



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

**Προσομοίωση της διατμητικής αστοχίας διαβρωμένων δοκών
οπλισμένου σκυροδέματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων
στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΣΗΜΟΣ Φ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπων: Σάββας Τριανταφύλλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ



Αθήνα, Νοέμβριος 2021

Ασήμος Φ. Δημήτριος

«Προσομοίωση της διατμητικής αστοχίας διαβρωμένων δοκών οπλισμένου
σκυροδέματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων»

Διπλωματική εργασία

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

Asimos F. Dimitrios

“Simulation of shear failure of corroded reinforced concrete beams with the method
of finite elements”

Diploma Thesis

Laboratory of Structural Analysis and Antiseismic Research, National Technical
University of Athens

Athens, November 2021

“The ideal engineer is a composite ... He is not a scientist, he is not a mathematician, he is not a sociologist or a writer; but he may use the knowledge and techniques of any or all of these disciplines in solving engineering problems.”

—Nathan W. Dougherty, American civil engineer

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί τον τελευταίο λίθο της προσπάθειας μου για την απόκτηση του διπλώματος του πολιτικού μηχανικού. Κατά την διάρκεια των σπουδών μου γνώρισα συμφοιτητές με ζήλο για γνώση και μεράκι για δημιουργία καθώς και καθηγητές άρτια καταρτισμένους και αφοσιωμένους στην διδασκαλία, στην έρευνα και στην επαγγελματική ηθική του μηχανικού απέναντι στην κοινωνία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου και ιδιαίτερα τον επιβλέποντα μου Σάββα Τριανταφύλλου ο οποίος στάθηκε αρωγός στην προσπάθεια μου με τον χρόνο που αφιέρωσε όλο το διάστημα της εκπόνησης της εργασίας και τις πολύτιμες υποδείξεις και καθοδήγησή του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Samir Dirar από το πανεπιστήμιο του Birmingham για την εποικοδομητική συνάντησή μας στην οποία συζητήσαμε και αναλύσαμε τα αποτελέσματά μου. Ακόμα, τον συμφοιτητή και φίλο Θεόδωρη για όλες τις συνεργασίες μας σε ομαδικές εργασίες, στις μελέτες που κάναμε μαζί και τις βοήθειες που ανταλλάξαμε κατά την διάρκεια των σπουδών. Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τον αδερφό μου Κωνσταντίνο ο οποίος με εμπύχωνε σε όλη την διάρκεια της φοίτησής μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	vi
Κατάλογος Σχημάτων	viii
Κατάλογος Πινάκων	xiii
Περίληψη	1
ABSTRACT.....	1
1 Εισαγωγή	3
1.1 Περιγραφή προβλήματος	3
1.2 Αντικείμενο εργασίας.....	3
1.3 Μεθοδολογία.....	4
1.4 Δομή εργασίας.....	5
1.5 Ιστορική Αναδρομή Σύνθετων Υλικών.....	5
2 Πείραμα Αναφοράς	8
2.1 Διάταξη.....	8
2.2 Υλικά.....	9
2.3 Διαδικασία Διάβρωσης	11
2.4 Φόρτιση	12
2.5 Μορφή Αστοχίας.....	13
2.6 Αποτελέσματα πειράματος.....	16
3 Προσομοίωση	20
3.1 Concrete Damage Plasticity model (CDP).....	20
3.2 Θλίψη	27
3.3 Εφελκυσμός.....	28
3.4 Φόρτιση	29
3.5 Προσομοίωση στο Abaqus.....	29
4 Αποτελέσματα ανάλυσης για ποσοστό διάβρωσης 0%.....	31
4.1 Δοκός χωρίς ενίσχυση και χωρίς διάβρωση, N00.....	31

4.1.1	Ανάλυση μοντέλου N00 με C3D20R στοιχεία	38
4.1.2	Διερεύνηση παραμέτρων μοντέλου CDP	42
4.2	Δοκός ενισχυμένη με ράβδους χωρίς διάβρωση, R00	45
4.3	Δοκός ενισχυμένη με μανδύα χωρίς διάβρωση, S00	50
4.4	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση δοκών N00, R00, S00	56
5	Διάβρωση.....	60
5.1	Γενικά.....	60
5.2	Μηχανισμός διάβρωσης.....	60
5.3	Διαδικασία διάβρωσης στο εργαστήριο	64
5.4	Υπολογισμός διάβρωσης σε υφιστάμενες κατασκευές.....	66
5.5	Επίδραση της διάβρωσης στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών	68
5.6	Μείωση της αντοχής του μη περισφιγμένου σκυροδέματος.....	68
5.7	Αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού	70
6	Αποτελέσματα ανάλυσης για ποσοστό διάβρωσης 12%.....	72
6.1	Δοκός χωρίς ενίσχυση με διάβρωση $\Delta w=12\%$, N12	72
6.2	Δοκός ενισχυμένη με ράβδους με διάβρωση $\Delta w=12\%$, R12.....	78
6.3	Δοκός ενισχυμένη με μανδύα με διάβρωση $\Delta w=12\%$, S12.....	83
6.4	Διερεύνηση διατμητικής αντοχής για μεγάλα ποσοστά διάβρωσης	88
7	Συμπεράσματα.....	91
7.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	91
8	Βιβλιογραφία	92

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1.1 ΟΛΟΣΩΜΟΣ ΜΑΝΔΥΑΣ (Α) ΚΑΙ ΜΑΝΔΥΑΣ ΜΕ ΚΟΛΛΑΡΑ (Β).....	7
ΣΧΗΜΑ 2.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΟΚΩΝ.....	8

ΣΧΗΜΑ 2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ: (Α) ΔΟΚΟΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ (Β) ΔΟΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ CFRP ΡΑΒΔΟΥΣ (C) ΔΟΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ CFRP ΜΑΝΔΥΑ	9
ΣΧΗΜΑ 2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ	11
ΣΧΗΜΑ 2.4 ΜΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΕΣ ΔΟΚΟΙ ΣΧΗΜΑ 2.5 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΕΣ ΔΟΚΟΙ ΜΕ CFRP	15
ΣΧΗΜΑ 2.6 ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ CFRP	15
ΣΧΗΜΑ 2.7 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΩΝ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	17
ΣΧΗΜΑ 2.8 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΔW=12%	18
ΣΧΗΜΑ 2.9 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ CFRP ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ 0 ΚΑΙ 12%.....	18
ΣΧΗΜΑ 2.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ CFRP ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ 0 ΚΑΙ 12%.....	19
ΣΧΗΜΑ 3.1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (Α) ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ (Β)	21
ΣΧΗΜΑ 3.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ	23
ΣΧΗΜΑ 3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ.....	26
ΣΧΗΜΑ 3.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΑΠΟΚΛΙΝΟΝ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	26
ΣΧΗΜΑ 3.5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΡΟΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟ ΑΠΟΚΛΙΝΟΝ ΕΠΙΠΕΔΟ	27
ΣΧΗΜΑ 3.6 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	27
ΣΧΗΜΑ 3.7 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ, ΠΑΡΑΒΟΛΗ HOGNESTAD.....	28
ΣΧΗΜΑ 3.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	28
ΣΧΗΜΑ 3.9 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗ ΔΟΚΟΥ	29
ΣΧΗΜΑ 3.10 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΟΥ	30
ΣΧΗΜΑ 3.11 ΟΠΛΙΣΜΟΣ	30
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00, ΧΩΡΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	31
ΣΧΗΜΑ 4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΜΕ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	33
ΣΧΗΜΑ 4.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΟΥ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00	34
ΣΧΗΜΑ 4.4 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΡΕ, ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00	34

ΣΧΗΜΑ 4.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ, ΡΕΕQ, ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00..	35
ΣΧΗΜΑ 4.6 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00.....	35
ΣΧΗΜΑ 4.7 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00	36
ΣΧΗΜΑ 4.8 ΤΡΟΧΙΑ ΚΥΡΙΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	36
ΣΧΗΜΑ 4.9 ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00	37
ΣΧΗΜΑ 4.10 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΟΠΛΙΣΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00	37
ΣΧΗΜΑ 4.11 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00	38
ΣΧΗΜΑ 4.12 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ 20ΚΟΜΒΙΚΑ QUADRATIC ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ REDUCED INTEGRATION	38
ΣΧΗΜΑ 4.13 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ 8ΚΟΜΒΙΚΑ ΚΑΙ 20ΚΟΜΒΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	39
ΣΧΗΜΑ 4.14 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ-ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ..	40
ΣΧΗΜΑ 4.15 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00.....	41
ΣΧΗΜΑ 4.16 ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $G_F=1$, ΜΠΛΕ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	41
ΣΧΗΜΑ 4.17 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΩΝΙΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ Ψ (ΜΟΙΡΕΣ).....	42
ΣΧΗΜΑ 4.18 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ G_F (N/MM).....	43
ΣΧΗΜΑ 4.19 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ M.....	43
ΣΧΗΜΑ 4.20 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ K_C.....	44
ΣΧΗΜΑ 4.21 ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00.....	45
ΣΧΗΜΑ 4.22 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00 ΧΩΡΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	46
ΣΧΗΜΑ 4.23 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00, ΜΕ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ .	47
ΣΧΗΜΑ 4.24 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00	48
ΣΧΗΜΑ 4.25 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ, ΡΕΕQ, ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00	48
ΣΧΗΜΑ 4.26 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00.....	49
ΣΧΗΜΑ 4.27 ΚΥΡΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00.....	49
ΣΧΗΜΑ 4.28 ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00	49

ΣΧΗΜΑ 4.29 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R00.....	50	
ΣΧΗΜΑ 4.30 ΔΟΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ CFRP	50	
ΣΧΗΜΑ 4.31 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00 ΧΩΡΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	51	
ΣΧΗΜΑ 4.32 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00	52	
ΣΧΗΜΑ 4.33 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00	53	
ΣΧΗΜΑ 4.34 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00.....	53	
ΣΧΗΜΑ 4.35 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	54	
ΣΧΗΜΑ 4.36 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00	54	
ΣΧΗΜΑ 4.37 ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΣΤΟΝ ΟΠΛΙΣΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00	54	
ΣΧΗΜΑ 4.38 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	ΣΧΗΜΑ 4.39 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΑΝΔΥΑ	55
ΣΧΗΜΑ 4.40 ΒΛΑΒΗ ΣΕ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	57	
ΣΧΗΜΑ 4.41 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ DC.....	57	
ΣΧΗΜΑ 4.42 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ DT.....	58	
ΣΧΗΜΑ 4.43 ΔΟΚΟΣ N00 ΣΕ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	58	
ΣΧΗΜΑ 4.44 ΔΟΚΟΣ R00 ΣΕ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	59	
ΣΧΗΜΑ 4.45 ΔΟΚΟΣ S00 ΣΕ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	59	
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	61	
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.....	62	
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΡΩΓΜΕΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	62	
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΠΡΟΟΔΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	63	
ΣΧΗΜΑ 5.5 ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	64	
ΣΧΗΜΑ 5.6 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΟΛΩΣΗΣ.....	64	
ΣΧΗΜΑ 5.7 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ	69	
ΣΧΗΜΑ 5.8 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ FC=30 ΜΡΑ.....	70	
ΣΧΗΜΑ 5.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΣ ΓΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ 0% ΚΑΙ 12%	71	
ΣΧΗΜΑ 6.1 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΗ ΔΟΚΟΣ ΟΠΟΥ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Η ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ	72	
ΣΧΗΜΑ 6.2 ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΟΡΜΟΥ ΠΑΧΟΥΣ C=22 ΜΜ.....	72	
ΣΧΗΜΑ 6.3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12 ΜΕ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ..	73	
ΣΧΗΜΑ 6.4 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	74	

ΣΧΗΜΑ 6.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	74
ΣΧΗΜΑ 6.6 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	
N12	75
ΣΧΗΜΑ 6.7 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ	
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	75
ΣΧΗΜΑ 6.8 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	75
ΣΧΗΜΑ 6.9 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	76
ΣΧΗΜΑ 6.10 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ N12.....	76
ΣΧΗΜΑ 6.11 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΔΟΚΟ N12	76
ΣΧΗΜΑ 6.12 ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	77
ΣΧΗΜΑ 6.13 ΑΝΗΓΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12	77
ΣΧΗΜΑ 6.14 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12 ΜΕ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ..	78
ΣΧΗΜΑ 6.15 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ	
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	79
ΣΧΗΜΑ 6.16 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	79
ΣΧΗΜΑ 6.17 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	80
ΣΧΗΜΑ 6.18 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ	
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12	80
ΣΧΗΜΑ 6.19 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΟΥ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	80
ΣΧΗΜΑ 6.20 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΟΥ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	81
ΣΧΗΜΑ 6.21 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	81
ΣΧΗΜΑ 6.22 ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12	82
ΣΧΗΜΑ 6.23 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	82
ΣΧΗΜΑ 6.24 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12 ΜΕ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.	83
ΣΧΗΜΑ 6.25 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ	
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12	84
ΣΧΗΜΑ 6.26 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	84
ΣΧΗΜΑ 6.27 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	85

ΣΧΗΜΑ 6.28 ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	85
ΣΧΗΜΑ 6.29 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ, ΡΕΕQ, ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	85
ΣΧΗΜΑ 6.30 ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	86
ΣΧΗΜΑ 6.31 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	86
ΣΧΗΜΑ 6.32 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΜΑΝΔΥΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	87
ΣΧΗΜΑ 6.33 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΜΑΝΔΥΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	87
ΣΧΗΜΑ 6.34 ΚΑΜΠΥΛΗ ΘΑΛΙΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	89
ΣΧΗΜΑ 6.35 ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	90
ΣΧΗΜΑ 6.36 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	90

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 ΑΝΤΟΧΕΣ ΔΟΚΩΝ.....	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΣ.....	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CFRP ΡΑΒΔΩΝ.....	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CFRP ΜΑΝΔΥΑ.....	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	16
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ CDP.....	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΧΩΡΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N00 ΜΕ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ C3D8 C20DR ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ R00 ΧΩΡΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ R00.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00 ΧΩΡΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S00.....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΙΩΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Z ΓΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΔW=12%.....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 ΑΝΤΟΧΗ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΔW=12%.....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΣ ΓΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΔW=12%.....	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ N12.....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ R12.....	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S12.....	83

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΣ ΣΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΙΩΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Z ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	89

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων που διεξήχθησαν για την μελέτη της διατμητικής αντοχής δοκών με και χωρίς διάβρωση, ενισχυμένα με εξωτερικό μανδύα ή εσωτερικές ράβδους ινοπλισμένου πολυμερούς με ίνες άνθρακα (CFRP). Η προσομοίωση έγινε στο λογισμικό Abaqus/Standard. Στην αρχή γίνεται εκτενής περιγραφή του πειράματος αναφοράς και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Ειδικότερα για την μη διαβρωμένη δοκό χωρίς ενίσχυση πραγματοποιούνται προσομοιώσεις στατικής φόρτισης με C3D8 και C3D20R στοιχεία καθώς και διερευνητικές αναλύσεις για την επίδραση στα αποτελέσματα των παραμέτρων της γωνίας εσωτερικής τριβής ψ , της ενέργειας θραύσης του σκυροδέματος G_f , της ιξώδους παραμέτρου μ και της παραμέτρου K_c του καταστατικού μοντέλου Concrete Damage Plasticity (CDP). Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολοίπων δοκών ενώ γίνεται και μια εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της διάβρωσης. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκούς χωρίς ενίσχυση N, για ποσοστά διάβρωσης 20, 25, 30 και 35%

ABSTRACT

The overarching aim of this thesis is to investigate the influence of corrosion on the nonlinear response of reinforced concrete beams subjected to corrosion. For this purpose a thorough numerical investigation is conducted in Abaqus/Standard software using the Finite Element Method. The numerical models are calibrated on the basis of the results of an experimental campaign, which was conducted for the investigation of structural behavior of uncorroded as well as corroded beams strengthened in shear with either externally bonded (EB) carbon fiber- reinforced polymer (CFRP) sheet or embedded CFRP rods.

