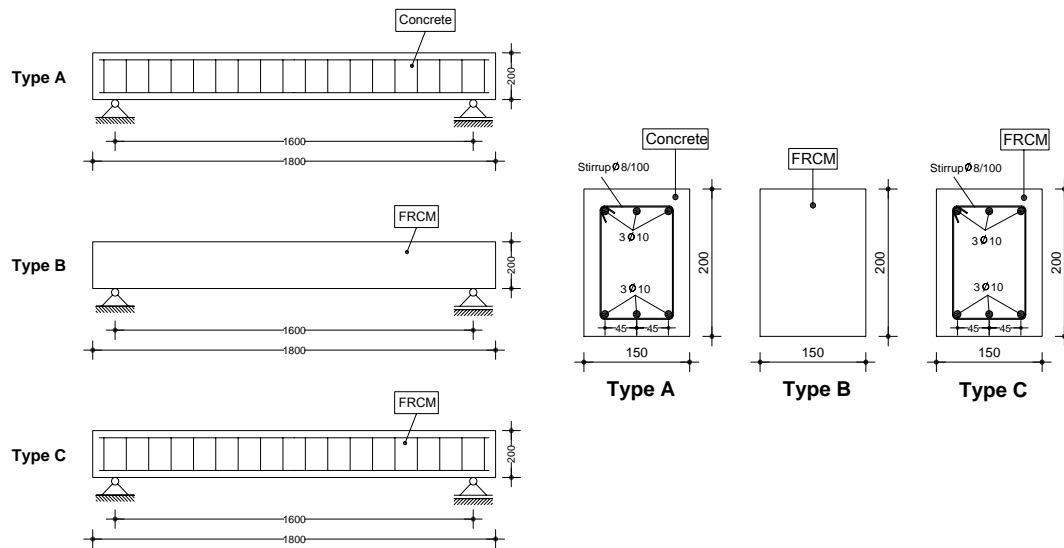


Fig. 11: Geometric characteristics and cross-sections of the Type A, B and C specimens (dimensions in mm).

The response of the tested beams is simulated by means of effective two-dimensional finite element models. For the FRCM, a component-like method is followed. The response of the FRCM is modelled by adding the behaviour of its two components, the steel fibres and the cementitious matrix. The contribution of the cementitious matrix is taken into account by the means of a specific layer of 4-node quadrilateral plane-stress isoparametric finite elements, which are assigned the mechanical and geometric characteristics of the cementitious matrix. The contribution of the steel fibres is taken into account through another layer of plane-stress isoparametric finite elements, which are connected at exactly the same positions with the previous layer of elements, so that the elements representing the steel fibres and those representing the cementitious matrix have common nodes and thus, common displacements, as shown in Fig. 12. In this new layer of finite elements, the

contribution of the fibres is taken into account in a homogenized way, through an equivalent thickness t_f , which is obtained by the following relation:

$$t_f = t_c \times a_f \times v_f, \quad (1)$$

where t_c is the thickness of the cementitious matrix elements, $v_f = 0.8\%$ is the volumetric ratio of the fibres in the mixture and $a_f = 0.5$ is a factor that takes into account the orientation of the fibres in the matrix.

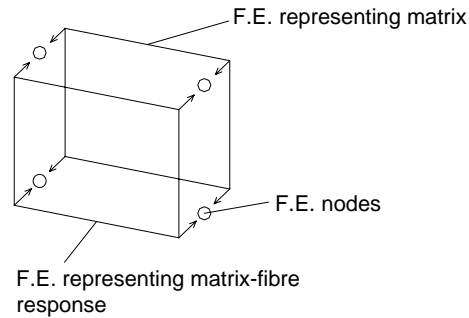


Fig. 12: Coupling of the two F.E. representing the FRCM at the same nodes.

The stress-strain relationship considered for the cementitious matrix exhibits elastoplastic behaviour for compressive loading and a cracking behaviour for tensile loading. The loss of tensile strength of the matrix after cracking is modelled through a softening branch having a slope equal to 10 GPa. Two different cases are considered for the behaviour of the FRCM in compression, according to the confinement conditions. For the confined regions the compressive strength of the matrix is considered constant, while for the unconfined regions the compressive strength is almost zeroed for a strain larger than 0.005. The compressive strength of the matrix is 80 MPa and the flexural tensile strength is 8 MPa. The modulus of elasticity is assumed equal to 35.5 GPa and the Poisson's ratio $\nu=0.2$. The stress-strain relationship considered for the elements representing the steel fibres is shown in Fig. 13. Actually, this relationship also represents the gradual pull-out of the steel fibres from the cementitious matrix through the softening branch between the strain values ε_1 and ε_2 . For the determination of the values of the characteristic strains ε_1 and ε_2 , the experimental results of the monotonic 4-point bending tests of the Type C beam were used, together with the numerical results of a parametric analysis concerning the corresponding values. For the steel fibres an equivalent yield stress $f_y^F = 950$ MPa was determined based on the experimental results of the monotonic 3- and 4-point bending tests of the Type B beam specimens. The elasticity modulus of the steel fibres is taken equal to 210 GPa and the Poisson's ratio $\nu=0.3$. The stress-strain relationship considered for concrete exhibits elastoplastic behaviour for compressive loading and a cracking behaviour for tensile loading. The compressive strength of concrete is 30 MPa, the flexural tensile strength is 3.3 MPa, the elasticity modulus is taken equal to 32 GPa and the Poisson's ratio $\nu=0.16$. The stress-strain relationship considered for the steel rebars of Type A and Type C beams exhibits elastoplastic behaviour with a yield stress of 550 MPa. The elasticity modulus is taken equal to 210 GPa and the Poisson's ratio $\nu=0.3$.

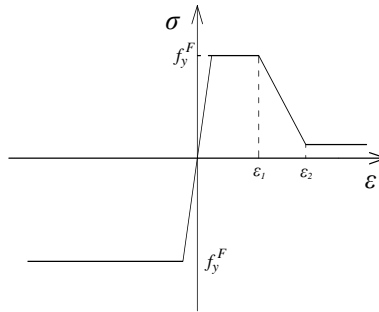


Fig. 13: The stress-strain relationship considered for the steel fibres.

The solution to the above problem is obtained by using the software code MSC-MARC. A Newton-Raphson iterative procedure is applied in order to handle the nonlinearities of the problem. The load is applied in the form of displacement δ , and the resulting force P at the point of the applied displacement is monitored. A relative convergence criterion is adopted, based on the residual forces. The relative forces tolerance is set to 0.01.

Generally, a three-dimensional model is expected to be more realistic and reliable due to the nature of its finite elements which can effectively reproduce bending and the correct stress and strain distributions. On the other hand, a three-dimensional model has the important disadvantage of its high computational cost and the excessive time required for the evaluation of the great volume of results yielded by it. Therefore, there is a need for simple models that will be able to capture, in a rather accurate manner, at least the overall behaviour of the problem at hand. In order to obtain the required experience and verify the effectiveness of the proposed simulation methods, a quite simple numerical model had to be initially formulated and tested. For this reason, the response of a conventional RC beam (Type A) under static monotonic three-point bending is first studied. For this purpose, a detailed three-dimensional model is created. Because of the symmetric loading and support conditions, half of the beam specimen is modelled and appropriate symmetry conditions are applied in order to reduce the computational time of the numerical analysis. For the three-dimensional simulation of the concrete, an eight-node isoparametric hexahedral element is used. The longitudinal and transverse reinforcement is modelled using three-dimensional straight truss elements. Then, a two-dimensional numerical model is produced. For the two-dimensional simulation of the concrete, plane-stress isoparametric finite elements are used. The thickness of these elements is taken equal to the width of the cross-section of the beam, i.e. 150 mm. The finite elements representing the longitudinal and transverse steel rebars are two-node constant cross-section beam elements. They are connected at the same grid of nodes to which the plane-stress elements are attached. The cross-sectional area of these elements is taken equal to the total area of the corresponding longitudinal and transverse rebars. After comparing the curves obtained by the two numerical models, together with the respective experimental one, it can be said that the simpler two-dimensional model can capture in an accurate manner the overall behaviour of the tested beam and can lead to reliable results, just like the more realistic three-dimensional one. Moreover, the cracking pattern developed in the test appears to be very

similar to that obtained by the two-dimensional analysis. Then, the two-dimensional numerical model of the Type A beam subjected to static cyclic 4-point bending is formulated. The comparison of the numerical results with the corresponding experimental ones shows that there is a very good agreement between them, proving that the chosen simulation technique performs well, also for the prediction of the response under static cyclic loading.

In the sequel, the two-dimensional numerical models of the Type B beam under static monotonic and static one-direction cyclic 4-point bending are formulated, based on the proposed new technique for the numerical simulation of the FRCM. Fig. 14 shows the different sets of elements that the simulation model is consisted of, which are overlapped and connected at the same grid of nodes. Figs. 15 and 16 show the comparison between the numerical and the respective experimental results for the two cases of loading. It can be noticed that in general, there is a good agreement between the numerical and the experimental results, as far as the stiffness of the system, the maximum value of the load the beam can undertake, the value of the displacement for which the contribution of the steel fibres is lost and the overall behaviour of the specimen is concerned. Therefore, through this comparison, the reliability and effectiveness of the proposed simulation technique for the FRCM are verified.

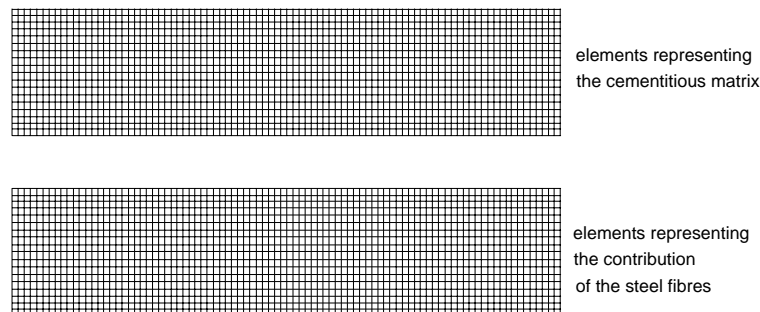


Fig. 14: The overlapping layers of F.E. of which the 2D model of the Type B beam is consisted.

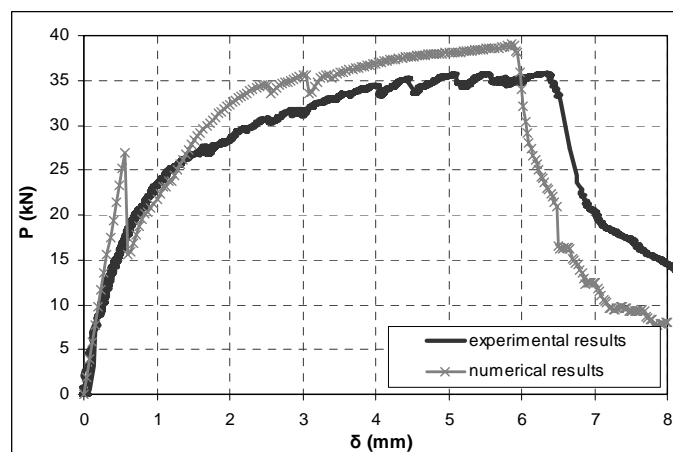


Fig. 15: Comparison of the numerical and experimental results of the FRCM beam with no conventional reinforcement (Type B) under static monotonic 4-point bending.

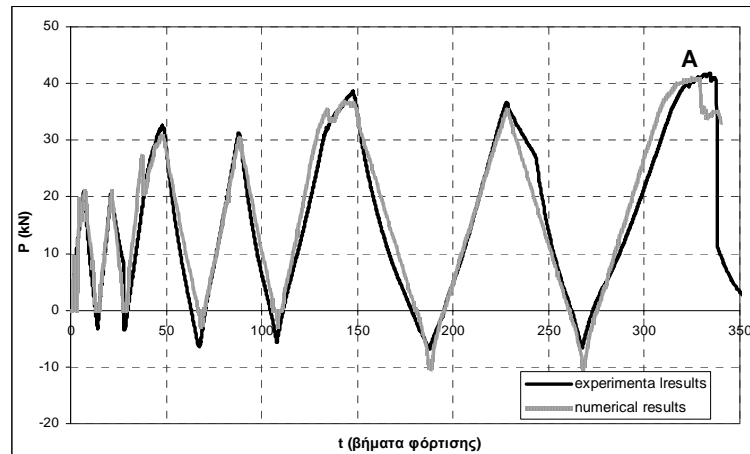


Fig. 16: Comparison of the numerical and experimental results of the FRCM beam with no conventional reinforcement (Type B) under static cyclic 4-point bending.

The formulation of the numerical model of the Type C beams is based on the same simulation method that was followed for the Type A and Type B beams. Fig. 17 shows the different sets of elements that the simulation model is consisted of, which are overlapped and connected at the same grid of nodes. The first specimen is subjected to static monotonic 4-point bending and the experimental and numerical results are presented in Fig. 18. It can be verified that the results obtained by the numerical two-dimensional model are very close to the experimental ones. Very early, a sudden loss of load appears in the diagram of the numerical results (point A), corresponding to the exhaustion of the tensile strength of the matrix and the appearance of the first cracks. Point B corresponds to the yielding of the reinforcement steel. After that point, the overall load-carrying capacity of the beam continues to increase slightly, until the maximum strength of the beam is attained (point C). Then, the steel fibres fail by being pulled-out from the matrix. This is indicated by the abrupt descending branches in the curves of Fig. 18. After the loss of the contribution of the steel fibres, the load is undertaken by the longitudinal steel reinforcement. Finally, the longitudinal reinforcement reaches its ultimate tensile capacity, leading to the collapse of the specimen. Once more, it is verified by the comparison of the numerical and the experimental curves, that the proposed simulation procedure is able to predict rather well the characteristics of the studied problem. It is noticed that instead of the single vertical branch appearing in the experimental curve at point C, three smaller vertical branches appear in the numerical curve. However, these vertical branches exhibit, in total, the same loss of strength as the single one in the experimental curve. The three abrupt softening branches result from the failure of the fibres and the damage of the cementitious matrix. A second similar FRCM beam is then subjected to fully reversing cyclic 4-point bending. Once more, a rather good agreement between the results is noticed in Fig. 19, where the numerical and experimental results are compared.