More specifically, analysis is conducted for the uncorroded beam without strengthening simulated with C3D8 and C3D20R finite elements under monotonic and cyclic loading conditions. Furthermore, a parametric investigation is conducted by varying the dilation angle α ; the fracture energy G_f ; the viscosity parameter ν and the parameter K_c of the Concrete Damage Plasticity constitutive model. Finally, the results of the analysis of unstrengthen beam for corrosion 20;25;30;35% are presented.

1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή προβλήματος

Σε όλη την διάρκεια της ζωής τους, οι κατασκευές έρχονται σε επαφή με το φυσικό περιβάλλον και ως εκ τούτου η διαδικασία της διάβρωσης ξεκινάει αμέσως. Οι γέφυρες κυρίως είναι εκείνα τα δομήματα που είναι περισσότερο εκτεθειμένα στο φυσικό περιβάλλον. Ακόμα οι περισσότερες από αυτές έχουν υπερβεί το συμβατικό όριο ζωής το οποίο ορίζεται στα 50 ή στα 100 έτη. Οι οπλισμοί διατηρήσεως είναι εκείνοι που διαβρώνονται πιο γρηγορά καθώς βρίσκονται πιο κοντά στις εξωτερικές παρειές των στοιχείων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διατηρητική αντοχή, γεγονός που μπορεί να αποφέρει ψαθυρές μορφές αστοχίας. Τέλος οι νέοι κανονισμοί επιβάλλουν νέες στατικές και σεισμικές δράσεις τις οποίες πρέπει να είναι σε θέση να αναλάβουν οι κατασκευές.

Συνεπώς η ανάγκη για επιδιόρθωση και ενίσχυση των κατασκευών είναι αδήριτη. Κάθε χρόνο τεράστια ποσά δαπανούνται για την επιδιόρθωση και την ενίσχυση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος εξαιτίας της διάβρωσης. Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών (fiber-reinforced polymer, FRP) σε επισκευή κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα πεδίο ενδιαφέροντος εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά. Μέθοδοι για ενίσχυση στοιχείων έναντι τέμνουσας με χρήση FRP υλικά περιλαμβάνουν την εξωτερική τοποθέτηση μανδύα, (Dirar et al. 2012) ή πλακών (Mofidi et al. 2014), ράβδων τοποθετούμενων στην επιφάνεια του στοιχείου, NSM (Rahal and Rumaih 2011), προενταταμένες λωρίδες από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) (Dirar et al 2013) και εσωτερικές ράβδους από CFRP υλικά (embedded rods) (Valerio et al. 2009 Mofidi et al. 2012a).

1.2 Αντικείμενο εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση διαβρωμένων δοκών ενισχυμένων έναντι τέμνουσας με εξωτερικό μανδύα ή με εσωτερικές ράβδους από CFRP. Η εργασία επιχειρεί να συγκρίνει τα αποτελέσματα πειραμάτων και προσομοίωσης έτσι ώστε να καθιστά την χρήση λογισμικού αξιόπιστη σε θέματα μη γραμμικής ανάλυσης διαβρωμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.

Με την εργασία αυτή διερευνάται

- Η αποτελεσματικότητα των μέσων ενίσχυσης.
- Η μη γραμμική συμπεριφορά δοκών οπλισμένου σκυροδέματος.
- Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου Concrete Damage Plasticity (CDP) που παρέχει το λογισμικό Abaqus να περιγράψει την συμπεριφορά στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υποβαλλόμενα σε στατική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Αν οι σχέσεις στην βιβλιογραφία είναι ικανές να περιγράψουν το φαινόμενο της διάβρωσης.
- Η επίδραση στην φέρουσα ικανότητα των δοκών για μεγάλα ποσοστά διάβρωσης.

1.3 Μεθοδολογία

Η εργασία βασίζεται στα πειράματα που διεξήχθησαν από τους Shunde Qin, Samir Dirar, Jian Yang, Andrew H. C. Chan and Mohammed Elshafie στην σχολή πολιτικών μηχανικών του πανεπιστημίου του Birmingham που είχαν ως στόχο την επίδραση των διαφόρων ποσοστών διάβρωσης του οπλισμού στην διατμητική αντοχή των δοκών και την αποτελεσματικότητα των μέσων ενίσχυσης.

Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό Abaqus/Standard. Το σκυρόδεμα προσομοιώθηκε με 3D πεπερασμένα στοιχεία, οι οπλισμοί με στοιχεία δικτύωματος (wire element) και ο μανδύας με μεμβρανικά πεπερασμένα στοιχεία (membrane elements). Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό μοντέλο Concrete Damage Plasticity (CDP), ενώ για τους οπλισμούς και τον μανδύα, η συμπεριφορά ήταν ελαστοπλαστική. Η από κοινού συνεργασία σκυροδέματος και οπλισμού επιτεύχθηκε με την embedded technique, ενώ η συνεργασία σκυροδέματος και μανδύα καθώς και του σκυροδέματος με τις πλάκες στήριξης και φόρτισης με την tie technique.

Πραγματοποιήθηκε μη γραμμική στατική ανάλυση με την μέθοδο των μετατοπίσεων. Ως μέγιστη μετατόπιση ορίστηκε $d=13$ mm, μεγαλύτερη από την μετατόπιση αστοχίας.

Η διαδικασία της διάβρωσης επιτεύχθηκε με μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμού για κάθε ποσοστό διάβρωσης, καθώς και με μείωση της αντοχής του μη περισφιγμένου σκυροδέματος του κορμού της δοκού.

1.4 Δομή εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εισαγωγή της παρούσας εργασίας, ο σκοπός και τα θέματα που διερευνά. Ακόμα γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση για τα υλικά CFRP και την χρήση τους σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το πείραμα αναφοράς το οποίο αποτελεί βάση για την σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η προσομοίωση στο λογισμικό Abaqus και αναλύεται εις βάθος το καταστατικό μοντέλο Concrete Damage Plasticity (CDP). Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των δοκών χωρίς διάβρωση σε στατική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ο μηχανισμός της διάβρωσης και η επίδρασή της στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και του σκυροδέματος. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των δοκών με διάβρωση και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα των πειραμάτων.

1.5 Ιστορική Αναδρομή Σύνθετων Υλικών

Η ραγδαία πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών τα τελευταία χρόνια, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πληθώρας νέων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών αποτυγχάνει να παρέχει μία ικανοποιητική λύση. Μεταξύ των προϊόντων αυτών σημαντική θέση κατέχουν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (fiber reinforced polymer composites), τα οποία αποτελούνται από 'υφάσματα' ινώδων πολυμερών εμποτισμένων με ειδικές εποξικές ρητίνες. Τα 'υφάσματα' αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων, αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυσή τους (σχήμα 1.1). Λόγω κυρίως της ανθεκτικότητάς τους σε ηλεκτροχημική διάβρωση και του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, αποτελούν μία πολύ καλή εναλλακτική επιλογή για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών.

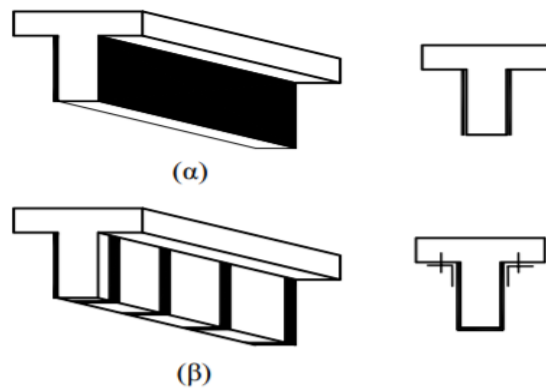
Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό μανδύων από σύνθετα υλικά είναι αντίστοιχες με τις αρχές σχεδιασμού των μεταλλικών μανδύων. Σε σύγκριση με τη χρήση μεταλλικών ελασμάτων για την ενίσχυση δομικών στοιχείων, η εναλλακτική εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι εξαιρετικές ιδιότητες βάρους προς αντοχή, η διαθεσιμότητα του υλικού σε σχετικά απεριόριστο μήκος, η συγκριτικά ευκολότερη εγκατάσταση και η ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Τα

πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τα σύνθετα υλικά μία πολύ ελκυστική εναλλακτική πρόταση. Γενικά, η εφαρμογή των υλικών αυτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή ορθότερα την τροποποίηση της καμπτικής, διατμητικής και αξονικής αντοχής του μέλους στο οποίο εφαρμόζεται. Η εξωτερική ενίσχυση με μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή είναι κατάλληλη για πληθώρα εφαρμογών. Αντιπροσωπευτικές χρήσεις είναι οι ακόλουθες:

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

Τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και είχαν ως συστατικά στοιχεία φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυσή τους πρωτοεμφανίστηκε στην Ελβετία το 1984. Το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Καλιφόρνιας (CALTRANS) πρωτοπόρησε με την χρήση υφασμάτων ινοπλισμένων πολυμερών για την σεισμική ενίσχυση 2000 βάθρων γεφυρών στην περιοχή Yolo δυτικά του Sacramento. Γρήγορα η χρήση τους επεκτάθηκε στην ενίσχυση πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε άλλα κράτη της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ασίας. Στην Ελλάδα εφαρμογές πολιτικού μηχανικού αναφέρονται από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Χαλκίδα).

Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν την πλειονότητα των κατασκευών που μελετήθηκαν και οικοδομήθηκαν στην Ελλάδα τουλάχιστον ως τα τέλη της δεκαετίας του 1970. Ένας σημαντικός αριθμός από τα κτίρια αυτά, κατά την διάρκεια σεισμών έχουν υποστεί κάποια βλάβη. Ακόμα, με την πάροδο του χρόνου, η φυσική φθορά που υφίσταται μια κατασκευή, μειώνει την αντοχή της για την ανάληψη σεισμικών φορτίων. Συνεπώς ο αριθμός των κατασκευών που θα χρήζουν επεμβάσεων θα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 1.1 ολόσωμος μανδύας (α) και μανδύας με κολλάρα (β)

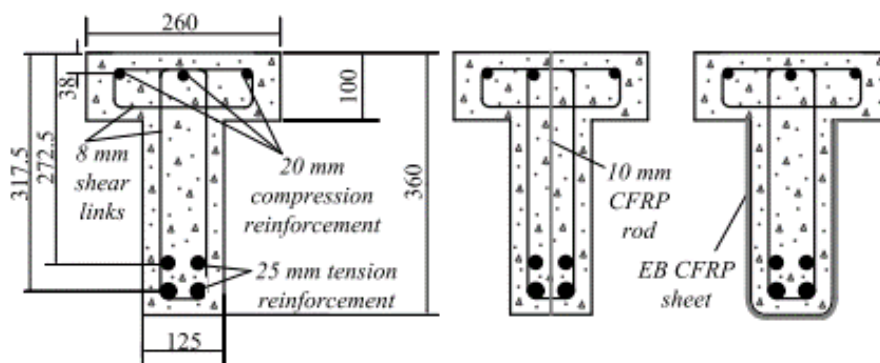
2 Πείραμα Αναφοράς

2.1 Διάταξη

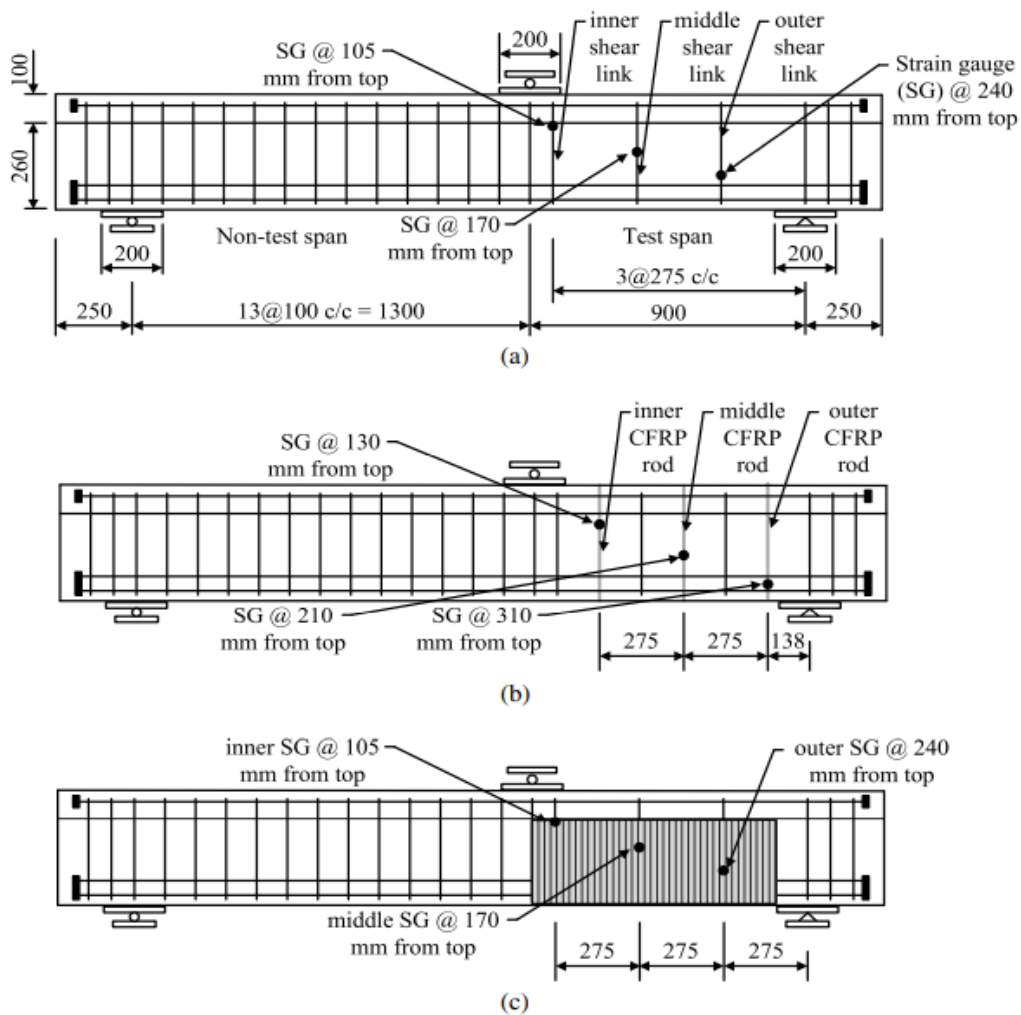
Το πείραμα περιλαμβάνει εννέα δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος μορφής T, έτσι ώστε να προσομοιώνεται η ύπαρξη πλάκας στις κατασκευές, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες ανάλογα με τον βαθμό διάβρωσης του οπλισμού διατήσεως (0%, 7%, 12%). Ακόμα κάθε μια δοκός από κάθε κατηγορία είναι είτε χωρίς ενίσχυση (συμβολισμός N), είτε ενισχυμένη με ράβδους CFRP (συμβολισμός R), είτε με μανδύα CFRP (συμβολισμός S). Έτσι για παράδειγμα η δοκός N00 είναι χωρίς ενίσχυση με βαθμό διάβρωσης 0%, ενώ η δοκός R12 είναι η ενισχυμένη δοκός με ράβδους CFRP με διάβρωση 12%, κοκ.

Η δοκός έχει μήκος 2.7 m, πλάτος κορμού 125 mm, πλάτος πέλματος 260 mm, ύψος πέλματος 100 mm, συνολικό ύψος 360 mm και στατικό ύψος 295 mm. Όλες οι δοκοί είναι ενισχυμένες με οπλισμό κάμψης και διάτμησης. Συγκεκριμένα, ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από 4Φ25 εφελκόμενες ράβδους και 3Φ20 θλιβόμενες. Ο οπλισμός διατήσεως αποτελείται από συνδετήρες Φ8/100 στο μη εξεταζόμενο τμήμα και Φ8/275 στο εξεταζόμενο άνοιγμα. Οι δοκοί είναι σχεδιασμένες να αστοχούν σε διάτμηση και υπάρχει σημαντική διαφορά στην διατμητική και καμπτική αντοχή ώστε να μπορεί να μετρηθεί η επίδραση της διατμητικής ενίσχυσης.

Η ενίσχυση με CFRP υλικά είναι είτε με μια στρώση συνεχούς μανδύα σχήματος U, είτε από ράβδους διαμέτρου 10 mm τοποθετούμενους εσωτερικά της δοκού. Η δοκός δοκιμάστηκε με την μέθοδο της κάμψης τριών σημείων. Η πλακά φόρτισης είναι μεταλλική μήκους 200 mm και πάχους 20 mm, ενώ οι πλάκες στήριξης είναι μήκους 200 mm και πάχους 25 mm, επίσης μεταλλικές.



Σχήμα 2.1 Διατομή δοκών



Σχήμα 2.2 Πειραματική διάταξη: (α) δοκός χωρίς ενίσχυση (β) δοκός ενισχυμένη με CFRP ράβδους (γ) δοκός ενισχυμένη με CFRP μανδύα

2.2 Υλικά

Οι δοκοί αποτελούνται από το ίδιο μίγμα σκυροδέματος (τσιμέντο: νερό: αδρανής: άμμος=1:0.65:2:3) με μέγιστο κόκκο αδρανούς 10 mm. Για την επίτευξη χλωριούχου περιβάλλοντος στο σκυρόδεμα, 3% χλωριούχο ασβέστιο ανά μάζα τσιμέντου προστέθηκε στο μίγμα του σκυροδέματος. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι αυτή των 28 ημερών μετά την πήξη του σκυροδέματος όπως λήφθηκε από δοκίμια. Σκοπός ήταν η τιμή των 30 MPa, αλλά λόγω προβλημάτων ελέγχου ποιότητας αυτή διαφοροποιήθηκε. Οι τιμές για κάθε κατηγορία φαίνεται στον πίνακα 2.1. Οι τιμές αντοχής του οπλισμού είναι στον πίνακα 2.2. Οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων και του μανδύα από CFRP φαίνονται στους πίνακες 2.3 και 2.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1 Αντοχές δοκών

Κατηγορία	Θλιπτική αντοχή κύβου MPa	(a)	Εφελκυστική αντοχή κύβου MPa	(b)	Εφελκυστική αντοχή εκ κάμψεως MPa	(b)
	Μέσος ορός	Τυπική απόκλιση	Μέσος ορός	Τυπική απόκλιση	Μέσος ορός	Τυπική απόκλιση
N00	26.3	2.4	2.3	0.7	4.1	0.2
R00	21.7	1.3	1.5	0.2	3.1	0.2
S00	37	1.4	2.4	0	4.2	0.7
N07	35.1	1	2.6	0.2	5.4	0.4
R07	37	1	2	0.4	5.1	0.2
S07	36.8	0.9	2.5	0.3	5.4	0.5
N12	41.8	2.1	2.2	0.1	6.1	0.4
R12	37	1.3	1.9	0.1	5.3	0.4
S12	42.9	1.3	2.1	0.4	6.1	0.3

(a) Από τουλάχιστον 5 δείγματα κάθε δοκού

(b) Από 3 δείγματα κάθε δοκού

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες σπλισμού διατμήσεως

Διάμετρος ράβδου mm	Όριο διαρροής MPa	Παραμόρφωση διαρροής mm/mm	Αντοχή αστοχίας MPa	Μέτρο ελαστικότητας GPa
8, test span	542	0.003	664	186
8, non-test span	573	0.003	655	183
20	576	0.003	707	179
25	537	0.003	669	180

Πίνακας 2.3 Ιδιότητες CFRP ράβδων

Διάμετρος mm	Εφελκυστική αντοχή MPa	Μέγιστη παραμόρφωση	Μέτρο ελαστικότητας GPa
10	2172	1.75%	124

Πίνακας 2.4 Ιδιότητες CFRP Μανδύα

Πάχος mm	Εφελκυστική αντοχή MPa	Μέγιστη παραμόρφωση	Μέτρο ελαστικότητας GPa
1	986	1%	95.8

2.3 Διαδικασία Διάβρωσης

Μετά από 28 ημέρες από την σκυροδέτηση το εξεταζόμενο τμήμα κάθε δοκού περιβλήθηκε με ανοξείδωτα μεταλλικά φύλλα και τοποθετήθηκε εντός πλαστικής δεξαμενής η οποία περιείχε διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl), περιεκτικότητας 3%. Το διάλυμα τοποθετήθηκε επάνω από τα μεταλλικά φυλά. Ακόμα τα μεταλλικά φύλλα συνδέθηκαν με το καθόδιο πηγής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος ενώ οι οπλισμοί διατήσεως των εξεταζόμενων τμημάτων συνδέθηκαν με τον θετικό πόλο της πηγής, η οποία είχε 12 ανεξάρτητους θετικούς πόλους. Τρεις διαφορετικές εντάσεις ρεύματος $140 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $185 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ χρησιμοποιήθηκαν για την διάβρωση του οπλισμού και για διαφορετικούς χρόνους σύμφωνα με τον νόμο του Faraday. Τα επιθυμητά ποσοστά διάβρωσης προέκυψαν μετρώντας την απώλεια μάζας του οπλισμού.

Πίνακας 2.5 Διαδικασία διάβρωσης

Κατηγορία δοκού	Χρόνος έκθεσης (10^6 s)	Ένταση ρεύματος ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Στοχευόμενη διάβρωση (%)
N07	2.006880	200	7
N12	4.579200	185	15
R07	1.995180	200	7
R12	6.065940	140	15
S07	1.998120	200	7
S12	4.251600	200	15



Σχήμα 2.3 Πειραματική διάταξη διάβρωσης οπλισμού

Πίνακας 2.6 Αποτελέσματα διάβρωσης

	Αρχική μάζα gr	Ένταση ρεύματος mA	Ένταση Πυκνότητας Ρεύματος μΑ/cm ²	Εναπομένουσα μάζα gr	Θεωρητικό επίπεδο διάβρωσης %	Πραγματικό επίπεδο διάβρωσης %	Μέσο πραγματικό επίπεδο διάβρωσης %
N07/1	688	89.6	200	641	7.6	6.8	6.4
N07/2	687	89.6	200	646	7.6	6.0	
N07/3	683	89.2	200	640	7.6	6.3	
R07/1	684	89.4	200	634	7.5	7.3	7.6
R07/2	693	90.5	200	642	7.5	7.4	
R07/3	688	89.9	200	633	7.5	8.0	
S07/1	686	89.3	200	640	7.5	6.7	6.0
S07/2	690	89.8	200	651	7.5	5.7	
S07/3	691	90.0	200	652	7.5	5.6	
N12/1	690	83.3	185	609	16.0	11.7	12.2
N12/2	689	83.3	185	611	16.0	11.3	
N12/3	700	83.3	185	605	15.8	13.6	
R12/1	688	189.0	140	612	15.9	11.0	12.3
R12/2	699	189.0	140	614	15.9	12.2	
R12/3	692	189.0	140	598	15.9	13.6	
S12/1	699	91.2	200	615	16.1	12.0	12.1
S12/2	686	89.3	200	614	16.0	10.5	
S12/3	687	89.5	200	592	16.0	13.8	

2.4 Φόρτιση

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετατοπίσεων μέχρι να επέλθει διατμητική αστοχία. Συγκεκριμένα ο ρυθμός επιβολής της μετατόπισης ήταν 0.1mm/λεπτό (ισοδύναμα με 3 KN/λεπτό) εξασφαλίζοντας στατική φόρτιση. Για τον έλεγχο του πειράματος τοποθετήθηκαν αισθητήρες φορτίου (load cells), επιμηκυνσιόμετρα και παραμορφωσιόμετρα σε χαρακτηριστικές θέσεις ώστε να μετρηθούν η τέμνουσα στις στηρίξεις, η μετατόπιση στο σημείο επιβολής του φορτίου, οι παραμορφώσεις των οπλισμών και των μέσων ενίσχυσης.

2.5 Μορφή Αστοχίας

Όλες οι μη ενισχυμένες δοκοί ανεξάρτητα από το ποσοστό διάβρωσης παρουσίασαν μια διατμητικού τύπου αστοχία με κεκλιμένες ρωγμές να τρέχουν από την στήριξη μέχρι το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Η γωνία κλίσης των κύριων ρωγμών ήταν περίπου 32° στον κορμό διαπερνώντας τον πρώτο (πιο κοντά στην στήριξη) και τον μεσαίο οπλισμό, ενώ στο πέλμα η γωνία ήταν 20° διαπερνώντας τον τρίτο διατμητικό οπλισμό. Η N12 είχε πιο μεγάλο εύρος ρωγμών σε σχέση με τις αντίστοιχες των N00, N07 γεγονός που εξηγείται στο ότι οι οπλισμοί διατμήσεως είχαν κατά μέσο όρο 12.2% διάβρωση που οδηγεί σε μειωμένη αντίσταση στο άνοιγμα ρωγμών.

Στο σχήμα 2.5 φαίνονται οι δοκοί ενισχυμένοι εσωτερικώς με ράβδους από ινοπλισμένα πολυμερή. Όπως οι μη ενισχυμένες δοκοί, έτσι και οι R00, R07, R12 αστοχούν σε διάτμηση με τις ρωγμές να εκτείνονται από την στήριξη στο σημείο επιβολής φορτίου. Ωστόσο σε αυτήν την κατηγορία οι ρωγμές είναι πιο κατανεμημένες. Όσο μεγαλώνει το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος οι ρωγμές είναι πιο κατανεμημένες και πιο περιορισμένες (Zakaria et al. 2009). Τέλος δεν υπήρχε καμία ένδειξη για αποκόλληση των ράβδων από το σκυρόδεμα.

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η τυπική μορφή αστοχίας μιας δοκού ενισχυμένης με μανδύα. Εκείνες οι δοκοί αστόχησαν εξαιτίας των κεκλιμένων ρωγμών που ξεκίνησαν στο πέλμα και συνέχισαν μέχρι το σημείο επιβολής του φορτίου. Η εξάπλωση των ρωγμών οδήγησαν στην αποκόλληση του μανδύα. Η πρόωρη αποκόλληση του μανδύα θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί εάν είχαν χρησιμοποιηθεί συμβατά συνθετικά υλικά για την αγκύρωση του μανδύα στο σκυρόδεμα. Αυτό θα αύξανε την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης και συνεπώς την φέρουσα διατμητική ικανότητα της δοκού (Eshwar et al. 2008. Mofidi et al. 2012b, Koutas and Triantafillou 2013).

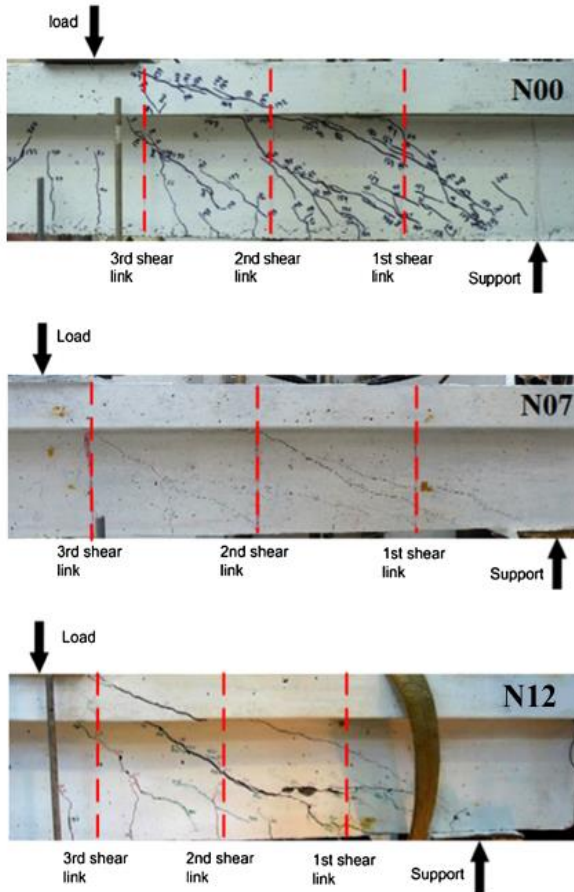
Σχετικά με τον οπλισμό, έχουμε δύο φάσεις απόκρισης. Αρχικά ο οπλισμός είναι ανενεργός και δεν συνεισφέρει στην διατμητική αντοχή, ενώ αργότερα από το φορτίο των 50-75 KN δημιουργούνται ρωγμές και ο οπλισμός αναπτύσσει όλο και μεγαλύτερη παραμόρφωση μέχρι την αστοχία. Η διακύμανση αυτή του φορτίου ενεργοποίησης οφείλεται στην διαφορετική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος κάθε δοκού όπως περιγράφεται στον πίνακα 2.1. Ο δεύτερος και ο τρίτος οπλισμός συνδετήρας

αναπτύσσουν μεγαλύτερη τάση από ότι ο πρώτος εξαιτίας των κύριων διατμητικών ρωγμών που τους τέμνει.