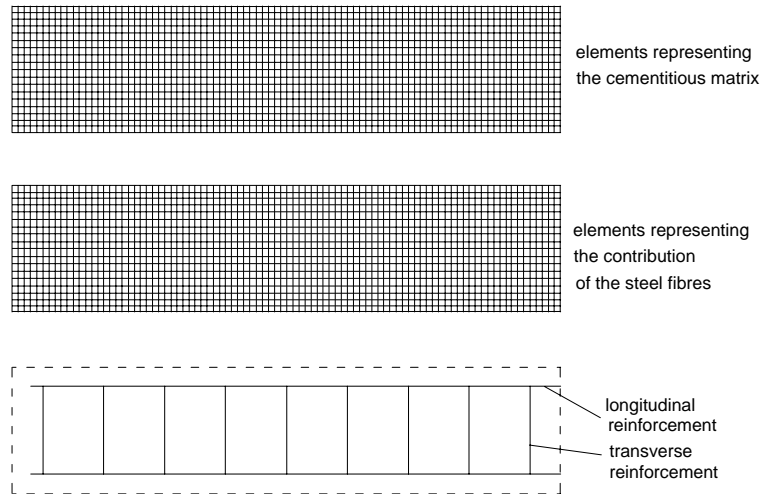


Fig. 17: The overlapping layers of F.E. of which the 2D model of the Type C beam is consisted.

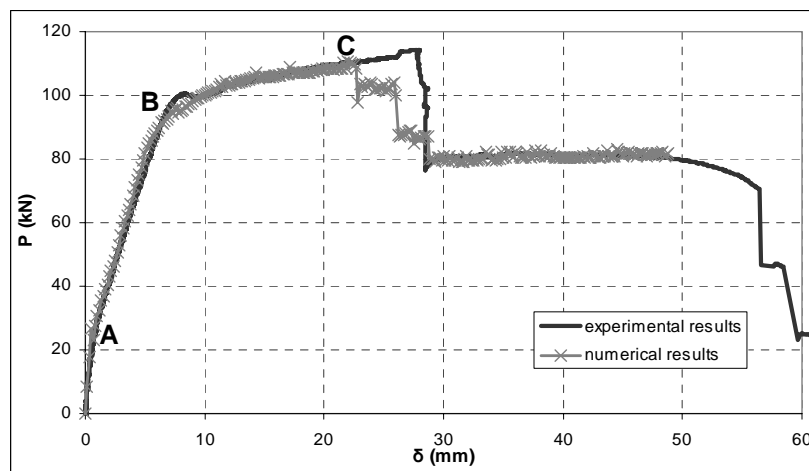


Fig. 18: Comparison of the numerical and experimental results of the FRCM beam with conventional reinforcement (Type C) under static monotonic 4-point bending.

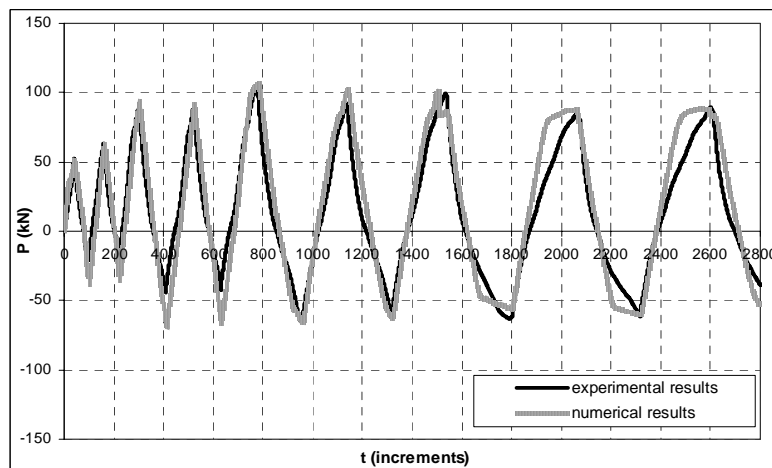


Fig. 19: Comparison of the numerical and experimental results of the FRCM beam with conventional reinforcement (Type C) under static cyclic 4-point bending.

The numerical results obtained for the three types of beams under monotonic loading, in terms of bending moment and applied vertical displacement, are shown in Fig. 20. It is noticed that the FRCM beam without conventional steel reinforcement (Type B) shows a load-carrying capacity which is nearly half of that corresponding to the conventional RC beam (Type A). The failure of the FRCM beams occurs obviously for smaller load and displacement values than the ones corresponding to the conventional RC beam because the main crack opens and evolves quickly. Of course, the failure in this case comes without the definite yielded plateau present in the case of conventional RC beams. However, the behaviour of those beams should not be considered as brittle, due to the rather high value of the ultimate to “yield” displacement ratio (of the order of 12). On the other hand, the use of a high-strength cementitious matrix with hooked-end steel fibers and longitudinal and transverse reinforcement (Type C beams), results in increased strength and stiffness with respect to the conventional RC beam, maintaining at the same time the overall deformation capacity. This strength increase is of the order of 50% for the studied specimens. The contribution of fibres in the behaviour of the beam is evident and is sustained for rather high deflection values. When the strain values become quite large and the steel fibres fail, the strength of the beam approaches that of the corresponding RC beam, due to the fact that the tensile stresses are undertaken solely by the longitudinal reinforcement. Therefore, it is evident that the addition of longitudinal reinforcement leads to significant improvement of the deformation capacity (with respect to the Type B FRCM beams) and to increased energy dissipation. In the studied case, the additional dissipation attributed to the addition of the steel fibres equals to the hatched area depicted in Fig. 20.

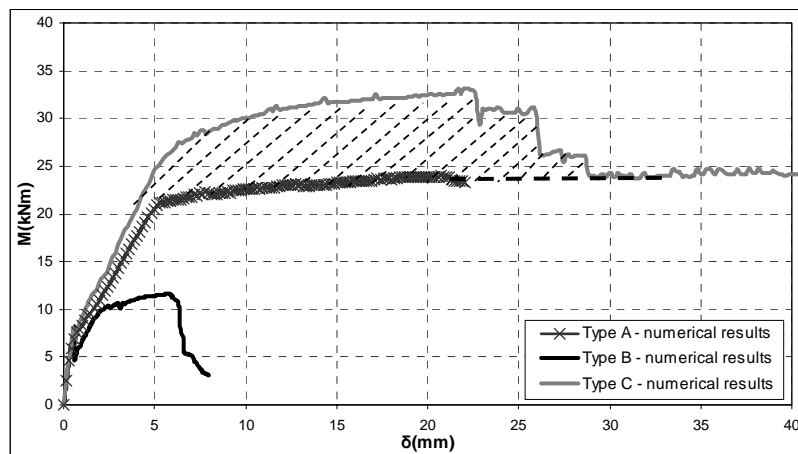


Fig. 20: Applied bending moment vs. displacement curves predicted by the numerical modelling for all beam specimens.

It can be concluded that for all the beams studied, the comparison of the numerical results to the experimental findings shows good agreement for the load-displacement curves. This result holds for both the static monotonic and cyclic loading. Also, the crack formation patterns predicted by the finite element analysis appear to be similar to those obtained experimentally. It is therefore concluded that the proposed finite element models simulate rather accurately the failure mechanisms of the different types of beam specimens studied.

4 NUMERICAL SIMULATION OF THE BENDING RESPONSE OF RC BEAMS STRENGTHENED BY THIN FRCM JACKETS

The target here is the efficient numerical simulation of the bending behaviour of conventional RC beams strengthened by relatively thin cast-in-place FRCM jackets. The geometric characteristics of the strengthened beam specimens are shown in Fig. 21. The cross-sectional dimensions of the conventional RC beam members are 150×200 mm, which, after applying a 35 mm thick FRCM jacket, become 220×270 mm for the strengthened member. The beam specimens are simply supported with a span of 1600 mm.