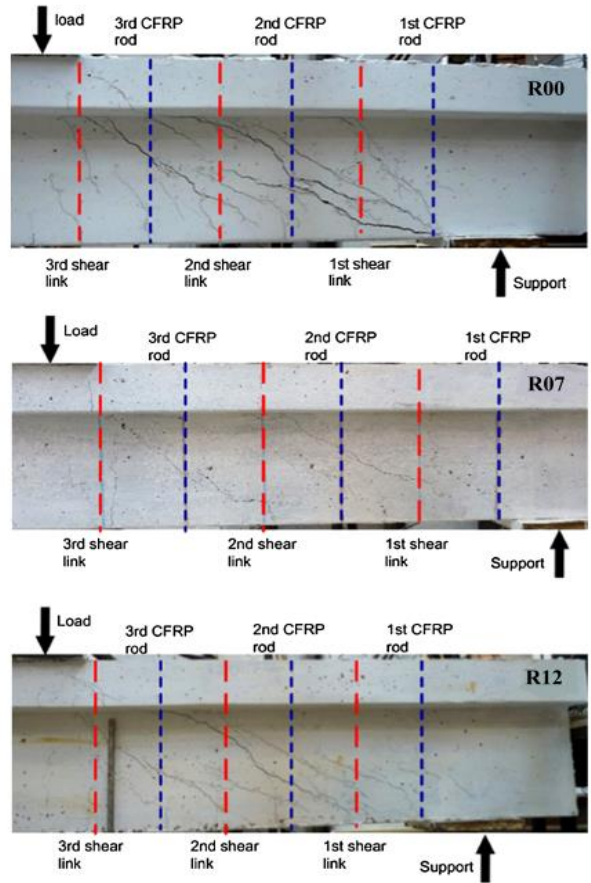
Η συμπεριφορά των CFRP ράβδων ενίσχυσης ήταν παρόμοια με εκείνη του οπλισμού με την διατμητική δύναμη που τους ενεργοποιεί να κυμαίνεται από 50 με 75 KN, ενώ η παραμόρφωση την στιγμή του οριακού φορτίου να κυμαίνεται από 0.0013-0.0033. Στην δοκό R12 η δεύτερη ράβδος ενίσχυσης αναπτύσσει την μεγαλύτερη παραμόρφωση για δεδομένο φορτίο καθώς βρίσκεται εντός της κύριας ρωγμής.

Η απόκριση του μανδύα χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη ο μανδύας παραμένει ανενεργός μέχρι το φορτίο των 50-75 KN, στην δεύτερη όπου αναπτύσσει εφελκυστικές τάσεις καθώς αντιστέκεται στο άνοιγμα των ρωγμών και στην τρίτη όπου ίνες του μανδύα ξεκινούν να αποκολλιούνται από το σκυρόδεμα. Στο οριακό φορτίο η παραμόρφωση ήταν 0.0013.

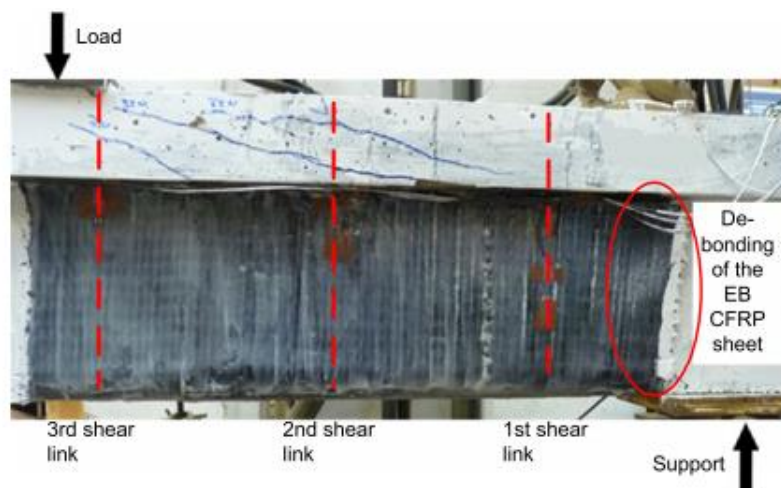
Τέλος για δεδομένη θέση ενίσχυσης και δεδομένο φορτίο, ο μανδύας αναπτύσσει μικρότερη παραμόρφωση από ότι η αντίστοιχη ράβδος ενίσχυσης, γεγονός που εξηγείται στο ότι πρώτον μανδύας είναι συνεχής, ενώ οι ράβδοι τοποθετούνται ανάμεσα στον υπάρχων διατμητικό οπλισμό και δεύτερον στο ότι ο μανδύας έχει μεγαλύτερη αξονική στιβαρότητα ανά μονάδα επιφάνειας (1533 MPa) σε σχέση με τις ράβδους (283MPa/ράβδος).



Σχήμα 2.4 Μη ενισχυμένες δοκοί



Σχήμα 2.5 Ενισχυμένες δοκοί με CFRP ράβδους



Σχήμα 2.6 Τυπική μορφή αστοχίας δοκού ενισχυμένη με μανδύα CFRP

2.6 Αποτελέσματα πειράματος

Οι εξεταζόμενες δοκοί έχουν διαφορετικές τιμές θλιπτικής αντοχής (κύβου) και ως εκ τούτου η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι άκυρη. Για τον λόγο αυτό η ονομαστική διατμητική τάση των δοκών V_{max}/b_wd στην αστοχία διαιρείται με την τετραγωνική ριζά της θλιπτικής αντοχής, η οποία είναι ένα μέτρο της διατμητικής αντοχής. Οι νέες τιμές των κανονικοποιημένων αντοχών $V_{max}/(b_wd\sqrt{f_c})$ διαιρούνται με την αντίστοιχη της N00 (0.76) έτσι ώστε να προκύψουν οι κανονικοποιημένες τάσεις σε σχέση με την N00.

Πίνακας 2.7 Αποτελέσματα πειράματος

Κατηγορία	Μέση θλιπτική αντοχή κύβου MPa	Συνολική τέμνουσα δύναμη στο εξεταζόμενο τμήμα KN	Κανονικοποιημένη διατμητική τάση στο αστοχίας	Κανονικοποιημένη διατμητική τάση σε σχέση με την N00	Παραμόρφωση αστοχίας mm	Είδος αστοχίας
N00	26.3	143	0.76	1.0	7.39	Διατμητική
N07	35.1	148	0.68	0.89	8.73	Διατμητική
N12	41.8	155	0.65	0.86	9.29	Διατμητική
R00	21.7	142	0.83	1.09	9.57	Διατμητική
R07	37.0	182	0.81	1.07	10.54	Διατμητική
R12	37.0	164	0.73	0.96	9.69	Διατμητική
S00	37.0	182	0.81	1.07	9.02	Διατμητική
S07	36.8	174	0.78	1.03	7.62	Διατμητική
S12	42.9	174	0.72	0.95	9.24	Διατμητική

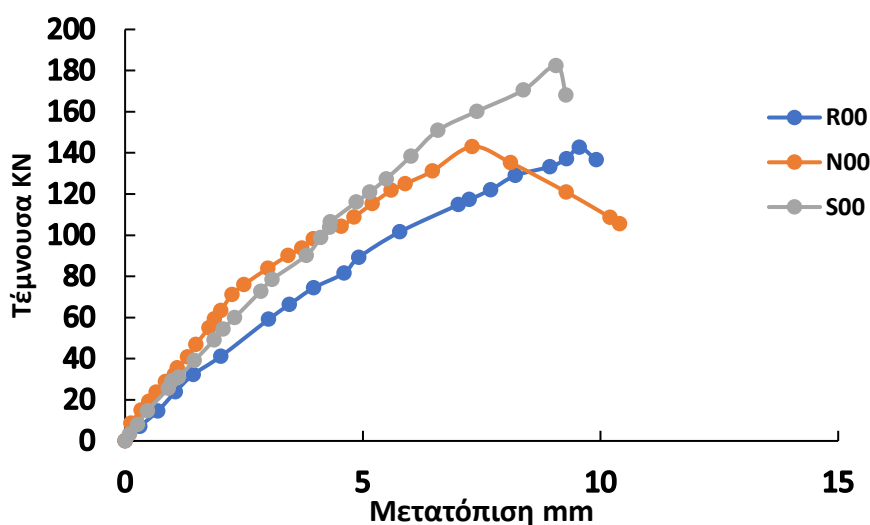
Η επίδραση του βαθμού διάβρωσης των συνδετήρων στην διατμητική αντοχή των μη ενισχυμένων δοκών μπορεί να εξαχθεί συγκρίνοντας τις κανονικοποιημένες τιμές.

- Η μη ενισχυμένη δοκός με 12% ποσοστό διάβρωσης είχε 14% λιγότερη αντοχή από την αντίστοιχη με 0%.
- Για διάβρωση 12% οι ενισχυμένες δοκοί είχαν περίπου 12% λιγότερη αντοχή από τις μη ενισχυμένες διαβρωμένες. Επιπλέον οι ενισχυμένες είχαν διατμητική αντοχή περίπου 4-5% λιγότερη από εκείνη των μη διαβρωμένων-μη

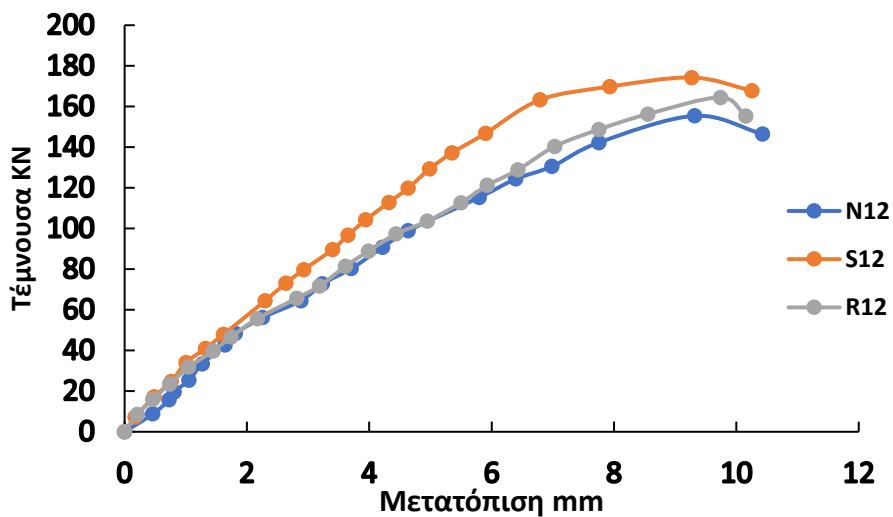
ενισχυμένων. Συνεπώς, τα ενισχυμένα συστήματα ήταν ανεπαρκή να φέρουν την διαβρωμένη δοκό 12% στο αρχικό επίπεδο.

- Η αποτελεσματικότητα των δυο μεθόδων ενίσχυσης μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό διάβρωσης.
- Το ποσοστό διάβρωσης δεν επιφέρει αλλαγή στην μέγιστη βύθιση των δοκών.
- Στις δοκούς που ενισχθήκαν με εξωτερικό μανδύα, οι συνδετήρες παρουσίασαν μεγαλύτερη στιβαρότητα και μικρότερη παραμόρφωση σε σύγκριση με τις δοκούς που ενισχθήκαν εσωτερικά με ράβδους.
- Η αποκόλληση του μανδύα οδήγησε σε περιορισμένη παραμόρφωσή του, λιγότερη από 0.0013. Αντίθετα, οι εσωτερικές ράβδοι δεν παρουσίασαν αποκόλληση και ανέπτυξαν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από 0.0013-0.0043.

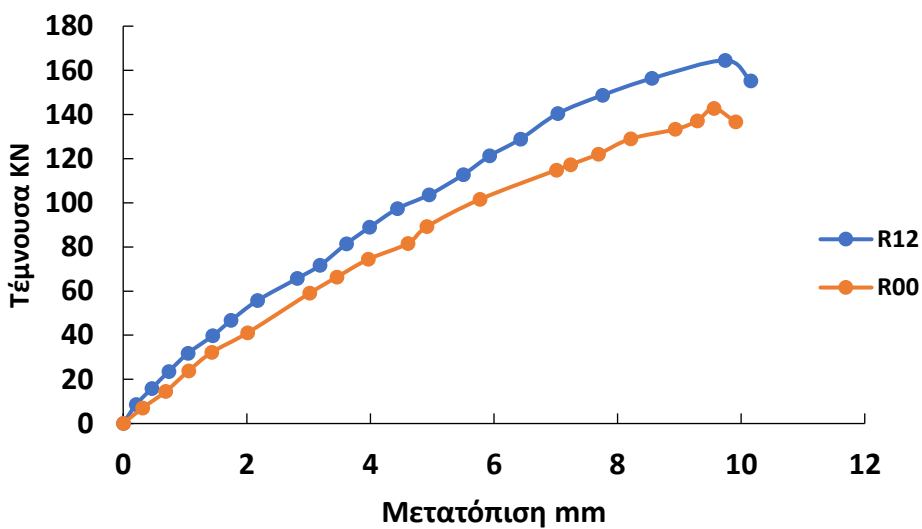
Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι καμπύλες ικανότητας των δοκών.