For the strengthened RC member, two different cases were considered; beams with longitudinal steel reinforcement and closely spaced stirrups and beams with longitudinal reinforcement and no transverse reinforcement. It should be noted here that the decision to consider the strengthened beam member without shear reinforcement, is due to the fact that existing older RC structures usually have very low transverse steel reinforcement ratios. It is characteristic that in the case of RC structures that have collapsed due to various earthquakes in Greece during the last years, structural members were found to be very poorly reinforced with stirrups placed at 40 or even 50 cm. Therefore, it was decided to include in this study RC beams without transverse steel reinforcement, in order to verify the effectiveness of the jacketing scheme in similar cases, which are very common in practice. For the strengthening FRCM jackets, two different cases were also considered for comparison reasons, that is, thin FRCM jackets with longitudinal and transverse steel reinforcement and jackets reinforced with a light steel wire mesh (T131). Therefore, four types of beam specimens were produced, mentioned as M1, M2, M3 and M4 (see Fig. 22).

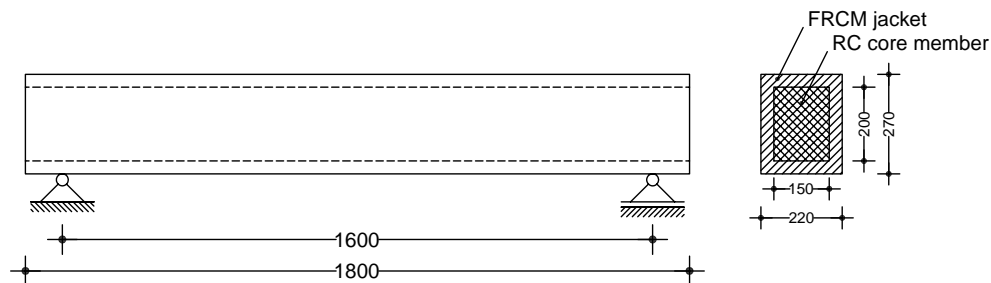


Fig. 21: Geometric characteristics of the RC beam specimen strengthened by an FRCM jacket (dimensions in mm).

The material properties, the boundary conditions, the F.E. used, the numerical procedures followed and the simulation technique are the same as considered for the simulation of the FRCM beams and have already been described. The yield stress of the steel structural mesh is 500 MPa. Fig. 23 shows the different sets of elements that the simulation model is consisted of, which are overlapped and connected at the same grid of nodes. All the specimens were subjected to static monotonic and cyclic 4-point bending.

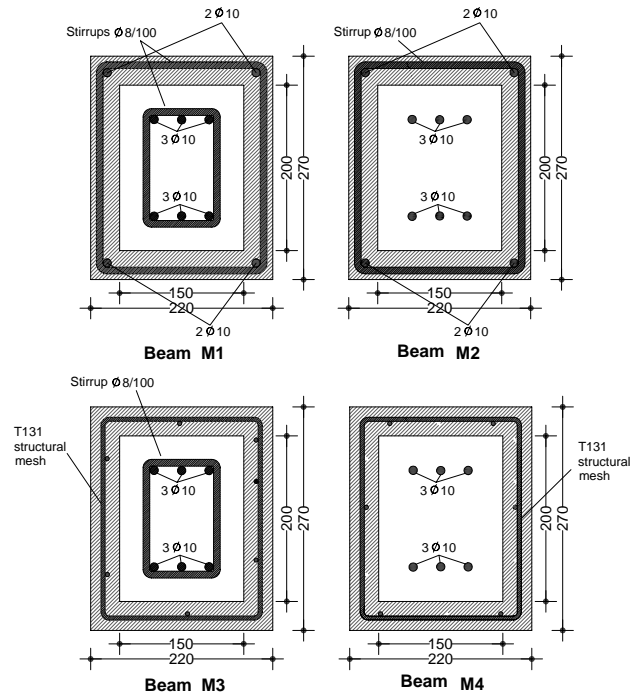


Fig. 22: Cross-sections of the four types of FRCM strengthened beam specimens (dimensions in mm).

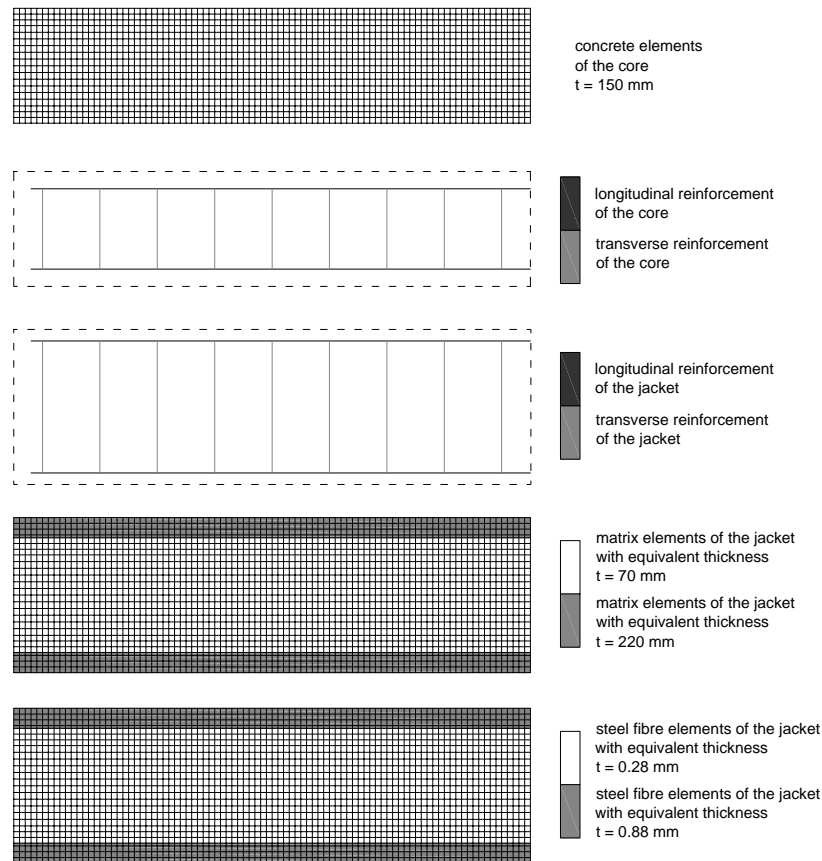


Fig. 23: The different sets of finite elements for the conventional RC beam strengthened with the FRCM jacket

The results obtained from the numerical simulation of the M1 strengthened beam will be described. Fig. 24 shows the load-displacement curves for the M1 beam specimen obtained by the two-dimensional numerical model together with the experimental results. There is a very good agreement between the two curves, regarding the overall stiffness of the system, the opening of the first crack, the value of the load at the steel's yielding point and the values of the respective displacements, as well as the value of the maximum load the beams can undertake. Very early, a vertical jump appears in the diagram (point A), which corresponds to the loss of the tensile strength of the matrix. This is the point where the first cracks appear. Point B corresponds to the yielding of the reinforcement steel. After that point, the overall strength of the system continues to increase due to the contribution of the fibres, until the maximum strength of the system is attained (point C). Then, the steel fibres fail by being pulled-out and this is represented by an abrupt descending branch in the numerically obtained curve in Fig. 24. The experimental curve exhibits also loss of strength, but more gradually and does not have an abrupt vertical branch. After the loss of the contribution of the steel fibres, the load is undertaken by the longitudinal steel reinforcement.