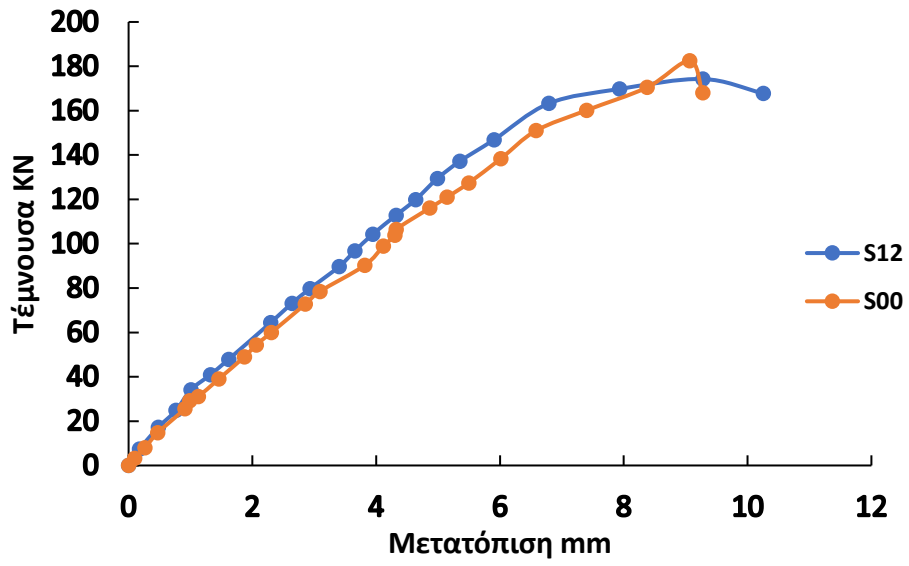
Σχήμα 2.7 Καμπύλες ικανότητας δοκών χωρίς διάβρωση



Σχήμα 2.8 Καμπύλες ικανότητας δοκών με διάβρωση $\Delta w=12\%$



Σχήμα 2.9 Σύγκριση καμπυλών ικανότητας ενισχυμένων δοκών με ράβδους CFRP με διάβρωση 0 και 12%



Σχήμα 2.10 Σύγκριση καμπυλών ικανότητας ενισχυμένων δοκών με μανδύα CFRP με διάβρωση 0 και 12%

3 Προσομοίωση

3.1 Concrete Damage Plasticity model (CDP)

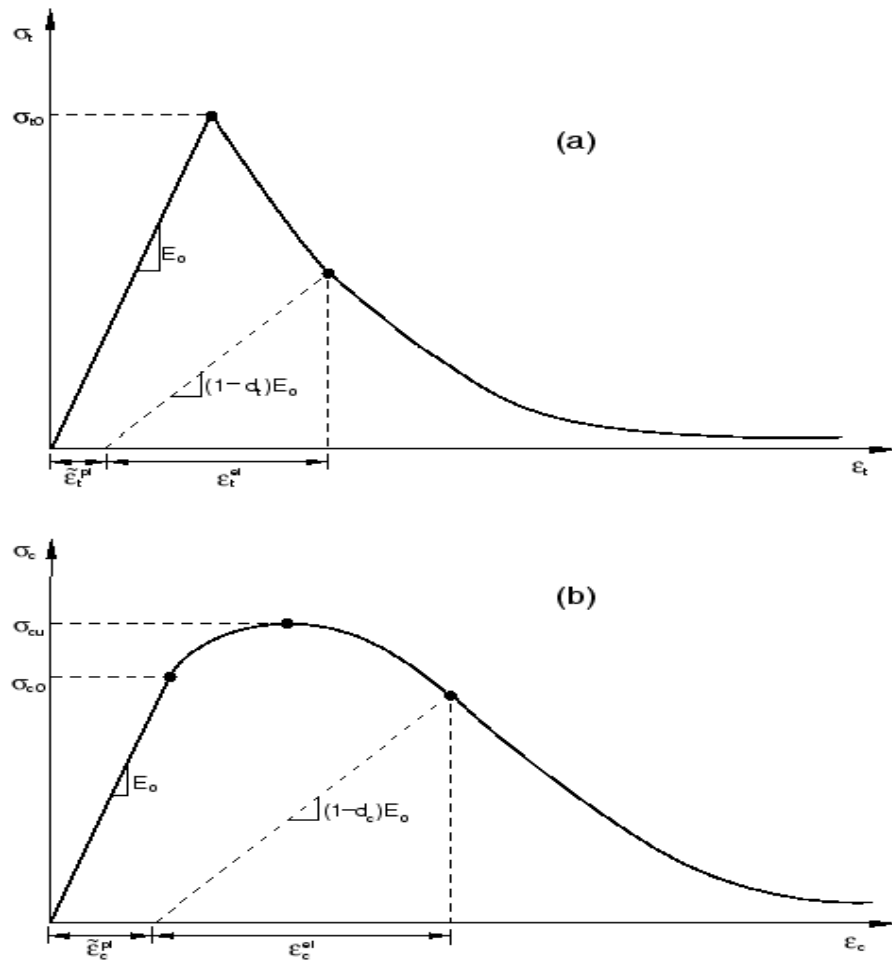
Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των μεθόδων ανάλυσης των κατασκευών, η πρόβλεψη των αποτελεσμάτων είναι πιο αξιόπιστη. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα δυνατό εργαλείο το οποίο συνεχώς χρησιμοποιείται σε αριθμητικές προσομοιώσεις, εξελίσσοντας τις μελέτες για τις δομοστατικές αναλύσεις.

Η συμπεριφορά των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι περιπλοκή εξαιτίας της από κοινού συνεργασίας του σκυροδέματος με τον οπλισμό. Η συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι ψαθυρή, ενώ αντίθετα ο χάλυβας συμπεριφέρεται πλάστιμα με σπάνιες περιπτώσεις να επέλθει θραύση του οπλισμού. Ως εκ τούτου το σκυρόδεμα προσομοιώνεται καλά με καταστατικά μοντέλα βλάβης, ενώ ο χάλυβας με καταστατικά μοντέλα πλαστικότητας. Παρόλα αυτά επειδή ο χάλυβας προσδίδει πλαστιμότητα η συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος προσομοιώνεται καλύτερα με ένα συνδυασμό των παραπάνω μοντέλων. Αυτά τα μοντέλα είναι κατάλληλα για μορφές αστοχίας είτε από ρωγμές λόγω εφελκυσμού είτε από σύνθλιψη.

Το Abaqus έχει τρία είδη μοντέλων: brittle cracking, concrete smeared cracking και Concrete Damaged Plasticity (CDP). Εν συντομία το brittle cracking χρησιμοποιείται για περιπτώσεις όπου το σκυρόδεμα είναι υπό εφελκυσμό. Για οποιαδήποτε θλιπτική φόρτιση το λογισμικό θεωρεί γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Το concrete smeared cracking χρησιμοποιείται για μονοτονική φόρτιση με χαμηλή περίσφιγξη. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το CDP model.

Το μοντέλο CDP προτάθηκε για μονοτονική, ανακυκλιζόμενη και δυναμική φόρτιση από τους Lubliner et al (1989) και βελτιώθηκε από τους Lee, Fenves (1998). Το μοντέλο παρουσιάζει αξιόπιστα αποτελέσματα για μονοαξονική ή διαξονική φόρτιση αλλά δεν είναι κατάλληλο για σημαντική τριαξονική φόρτιση.

Ακόμα η παρούσα εργασία θεωρεί την πλήρη συνεργασία και τέλεια συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού. Η διαδικασία αυτή προσομοιώνεται με την embedded element technique. Αυτή η μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα για μονοτονική φόρτιση. Αντίθετα για ανακυκλιζόμενη φόρτιση η μέθοδος είναι ανεπαρκής εξαιτίας της σχετικής ολίσθησης μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού.



Σχήμα 3.1 Καμπύλη αντοχής σκυροδέματος σε εφελκυσμό (a) και θλίψη (b)

Το μοντέλο CDP υποθέτει ότι οι δύο βασικές μορφές αστοχίας για το σκυρόδεμα είναι οι ρωγμές εξαιτίας του εφελκυσμού και θλίψης. Όπως φαίνεται στην εικόνα (a) ύστερα από την μέγιστη τάση εφελκυσμού παρατηρείται μια πτώση της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων. Αυτό αντιπροσωπεύει την δημιουργία μικρορωγμών στο σκυρόδεμα. Το ίδιο συμβαίνει και στην καμπύλη αντοχής σε θλίψη.

Το CDP θεωρεί την υποβάθμιση του μέτρου ελαστικότητας κατά την διάρκεια της φόρτισης-αποφόρτισης. Η υποβάθμιση αυτή γίνεται μέσω του συντελεστή βλάβης που εφαρμόζεται στο αρχικό μέτρο ελαστικότητας. Η συμπεριφορά σε μονοαξονική θλίψη και σε μονοαξονικό εφελκυσμό φαίνονται στα παραπάνω σχήματα όπου:

σ_{to} : Μέγιστη εφελκυστική αντοχή

E_o : Μέτρο ελαστικότητας

ε_{0t}^{el} : Ελαστική εφελκυστική παραμόρφωση

ε_t^{el} : Εφελκυστική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα μετά την αποφόρτιση, θεωρώντας την βλάβη

$\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$: Εφελκυστική παραμόρφωση στη ρηγμάτωση

$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$: Εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση

d_t : Συντελεστής βλάβης σε εφελκυσμό

d_c : Συντελεστής βλάβης σε θλίψη

σ_{cu} : Μέγιστη θλιπτική αντοχή

σ_{c0} : Αντοχή μέχρι το όριο ελαστικότητας

ε_{0c}^{el} : Θλιπτική ελαστική παραμόρφωση

ε_c^{el} : Θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα μετά την αποφόρτιση, θεωρώντας την βλάβη

$\tilde{\varepsilon}_c^{in}$: Θλιπτική ανελαστική παραμόρφωση

$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$: Θλιπτική πλαστική παραμόρφωση

Η εφελκυστική και η θλιπτική παραμόρφωση υπολογίζονται από τον νόμο του Hooke

$\varepsilon_{0t}^{el} = \sigma_t / E_0$ και $\varepsilon_{0c}^{el} = \sigma_c / E_0$ αντίστοιχα. Η εφελκυστική παραμόρφωση στη ρηγμάτωση υπολογίζεται από την συνολική εφελκυστική παραμόρφωση μείον την ελαστική,

$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el}$. Αντίστοιχα η ανελαστική θλιπτική παραμόρφωση υπολογίζεται από την συνολική θλιπτική μείον την ελαστική θλιπτική, $\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el}$. Η πλαστική παραμόρφωση σε εφελκυσμό και θλίψη, θεωρώντας τον συντελεστή βλάβης υπολογίζεται από το λογισμικό σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - d_t / (1 - d_t) * \sigma_t / E_0 \quad (3.1)$$

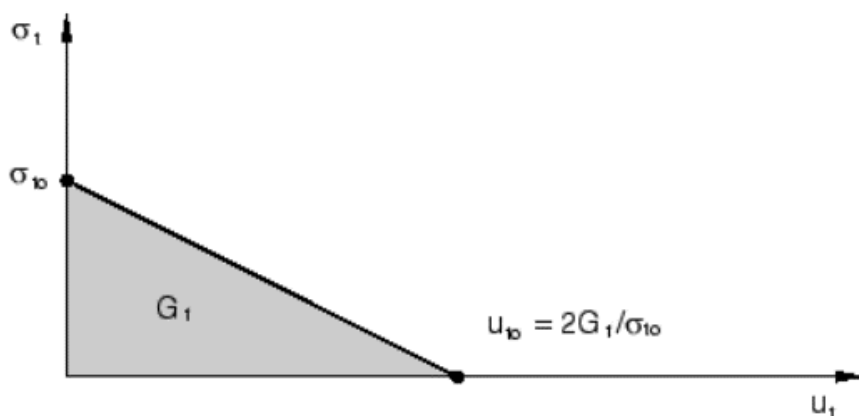
$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - d_c / (1 - d_c) * \sigma_c / E_0 \quad (3.2)$$

Εάν ο χρήστης δεν επιθυμεί να εισάγει την συμπεριφορά του σκυροδέματος σε όρους εφελκυστικών τάσεων - παραμορφώσεων, το λογισμικό του δίνει την δυνατότητα να

εισάγει την τάση διαρροής και την αντίστοιχη μετατόπιση. Εναλλακτικά, η εφελκυστική συμπεριφορά μπορεί να εξαχθεί από την ενέργεια θραύσης του σκυροδέματος G_f και την εφελκυστική αντοχή του σ_t . Η τελευταία μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Το Abaqus θεωρεί μια γραμμική πτώση της αντοχής μετά την ρωγμή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Το λογισμικό μετατρέπει αυτόματα τις τιμές της μετατόπισης την στιγμή της ρωγμής u_t^{ck} σε πλαστικές μετατοπίσεις u_t^{pl} σύμφωνα με την σχέση 3.3 λαμβάνοντας το μήκος του στοιχείου l_0 μονάδα. Η μετατόπιση στην ρηγμάτωση u_{t0} αντιστοιχεί στην πλήρη απώλεια αντοχής.

$$u_t^{pl} = u_t^{ck} - \frac{dt}{(1-dt)} \frac{\sigma_t l_0}{E_0} \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων - μετατοπίσεων

Η ενέργεια θραύσης ορίζεται ως η ενέργεια που χρειάζεται για τον σχηματισμό ρωγμής μοναδιαίας επιφάνειας. Στην βιβλιογραφία αναγράφονται πολλοί τύποι για τον υπολογισμό της ενέργειας θραύσης του άοπλου σκυροδέματος όπως αυτή κατά Model Code (Code 2010), $G_f=0.073f_{cm}^{0.18}$ (N/mm), όπου f_{cm} σε MPa ή ο τύπος $G_f=G_{f0}(f_{cm}/10)^{0.7}$ (CEB-FIP Model Code 90) όπου ο συντελεστής G_{f0} εξαρτάται από το μέγεθος των αδρανών και ισούται με $G_{f0}=0.026$ N/mm για διάμετρο αδρανούς $d=10$ mm. Έτσι για παράδειγμα ένα άοπλο σκυρόδεμα με αντοχή 30 MPa η ενέργεια θραύσης προκύπτει $G_f=0.135$ N/mm ή $G_f=0.056$ N/mm, αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται ο πρώτος τύπος για αναλύσεις χωρίς βαθμονόμηση (calibration).