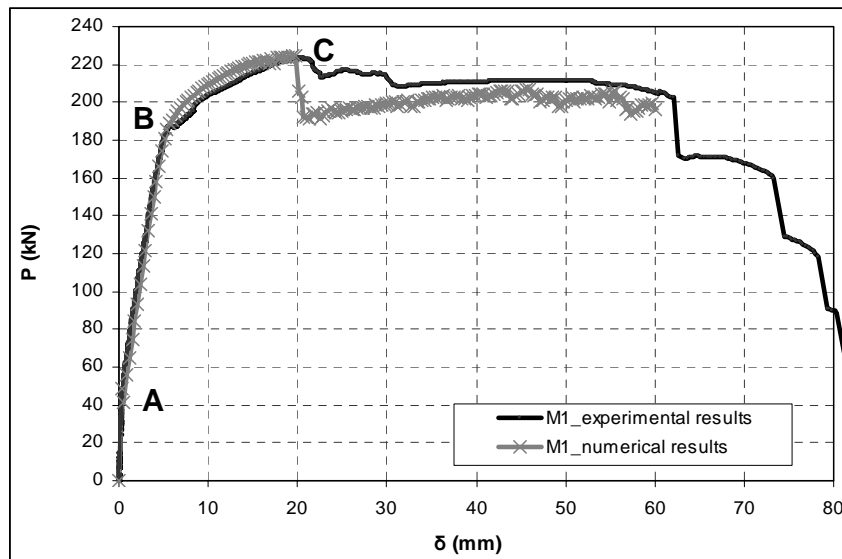


Fig. 24: Comparison of the numerical and experimental results of the conventional RC beam strengthened with the FRCM jacket (M1), under static monotonic 4-point bending.

The M1 strengthened beam is also subjected to static cyclic 4-point bending. Fig. 25 shows the comparison between the load vs. time curves obtained by the two-dimensional numerical model for the M1 beam specimen and the corresponding experimental results and it can be concluded that there is a good agreement between them. In terms of ultimate load capacity, the values predicted by the numerical model are in good agreement with the experimental results. The comparison between the numerical and respective experimental results for the M2, M3 and M4 beams under static monotonic and cyclic loading showed that, in general, there was a good approximation of the experimental curves by the corresponding numerical ones.

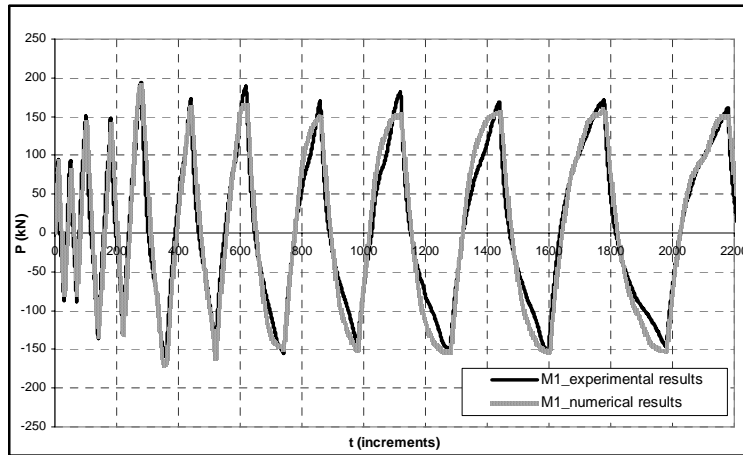


Fig. 25: Comparison of the numerical and experimental results of the conventional RC beam strengthened with the FRCM jacket (M1), under static cyclic 4-point bending.

Fig. 26 gives the results obtained by all four numerical analyses (in terms of moment-displacement curves) with respect to those of the original RC specimen, for the case of static monotonic 4-point bending. As expected, the strengthening of the RC specimen with the under study jackets results in a significant increase of the strength and stiffness of the original RC beam, maintaining at the same time the member's deformation capacity. It is worth noting that the strengthened member sustained in the experiments a midspan displacement of more than 60 mm. In some cases the numerical analysis could not follow such displacement ranges due to the excessive cracking that occurred. In terms of strength, the bending capacity of the jacketed member is nearly 2 to 3 times greater than that of the original RC one. Notice also that, as far as the type of the jacket's reinforcement is concerned, the ultimate load capacity of the members strengthened with the jackets reinforced with the light mesh is significantly lower than that when longitudinal and transverse reinforcement is used. However, the experimental and numerical results confirm that a significant increase of strength can be obtained even with the use of light structural mesh. In any case, the overall behaviour seems not to be affected by the lack of shear reinforcement in the core member.

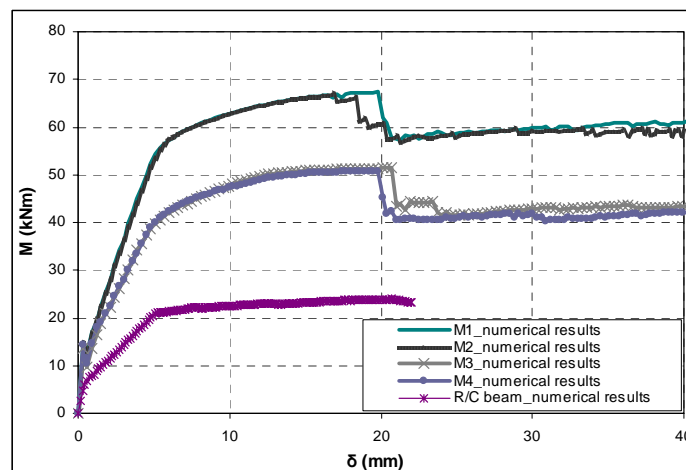


Fig. 26: Applied moment vs. displacement curves predicted by the numerical models for all beam specimens, under static monotonic 4-point bending.

The load-displacement curves obtained from the numerical analysis for the M1 and M2 beams under static cyclic 4-point bending are shown in Fig. 27a, together with the results obtained for the RC beam, for comparison reasons. Respectively, the numerical results of the M3 and M4 beams are compared in Fig. 27b. As far as the load-carrying capacity of the strengthened beams is concerned, the same conclusions hold, as in the case of static monotonic loading. However, it can be noticed that the hysteresis loops obtained for the beams strengthened with jackets reinforced with the structural mesh, are narrower than those obtained for the beams strengthened by the jackets with the conventional reinforcement. Especially for the case of the M4 beam, where the transverse reinforcement of the core is absent, the quality of the hysteresis loops is low, as pinching occurs.

It can be concluded that for every case of RC beam strengthened by a thin FRCM jacket considered here, the numerically obtained load-displacement curves model the experimental results in a very satisfactory way. Also, the crack formation patterns yielded by the finite element analysis show a similar behaviour as the experimental results. Therefore, it is concluded that the proposed F.E. models can simulate rather accurately the failure mechanism of conventional RC beam specimens strengthened by thin FRCM jackets and can predict an ultimate load capacity very close to that measured in the experiments.

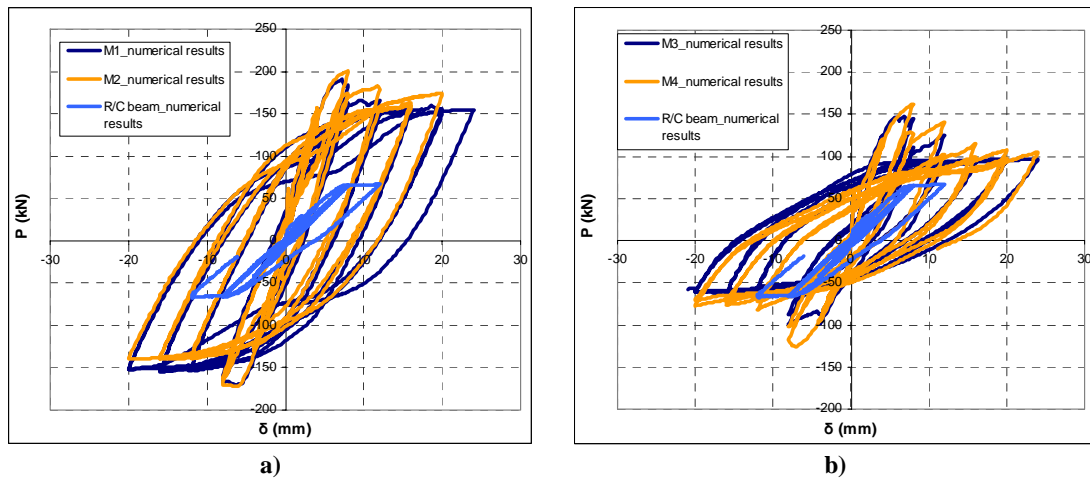


Fig. 27: Numerical load-displacement curves of the original RC beam and the strengthened beams a) M1 and M2, b) M3 and M4, under static cyclic 4-point bending.

5 EXAMPLE OF THE APPLICATION OF THE FRCM JACKETS FOR THE SEISMIC STRENGTHENING OF STRUCTURAL RC MEMBERS

As the main application of the studied FRCM jackets is the seismic strengthening of existing RC structures, it is important to obtain a method for the effective simulation of the composite material in common programs of structural analysis. A method will be proposed, through which the contribution of the steel fibres and also the reduction of the load-carrying capacity of a strengthened member due to the loss of the contribution of the fibres, can be accurately taken into account.

For the development of the simulation technique of the composite material the cross-section analysis programs FAGUS-5 and SAP2000 are used. For the validation of the proposed technique, the results obtained by the cross-section analyses are compared with the results obtained by the F.E. analyses for the Type C FRCM beam and the RC beam strengthened by the M1 FRCM jacket.

First, the FRCM beam with longitudinal and transverse reinforcement (Type C) is considered. The proposed technique is based on the appropriate modification of the material properties of the high-strength cementitious matrix in order to take into account the contribution of the steel fibres. Therefore, it is assumed that the FRCM beam is exclusively consisted of an equivalent cementitious matrix and the steel reinforcement, as it is depicted in Fig. 28.

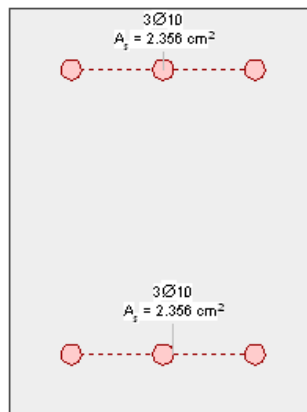


Fig. 28: The cross-section of the FRCM beam considered for the simulation of the composite material through the assumption of an equivalent cementitious matrix.

As far as the material properties of the equivalent cementitious matrix are concerned, an equivalent value of the elasticity modulus E_{eq} is determined through the elasticity modulus of the original cementitious matrix E_C and the elasticity modulus of the steel fibres E_F , based on the relation:

$$E_{eq} = E_C \left(\frac{A_C}{A_{eq}} \right) + E_F \left(\frac{A_F}{A_{eq}} \right), \quad (2)$$

where A_{eq} is the cross-section area of the equivalent cementitious matrix, A_C is the cross-section area of the original cementitious matrix and A_F is the equivalent cross-section area of the fibres. Also, the following relation holds:

$$A_C = A_{eq} + A_F \quad (3)$$

Therefore, through the relations (2) and (3) the elasticity modulus of the equivalent cementitious matrix is calculated:

$$E_{eq} = 35.5 \times 0.996 + 210 \times 0.004 \Rightarrow E_{eq} = 36.20 \text{ GPa}. \quad (4)$$

Moreover, it is assumed that the equivalent cementitious matrix has a tensile strength respective to the tensile strength of the homogenized layer of steel fibres considered for the representation of the contribution of fibres in the F.E. analysis. In order to determine the tensile strength $f_{ct,eq}$ of the equivalent cementitious matrix, the yield stress f_y^F of the steel fibres is again distributed over the entire cross-section of the equivalent cementitious matrix through the relation:

$$f_{ct,eq} = f_y^F v_f a_f \Rightarrow f_{ct,eq} = 950 \times 0.008 \times 0.5 \Rightarrow f_{ct,eq} = 3.8 \text{ MPa}, \quad (5)$$

where $v_f = 0.8\%$ is the volumetric ratio of the fibres in the mixture and $a_f = 0.5$ is the factor that takes into account the orientation of the fibres in the matrix.

It must be noted that the tensile strength of the original cementitious matrix is not taken into account. The stress-strain relationship considered for the equivalent material exhibits a tensile strength that is not exhausted like in the case of the original cementitious matrix, but remains constant after reaching its ultimate value, so that the tensile strength of the steel fibres is taken into account. However, a descending branch should be introduced in the stress-strain relationship that will correspond to the loss of the equivalent tensile strength and thus, will represent the gradual loss of the contribution of the steel fibres, respectively to the stress-strain relationship of Fig. 13. The stress-strain relationships considered for the equivalent cementitious matrix in the FAGUS-5 and SAP2000 cross-section analysis programs are depicted in Figs. 29a and 29b, respectively. It is noticed that in the stress-strain relationship considered in the FAGUS-5 program, the descending branch corresponding to the loss of the equivalent tensile strength is not introduced due to limitations of the specific program.

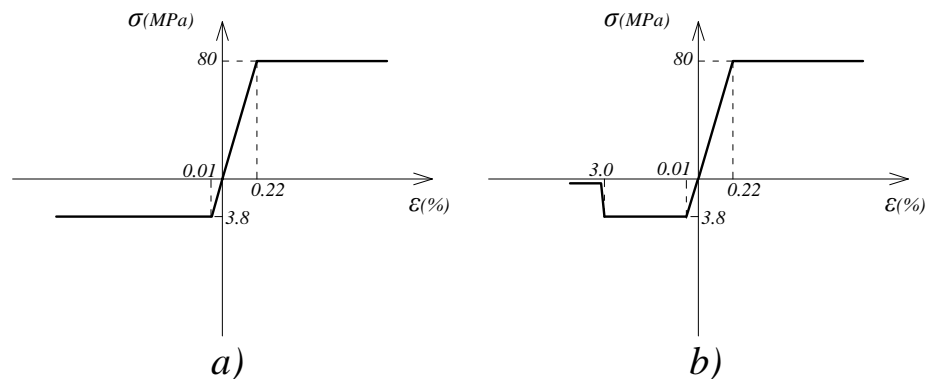


Fig. 29: The stress-strain relationship considered for the equivalent cementitious matrix in the cross-section analysis program a) FAGUS-5 and b) SAP2000.