Όμως το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερη ενέργεια θραύσης εξαιτίας του οπλισμού (Bulent Mercan, Arturo E.Schultz). Ακόμα η ενέργεια θραύσης εξαρτάται από το μέγεθος των αδρανών και την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Έτσι λόγω της εξάρτησης δεν υπάρχει κοινή αποδεκτή τιμή, οπότε είναι σημαντικό να καταλάβουμε πως διαφορετικές τιμές επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Για το άοπλο σκυρόδεμα ο τρόπος υπολογισμού της ενέργειας θραύσης είναι οι δοκιμές του μονοαξονικού εφελκυσμού και το πείραμα της κάμψης των τριών σημείων. Στον μονοαξονικό εφελκυσμό η Gf υπολογίζεται ολοκληρώνοντας το εμβαδόν που περικλείεται του διαγράμματος εφελκυστικών τάσεων – μετατόπισης κατά την ρωγμή σύμφωνα με την εξίσωση

$$Gf = \int_0^{\delta_{max}} \sigma_t d\delta_t \quad (3.4)$$

όπου σ_t είναι η εφελκυστική τάση συναρτήσει της μετατόπισης, δ_t η μετατόπιση κατά την ρωγμή και δ_{max} η μέγιστη μετατόπιση στην ρηγμάτωση.

Ωστόσο η δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό. Μια πιο απλή μέθοδος για τον υπολογισμό της ενέργειας θραύσης βασίζεται στο συνολικό έργο που παράγεται στην δοκό κατά την ρηγμάτωση υποβαλλομένη σε δοκιμή κάμψης των τριών σημείων. Η ενέργεια θραύσης ισούται με το έργο που απαιτείται να ρηγματωθεί η δοκός K_f διαιρεμένη με την επιφάνεια της ρωγμής $b(d-a_0)$ όπου b και d είναι το πλάτος και το ύψος του δοκιμίου και a_0 το μέγεθος της ρωγμής.

$$Gf = \frac{k_f}{b(d-a_0)} \quad (3.5)$$

Οι κατάλληλες τιμές της ενέργειας θραύσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην σύγκλιση των αναλύσεων σε εφαρμογές με το Abaqus/Standard. Συγκεκριμένα αν δοθεί πολύ μικρή τιμή η λύση δεν μπορεί να συγκλίνει αμέσως μετά την ρηγμάτωση. Αντίθετα εισάγοντας πολύ μεγάλες τιμές προκύπτει μια μικρή διαφοροποίηση των λύσεων. Αυτή η παρατήρηση ερμηνεύεται στο ότι η συνεισφορά της αντοχής του σκυροδέματος που βρίσκεται σε εφελκυσμό στην συνολική ικανότητα του μέλους είναι μικρή σε σχέση με την συνεισφορά του οπλισμού και του σκυροδέματος σε θλίψη. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται η τιμή $Gf=1$ N/mm για την βαθμονόμηση του μοντέλου.

Στο CDP μοντέλο απαιτείται να δοθούν κάποιες παράμετροι για να περιγράψουν την καμπύλη διαρροής. Αυτές είναι ο λόγος poisson ν , η γωνιά τριβής ψ , η εκκεντρότητα ϵ , η παράμετρος K_c , η παράμετρος ιξώδους μ και ο λόγος μεταξύ της διαξονικής και μονοαξονικής θλίψης σ_{b0}/σ_{c0} . Πιο ειδικά ο λόγος poisson ν ελέγχει την ογκομετρική αλλαγή του σκυροδέματος για τάση κάτω από την κρίσιμη, η οποία είναι το όριο της ελαστικής συμπεριφοράς. Μόλις η τάση φτάσει την κρίσιμη τιμή το σκυρόδεμα παρουσιάζει μια αύξησή στην πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση (Chen,1982). Αυτή η συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη προσδιορίζοντας την γωνία τριβής. Στο Abaqus η γωνία τριβής ψ , ορίζεται επίπεδο p-q όπου ϵ είναι η εκκεντρότητα της επιφάνειας πλαστικής διαρροής η οποία καθορίζει τον ρυθμό που η συνάρτηση προσεγγίζει την ασυμπτωματική. Η παράμετρος K_c είναι ο λόγος $\frac{I_{2t}}{I_{2c}}$, όπου I_{2t} είναι 2^η αναλλοίωτη του τανυστή των τάσεων υπό καθαρό τρισδιάστατο εφελκυσμό και I_{2c} είναι η 2^η αναλλοίωτη του τανυστή των τάσεων υπό καθαρή τρισδιάστατη θλίψη. Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται η προεπιλεγμένη τιμή του Abaqus $K_c=0.667$ (κριτήριο αστοχίας κατά Rankine). Εάν $k_c=1$ η επιφάνεια διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο ταυτίζεται με εκείνη των Drucker-Prager για υψηλή περίσφιξη. Ακόμα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι $0.5 < K_c < 1$. Τέλος χρειάζεται η παράμετρος ιξώδους μ η οποία βοηθάει στην βελτίωση της σύγκλισης του μοντέλου επιτρέποντας τις τάσεις να βρίσκονται εκτός της επιφάνειας διαρροής. Στον πίνακα 3.1 αναφέρονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις,

Πίνακας 3.1 Τιμές παραμέτρων μοντέλου CDP

Λόγος Poisson ν	Γωνία εσωτερικής τριβής ψ	Εκκεντρότητα ϵ	K_c	σ_{b0}/σ_{c0}	Παράμετρος ιξώδους μ
0.2	30°, 40°, 55°	0.1	0.667	1.16	0.0001, 0.001

Η επιφάνεια διαρροής στο CDP μοντέλο περιγράφεται από την εξίσωση:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta (\bar{\epsilon}^{pl}) < \sigma_{max} > - \gamma < -\sigma_{max} >) - \bar{\sigma}_c (\bar{\epsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (3.6)$$

όπου \bar{q} είναι η ισοδύναμη τάση Von Mises, \bar{p} είναι η υδροστατική πίεση, α , β αδιάστατοι αριθμοί που περιγράφονται παρακάτω και σ_{max} είναι η αλγεβρικά μέγιστη κύρια ενεργός τάση. Ο συμβολισμός $< >$ αντιπροσωπεύει την συνάρτηση Macaulay όπου $< \chi > = (|\chi| + \chi) / 2$. Η παράμετρος γ ενεργοποιείται μόνο σε καταστάσεις

τριαξονικής θλίψης, όπου η σ_{\max} είναι αρνητική. Τα $\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})$ και $\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})$ είναι η ενεργός θλιπτική και εφελκυστική τάση συνοχής αντίστοιχα (effective compressive/tensile cohesion stress), ενώ $\bar{\sigma}$ η ενεργός τάση (effective stress)

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (3.7)$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{2}{3} \bar{s} : \bar{s}} \quad (3.8)$$

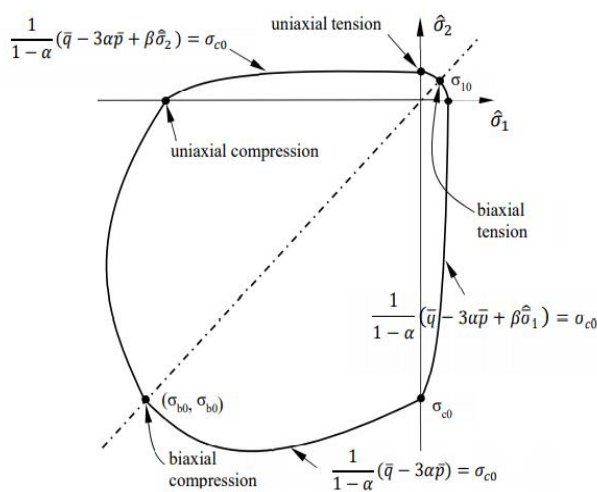
$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \bar{\sigma} : I \quad (3.9)$$

$$\bar{s} = \bar{p}I + \bar{\sigma} \text{ είναι η αποκλίνουσα του τανυστή των τάσεων } \bar{\sigma} \quad (3.10)$$

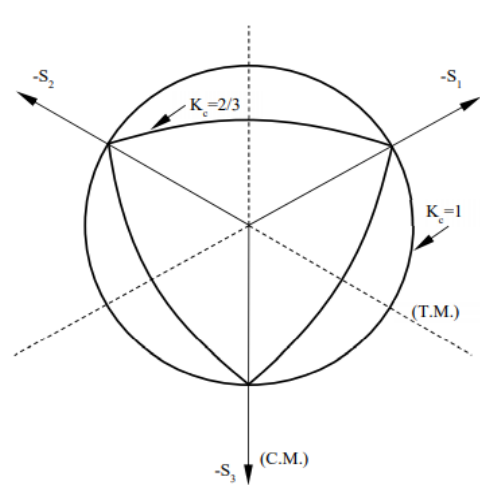
$$\alpha = \frac{\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} - 1}{2\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} - 1\right)} \quad 0 < \alpha < 0.5 \quad (3.11)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (3.12)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - k_c)}{2k_c - 1} \quad (3.13)$$



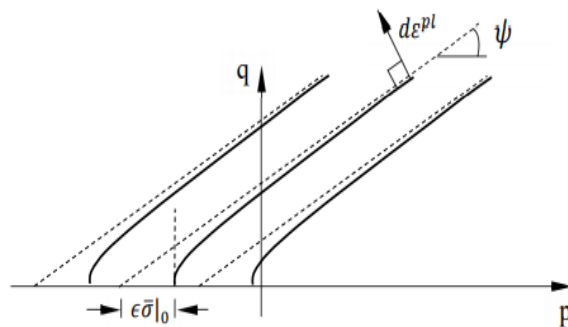
Σχήμα 3.3 Διάγραμμα αντοχής σκυροδέματος σε διαξονική ένταση



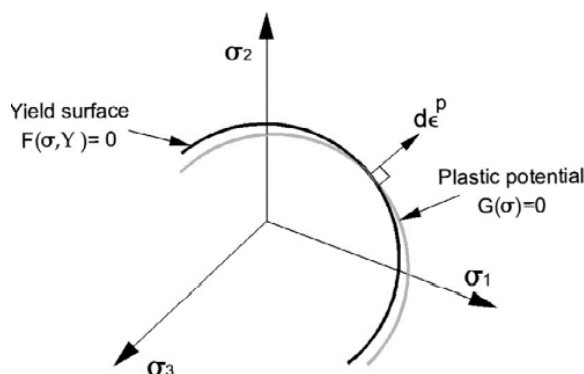
Σχήμα 3.4 Επιφάνεια διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο

Η συνάρτηση ροής του δυναμικού που χρησιμοποιείται στο Abaqus είναι :

$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (3.14)$$



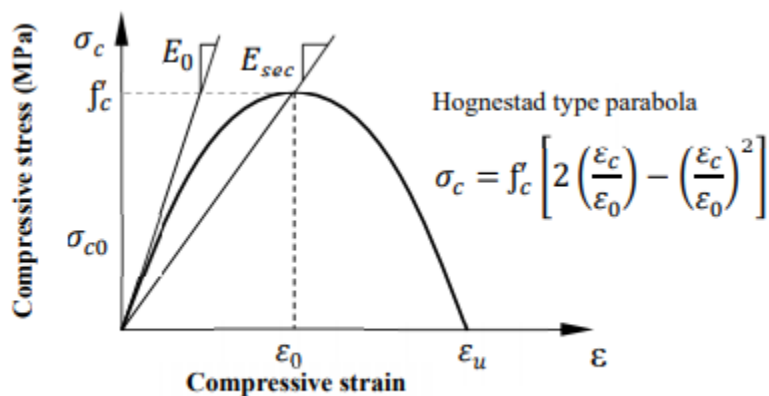
Σχήμα 3.5 Συνάρτηση ροής δυναμικού στο αποκλίνον επίπεδο



Σχήμα 3.6 Επιφάνεια διαρροής και επιφάνεια δυναμικού στο επίπεδο των κυρίων τάσεων

3.2 Θλίψη

Η καμπύλη που περιγράφει την συμπεριφορά του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη στην παρούσα εργασία είναι η παραβολή του Hognestad (1951). Στην βιβλιογραφία υπάρχουν και άλλες εξισώσεις όπως Hsu Hsu, 1994, Nayal and Rasheed 2006, Hordijk, 1992, du Beton, 1993. Σύμφωνα με την παραβολή του Hognestad, f_c είναι η μέγιστη θλιπτική αντοχή η οποία στις αναλύσεις που ακολουθούν λαμβάνεται ίση με τη μέση θλιπτική αντοχή της κάθε δοκού όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1 στο κεφάλαιο 2. Το μέτρο ελαστικότητας E_0 μπορεί να ληφθεί ίσο με $E_0=5500\sqrt{f_c}$ (MPa), κατά Genikomsou and Polak (2015). Το σκυρόδεμα παραμένει στην ελαστική περιοχή μέχρι το $0.4f_c$. Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_{sec} ισούται με $E_{sec}=5000\sqrt{f_c}$ (MPa) και η παραμόρφωση στην μέγιστη θλιπτική αντοχή είναι $\epsilon_0=f_c/E_{sec}$, η οποία λαμβάνεται ίση με 0.002.

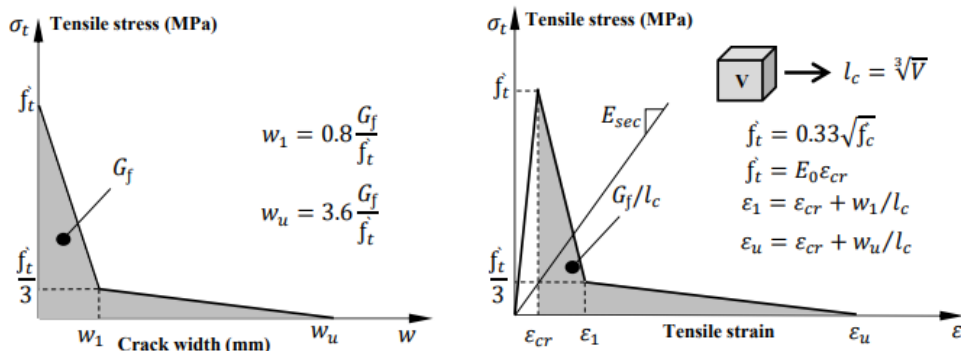


Σχήμα 3.7 Καταστατικός νομός σκυροδέματος σε θλίψη, παραβολή Hognestad

Σύμφωνα με τον ευρωκωδικα 2 (Institution, 2004) η ελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος εξαρτάται και από το τύπο των αδρανών. Ένα σκυρόδεμα με αντοχή 16 MPa με χαλαζίτη για αδρανή έχει ένα τέμνον μέτρο ελαστικότητας 29 GPa. Για σκυρόδεμα με ασβεστόλιθο ή ψαμμίτη η τιμή πρέπει να μειωθεί στο 10% και στο 30% αντίστοιχα. Ένα σκυρόδεμα με βασάλτη η τιμή πρέπει να αυξηθεί κατά 30%.