Fig. 30 shows the comparison between the moment-curvature curves obtained by the cross-section analyses and the F.E. analysis of the FRCM beam. As it is noticed, there is a very good agreement between the obtained results and therefore, the effectiveness of the proposed method for the simulation of the FRCM in common structural analysis programs is verified. Of course, as it was expected, the curve obtained by the analysis in FAGUS-5 cannot reproduce the reduction of the load-carrying capacity of the beam due to the loss of the contribution of the steel fibres, as it was not possible to introduce a descending branch representing the specific phenomenon in the corresponding stress-strain relationship.

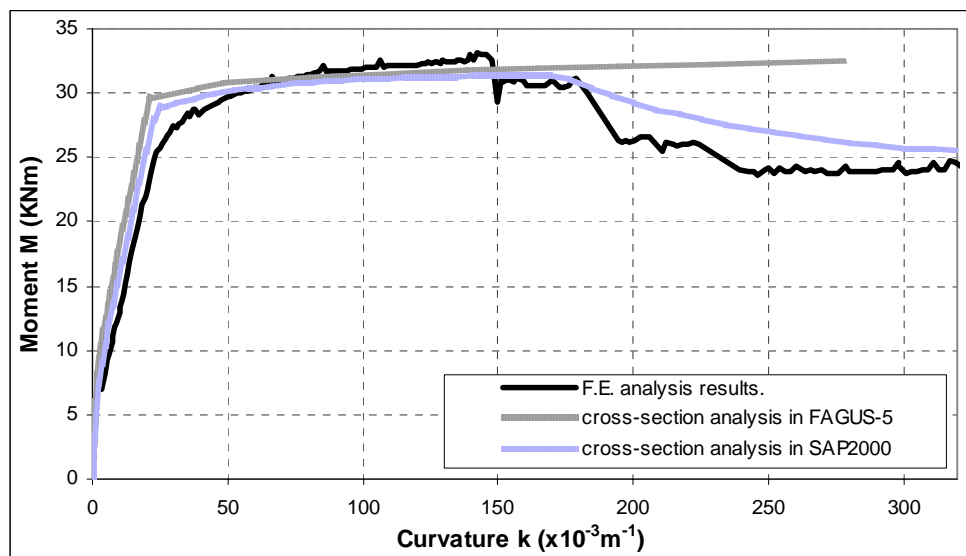


Fig. 30: Comparison of the moment-curvature curves of the FRCM beam cross-section, obtained for the simulation of the composite material through the assumed equivalent cementitious matrix.

Following the already described simulation method, the cross-section analysis of the RC beam strengthened by the M1 FRCM jacket is performed, using the FAGUS-5 and SAP2000 programs. The cross-section of the strengthened beam is depicted in Fig. 31. For the composite material of the jacket, an equivalent cementitious matrix is assumed again and the stress-strain relationships of the Figs 29a and 29b are considered for the two cross-section analysis programs. Fig. 32 shows the comparison between the moment-curvature curves obtained by the cross-section analyses and the F.E. analysis of the RC beam strengthened by the FRCM jacket. It is noticed that there is a very good agreement between the obtained results and therefore, the effectiveness of the proposed technique for the simulation of RC members strengthened by FRCM jackets in common structural analysis programs is verified.

In the sequel, the proposed simulation method is applied in an example of seismic strengthening of an existing RC structure by the FRCM jackets. The RC structure considered is a ground floor building with basement, which was built during the 1950's. The evaluation of the seismic response of the existing and the strengthened structure is

performed through nonlinear static analyses with the use of the structural analysis program STATIK-5.

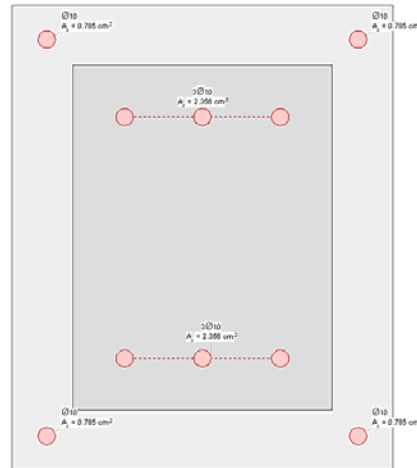


Fig. 31: The cross-section of the RC beam strengthened by the FRCM jacket, considered for the simulation of the composite material through the assumption of an equivalent cementitious matrix.

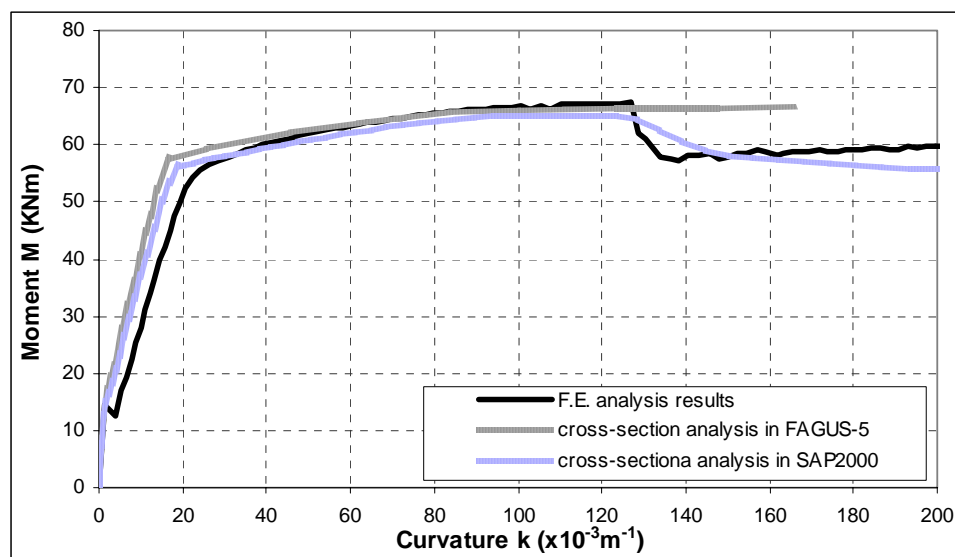


Fig. 32: Comparison of the moment-curvature curves of the strengthened beam cross-section, obtained for the simulation of the composite material of the jacket through the assumed equivalent cementitious matrix.

First, an appropriate model is formulated, employing frame elements for the simulation of the beams and the columns. The model is depicted in Fig. 33. The cross-section of the columns is depicted in Fig. 34. It is noted that the columns of the ground floor are considered to be the weak members of the building and therefore, they are the ones that will be strengthened by the FRCM jackets. The height of the columns is 3.72m. The concrete quality is C12/15 with elasticity modulus equal to 26 GPa, compressive strength equal to 12 MPa and tensile strength equal to 1.6 MPa. The reinforcing steel quality is S220, with elasticity modulus equal to 210 GPa and yield stress equal to 220 MPa.

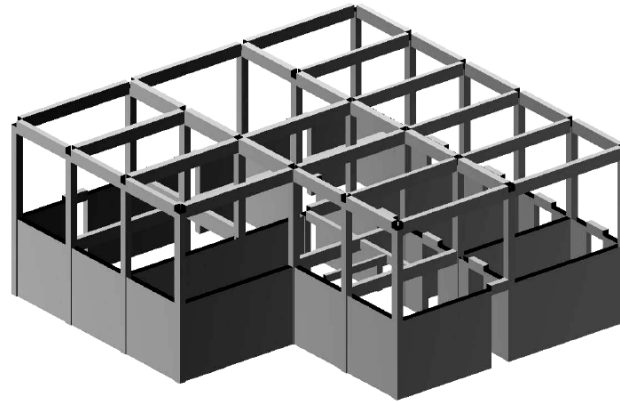


Fig. 33: The formulated model of the existing structure.