3.3 Εφελκυσμός

Για την εφελκυστική συμπεριφορά, το σκυρόδεμα παραμένει ελαστικό μέχρι την μέγιστη εφελκυστική αντοχή f_t . Μετά σύμφωνα με την Genikomsoy and Polak 2005, χρησιμοποιείται μια διγραμμική καμπύλη σύμφωνα με την καμπύλη μονοαξονικής εφελκυστικής τάσης- εύρος ρωγμής και της ενέργειας θραύσης του σκυροδέματος G_f . Ως εφελκυστική αντοχή στις αναλύσεις που ακολουθούν λαμβάνουμε τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα 2.1.



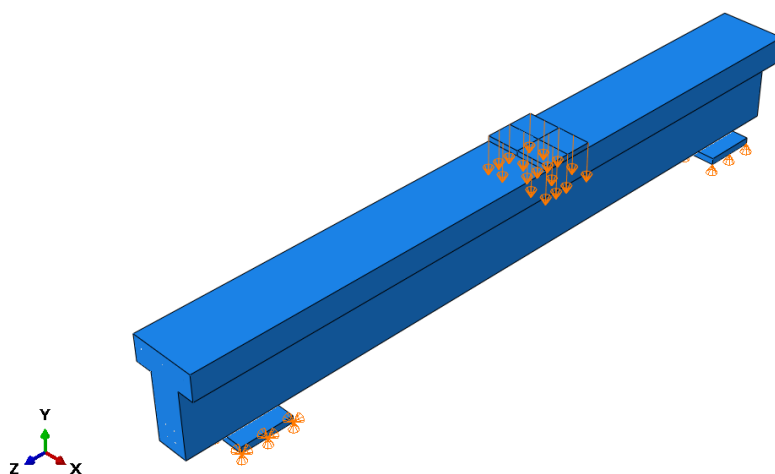
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα τάσεων - εύρους ρωγμής και τάσεων - παραμορφώσεων

3.4 Φόρτιση

Πραγματοποιήθηκε μη γραμμική στατική ανάλυση με έλεγχο των μετατοπίσεων. Η μέγιστη μετατόπιση που δόθηκε ήταν αυτή των 13 mm, μεγαλύτερη από την μετατόπιση αστοχίας των πειραμάτων. Το Abaqus χρησιμοποιεί για αλγορίθμους επίλυσης την Newton, modified Newton καθώς και την quasi Newton. Το μη γραμμικό πρόβλημα επιλύεται με μια επαναληπτική διαδικασία όπου η επιβαλλομένη μετατόπιση u_{max} διαιρείται με βάση έναν αριθμό προσαυξητικών βημάτων N_{incr} , σε $\Delta u = u_{max}/N_{incr}$ και σε κάθε βήμα λύνεται η εξίσωση

$${}^{t+\delta t}K {}^{t+\delta t}U = {}^{t+\delta t}\lambda P_0 \quad (3.15)$$

όπου K το μητρώο στιβαρότητας, U το μητρώο μετατοπίσεων, P_0 το μητρώο των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων και λ ο επαυξητικός συντελεστής

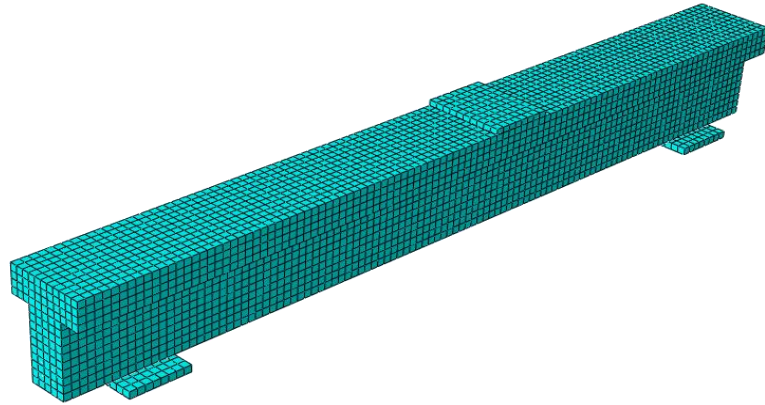


Σχήμα 3.9 Συνοριακές συνθήκες στήριξης και φόρτιση δοκού

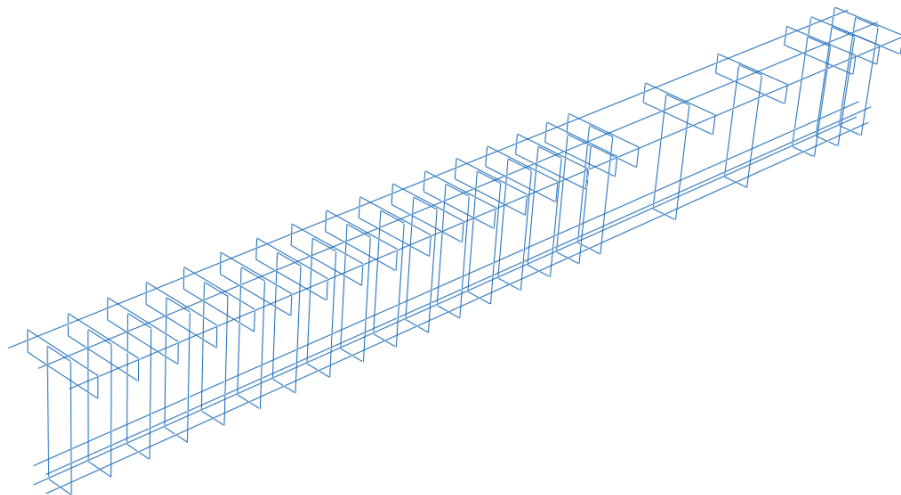
3.5 Προσομοίωση στο Abaqus

Το σκυρόδεμα προσομοιώθηκε με 3D στερεά (solid), συνεχή (continued), εξαεδρικά (8κομβικά) πεπερασμένα στοιχεία C3D8 με μέγεθος 25 mm, 11556 στο σύνολο. Ο οπλισμός προσομοιώθηκε με στοιχεία δικτυώματος T3D2, δηλαδή στοιχεία 2 κόμβων με 3D stress, και συγκεκριμένα ο διαμήκης οπλισμός με 108 στοιχεία, οι συνδετήρες με 22 στοιχεία, οι ράβδοι CFRP με 14 στοιχεία και τέλος ο μανδύας με 825 μεμβρανικά στοιχεία M3D4R (reduced integration). Οι πλάκες στήριξης και επιβολής φορτιού προσομοιωθήκαν με 3D στοιχεία. Η κοινή συνεργασία οπλισμού και σκυροδέματος

επιτυγχάνεται με την embedded constraint, ενώ η συνεργασία σκυροδέματος και μανδύα επιτυγχάνεται με tie constraint.



Σχήμα 3.10 Διακριτοποίηση δοκού

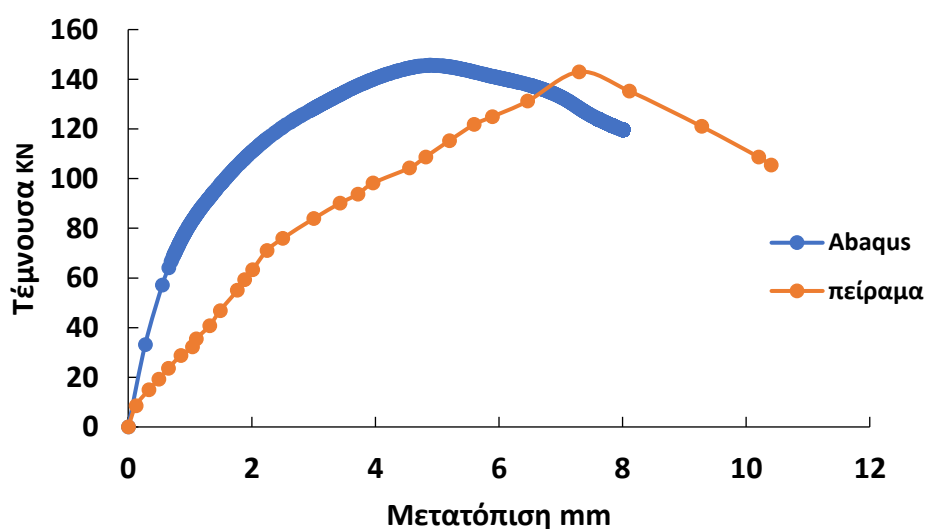


Σχήμα 3.11 οπλισμός

4 Αποτελέσματα ανάλυσης για ποσοστό διάβρωσης 0%

4.1 Δοκός χωρίς ενίσχυση και χωρίς διάβρωση, N00

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της δοκού χωρίς ενίσχυση και 0% διάβρωση, N00. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι καμπύλες αντοχής σε όρους διατμητικής δύναμης (KN) του εξεταζόμενου τμήματος και βύθισης (mm) της δοκού του πειράματος και η αντίστοιχη της προσομοίωσης, ενώ στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι τιμές διαφορών παραμέτρων του μοντέλου CDP. Παρατηρούμε ότι με την ανάλυση αυτή πετυχαίνουμε την εύρεση του οριακού φορτιού, καθώς αυτό εξαρτάται από τις αντοχές των υλικών, αλλά δεν προσομοιώνουμε την πραγματική συμπεριφορά της δοκού. Ο λόγος είναι ότι πρέπει να μειώσουμε το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, ώστε να λάβουμε υπόψη την ρηγμάτωση και την μείωση της δυσκαμψίας, ενώ χρειάζεται επίσης και κατάλληλη βαθμονόμηση (calibration) των παραμέτρων του καταστατικού μοντέλου CDP.



Σχήμα 4.1 Καμπύλη ικανότητας μοντέλου N00, χωρίς βαθμονόμηση

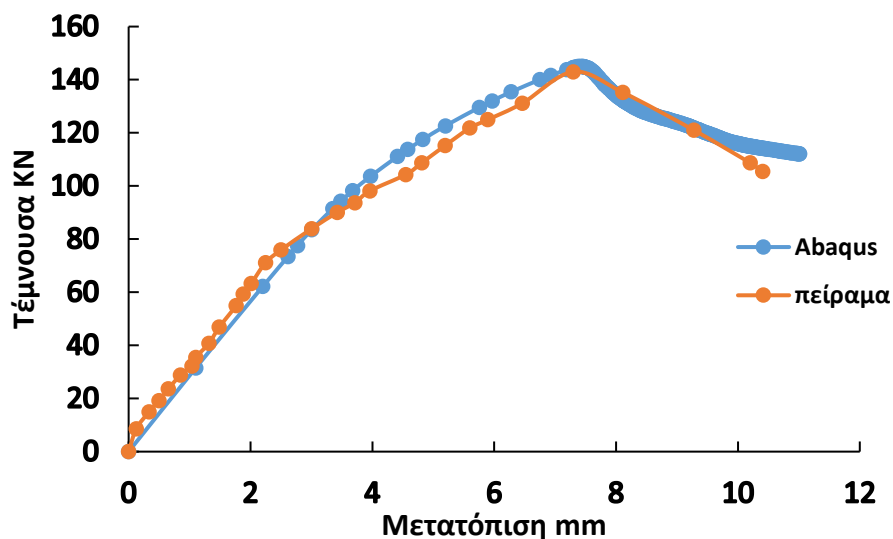
Τροποποιώντας το μέτρο ελαστικότητας E , την ενέργεια θραύσης G_f και την γωνία εσωτερικής τριβής ψ , παίρνουμε την καμπύλη ικανότητας του σχήματος 4.2, ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Βλέπουμε ότι οι δυο καμπύλες είναι αρκετά κοντά, έχουμε πιάσει το μέγιστο οριακό φορτίο και την αντίστοιχη μετατόπιση, ενώ η αρχική κλίση των διαγραμμάτων σχεδόν ταυτίζεται. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί

η μεγάλη διαφοροποίηση του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ πειράματος (28.2 GPa) και ανάλυσης (4 GPa). Ο λόγος είναι ότι το λογισμικό χρησιμοποιεί ένα μέτρο ελαστικότητας, τόσο στη θλίψη όσο και στον εφελκυσμό, όπως συμβαίνει στα ισότροπα υλικά. Το σκυρόδεμα όμως είναι ανισότροπο οπότε επιλέγεται μείωση του μέτρου ελαστικότητας της τάξης του 85%. Τέτοια τάξη μεγέθους μείωση στο μέτρο ελαστικότητας είναι σε όλες τις αναλύσεις στην παρούσα εργασία. Η τροποποίηση αυτή είναι σύμφωνη με τον κανονισμό ο οποίος υποχρεώνει να λαμβάνεται υπόψη η ενεργός δυσκαμψία $(EI)_{\text{eff}}$ εξαιτίας της ρηγμάτωσης. Επίσης παρατηρούμε ότι μέχρι τα 80 KN, περίπου, η κλίσεις των διαγραμμάτων είναι ίδια, ενώ μετά υπάρχει μια απόκλιση, γεγονός που δηλώνει ότι η δοκός της προσομοίωσης είναι πιο στιβαρή από του πειράματος έναντι ρηγμάτωσης. Τέλος η εύρεση του καθοδικού κλάδου είναι δύσκολο να βρεθεί με τις κλασικές μεθόδους και απαιτείται προχωρημένη ανάλυση.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα μοντέλου N00 χωρίς βαθμονόμηση

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος MPa	26.3
Εφελκυστική αντοχή MPa	3.0
Μέτρο ελαστικότητας GPa	28.2
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.131
Γωνία εσωτερικής τριβής ψ	30°
Μέγιστη τέμνουσα στο εξεταζόμενο τμήμα KN	145.6
Βύθιση mm	4.9

Υπενθύμιση: $E=5500\sqrt{f_c}$, MPa $Gf=0.073f_c^{0.18}$, f_c σε MPa, Gf σε N/mm

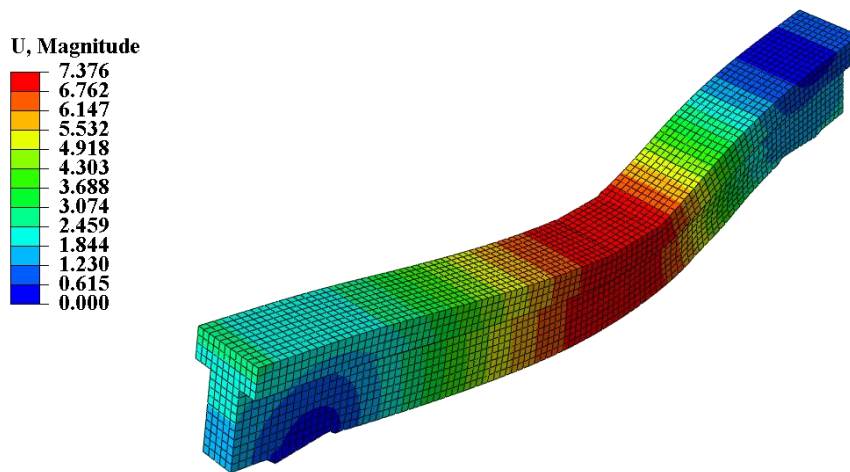


Σχήμα 4.2 Σύγκριση καμπύλων ικανότητας μοντέλου N00 με βαθμονόμηση

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα μοντέλου N00 με βαθμονόμηση

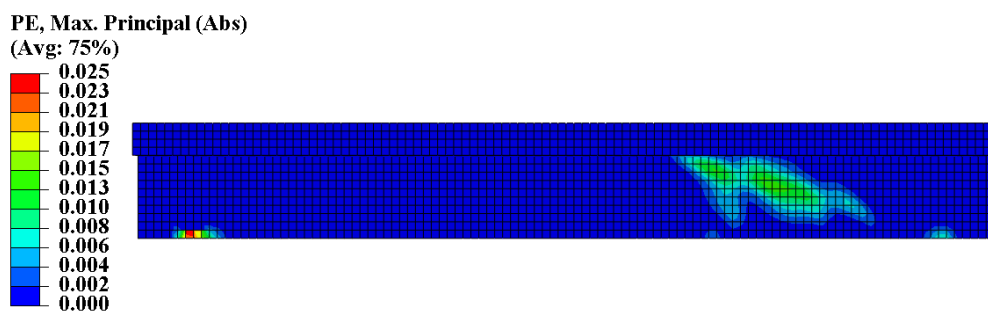
	Πείραμα	Abaqus
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	28.2	4.0
Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	2.3/4.1	3.0
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.131	1.0
Γωνία εσωτερικής τριβής ψ	30°	55°
Βύθιση (mm)	7.39	7.49
Συνολική Τέμνουσα δύναμη (KN)	143	144.79

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται η παραμόρφωση της δοκού στην αστοχία.