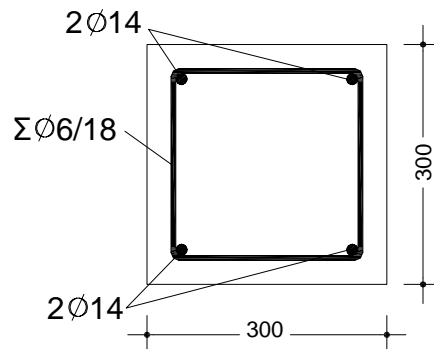


Fig. 34: Dimensions of the cross-section and reinforcement layout of the RC columns (dimensions in mm).

Both for the evaluation of the existing structure and for the strengthening procedure, the Eurocode 8 Type I spectrum is used with $a=0.24$, $\gamma_1 = 1$, ground type A and $S=1.00$. The “Life Safety” performance level is adopted. The model is submitted to a series of non-linear static analyses for the different directions of the seismic loading (0° , 90° , 180° and 270°), which unveil the weaknesses of the building. The drift value of every column is checked for all the directions of seismic loading and compared with the drift capacity value calculated according to KAN.EPE. In all cases, the drift values of the existing columns are found to be higher than the drift capacity value. Therefore, the existing columns must be strengthened.

The cross-section of the column strengthened by the FRCM jacket is depicted in Fig. 35. For the simulation of the FRCM of the jacket, the method based on the assumption of the equivalent cementitious matrix is used and the stress-strain relationship of Fig. 29a is considered, as the structural analysis program STATIK-5 uses the FAGUS-5 cross-section analysis program. The steel reinforcement of the jacket has yield stress equal to 500 MPa and elasticity modulus equal to 210 GPa.

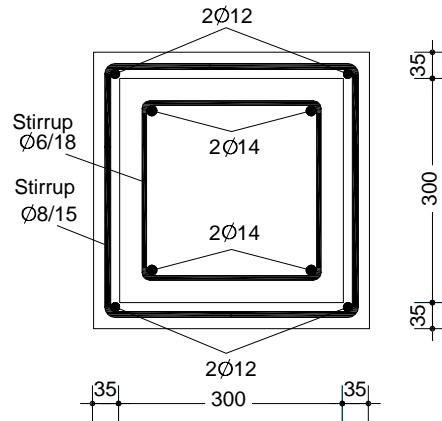


Fig. 35: Dimensions of the cross-section and reinforcement layout of the RC columns strengthened by the FRCM jacket (dimensions in mm).

The new model of the strengthened structure is formulated and submitted to the respective non-linear static analyses for the different directions of the seismic loading (0° , 90° , 180° and 270°), for the evaluation of its seismic response. The drift value of each strengthened column is once more calculated for every seismic load direction. In order to check the drift values of the strengthened member, a F.E. analysis procedure is proposed. The two-dimensional F.E. simulation model of the strengthened column is formulated, following exactly the same numerical simulation method that was used for the simulation of the bending behaviour of the RC beam strengthened by the FRCM jacket. Horizontal displacement is imposed at the top of the column together with a constant axial load N . Different values are considered for the axial load, namely $N=0$, 100, 140 and 180 kN. Both the F.E. model of the strengthened column and the moment-drift curves that are obtained by the F.E. analysis for the different values of the axial load are shown in Fig. 36.

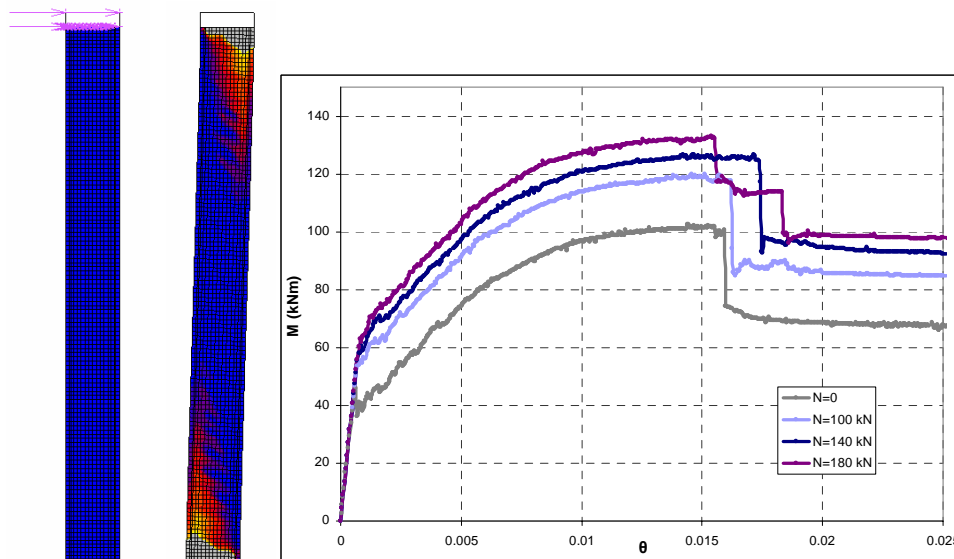


Fig. 36: The F.E. model of the strengthened column and the obtained moment-drift curves for different values of N .

The target of this procedure is the comparison of the drift value of each strengthened column with the drift value obtained by the numerical analysis, for the respective axial load N . The drift value of the strengthened member should not exceed the drift value for which the contribution of the fibres is lost and the estimated load-carrying capacity of the strengthened member is reduced. In order to overcome any uncertainty that can arise during the F.E. analysis, it is proposed to divide the obtained drift values by a safety factor equal to 1.5. Finally, the drift values of the strengthened columns are compared to those obtained by the F.E. analysis and are found to be lower for every case considered. Therefore, the effectiveness of the strengthening of the existing columns by the FRCM jackets is verified and the proposed technique for the simulation of the composite material in common structural analysis programs is proved to be efficient.

6 CONCLUSIONS – INNOVATIVE POINTS

Concluding, the innovative points of the present dissertation can be summarised to the following:

- An accurate three-dimensional numerical model is proposed for the simulation of the pull-out behaviour of a steel hooked-end fibre from a high-strength cementitious matrix. The model takes into account the non-linear phenomena which are present in the physical problem and is able to reproduce the mechanisms that affect the behaviour of the fibre-matrix system during the pull-out process. The proposed F.E. model can be used to simulate the pull-out behaviour of fibres with different geometries and also of fibres that are being pulled-out from the matrix with different inclination angles.
- A new method is proposed for the simulation of FRCM, according to which the contributions of the matrix and the fibres are taken into account separately, as they are simulated through two different overlapping layers of F.E., for which the appropriate stress-strain relationships are considered. The proposed technique can be applied for the simulation of the behaviour of FRCM structural members, as well as RC members strengthened by FRCM jackets.
- Some techniques are developed for the estimation of the parameter values of the stress-strain relationship considered in the simulation models of the FRCM members, for the equivalent homogenized material that represents the contribution of the steel fibres. At the same time, the experimental results that must be available to the researcher in order to accurately simulate the behaviour of FRCM, are pointed out.
- A technique is proposed for the simulation of the FRCM as a structural material or a material for strengthening jackets, in common structural analysis programs. Moreover, the points to which special attention should be given are denoted, and the methods for treating them are proposed.