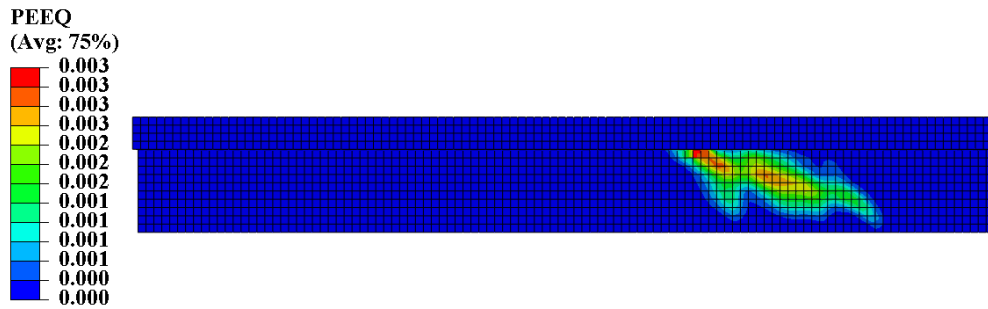


Σχήμα 4.3 Παραμόρφωση δοκού στην αστοχία μοντέλου N00

Βασικά χαρακτηριστικά που αξίζει να απεικονισθούν είναι οι πλαστικές παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα, PE και οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, PEEQ, την στιγμή της αστοχίας. Συγκεκριμένα στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (plastic equivalent strain, PEEQ) η οποία είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που δείχνει την ανελαστική παραμόρφωση του υλικού. Παρατηρούμε ότι η πλαστικότητα συσσωρεύεται στο εξεταζόμενο τμήμα καθώς εκεί οι οπλισμοί διατμήσεως είναι πιο αραιοί, ανά 275 mm, σε αντίθεση με το μη εξεταζόμενο όπου οι οπλισμοί διατάσσονται ανά 100 mm, ενώ η μέγιστη πλαστικότητα αναπτύσσεται στην αριστερή στήριξη εξαιτίας της μεγάλης αντίδρασης .

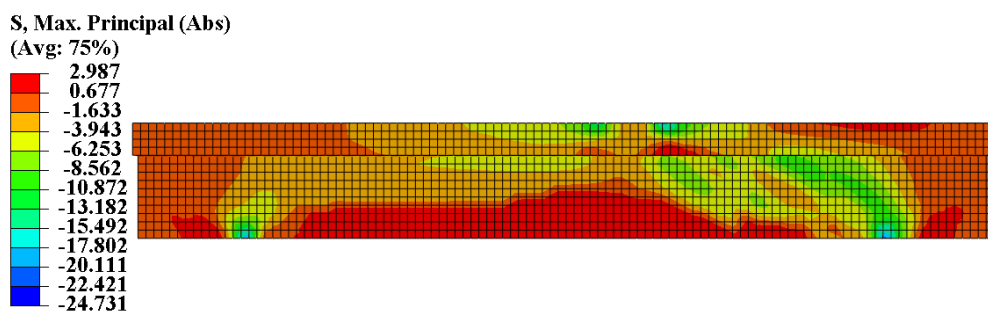


Σχήμα 4.4 Πλαστική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα, PE, μοντέλου N00

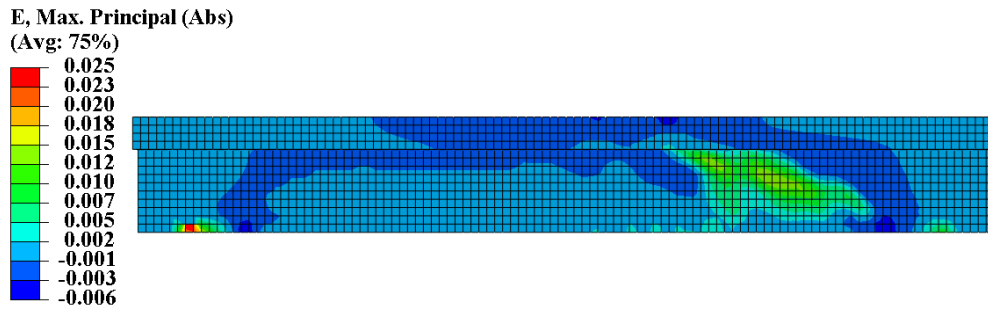


Σχήμα 4.5 Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, PEEQ, μοντέλου N00

Στα σχήματα 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι κυρίες τάσεις και οι κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα αντίστοιχα την στιγμή της αστοχίας, οι οποίες μας βοηθούν να καταλάβουμε την τροχιά των κύριων θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων και ως εκ τούτου να αντιληφθούμε το άνοιγμα των ρωγμών. Παρατηρούμε την αναμενομένη συμπεριφορά δοκού υποβαλλομένη σε συγκεντρωμένο φορτίο.

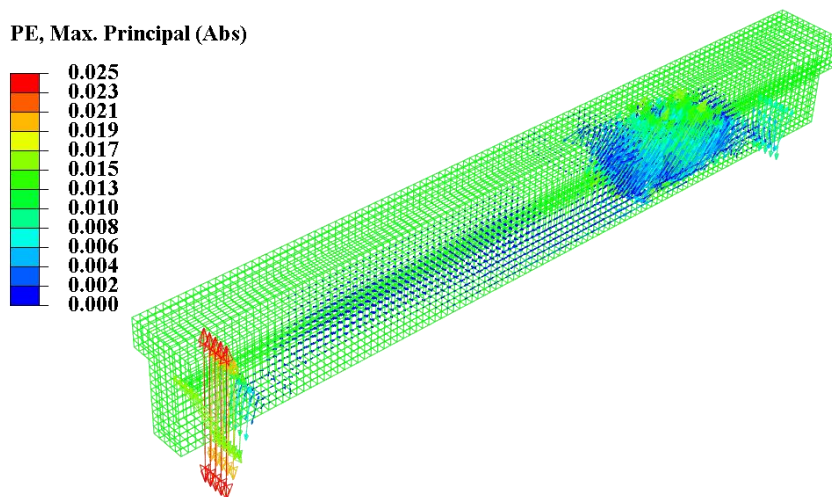


Σχήμα 4.6 Μέγιστες κύριες τάσεις στο σκυρόδεμα μοντέλου N00



Σχήμα 4.7 Μέγιστες κύριες παραμορφώσεις σκυροδέματος μοντέλου N00

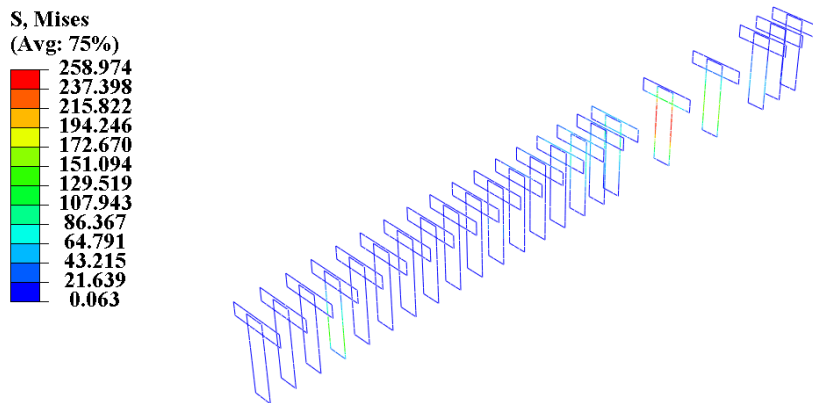
Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η τροχιά των κύριων πλαστικών παραμορφώσεων στην δοκό. Παρατηρούμε ότι στις στηρίξεις οι τροχιές είναι κάθετες, εξαιτίας των εκεί αντιδράσεων, ενώ στο εξεταζόμενο τμήμα έχουν μια κλίση η οποία συνάδει με τις αρχές της μηχανικής.



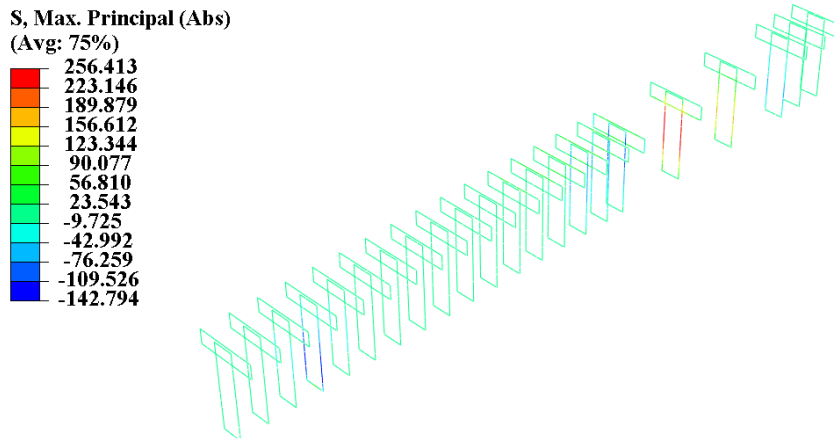
Σχήμα 4.8 Τροχιά κύριων εφελκυστικών παραμορφώσεων

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises του οπλισμού. Για λόγους σαφήνειας, στην εικόνα δεν διακρίνονται οι διαμήκεις οπλισμοί παρά μόνο οι συνδετήρες, μιας και στο πείραμα η δοκός αστοχεί διατμητικά. Παρατηρούμε ότι ο

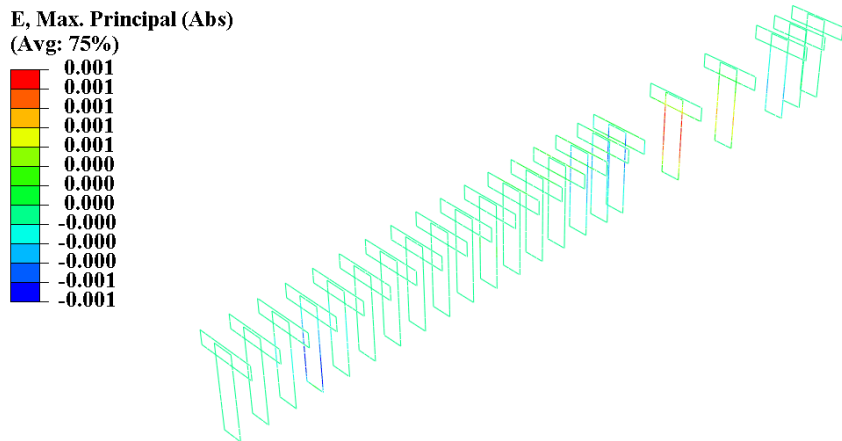
οπλισμός δεν έχει διαρρεύσει, ενώ η μέγιστη τάση είναι περίπου 259 MPa, η οποία αναπτύσσεται στα σκέλη του μεσσαίου συνδετήρα του εξεταζόμενου τμήματος.



Σχήμα 4.9 Τάσεις Von Mises οπλισμού μοντέλου N00



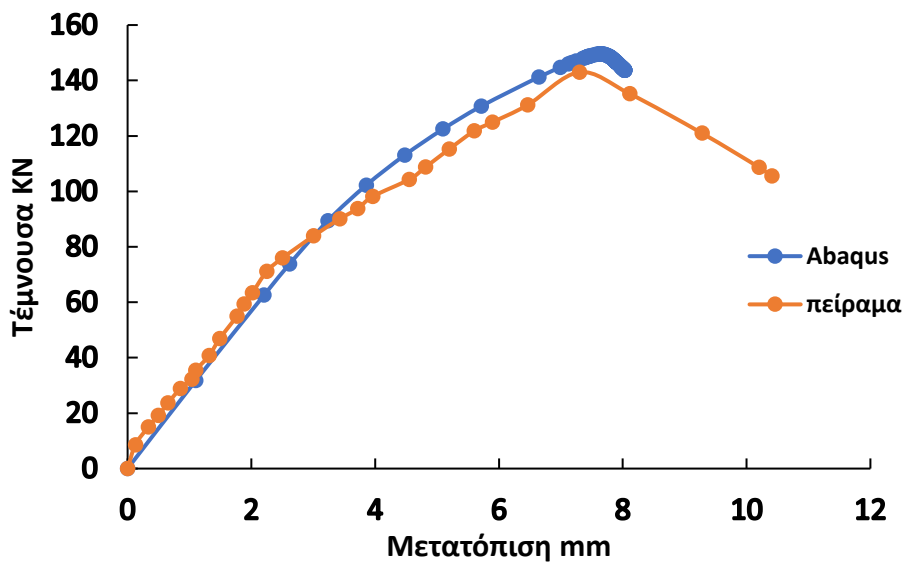
Σχήμα 4.10 Αναπτυσσόμενες τάσεις στον οπλισμό μοντέλου N00



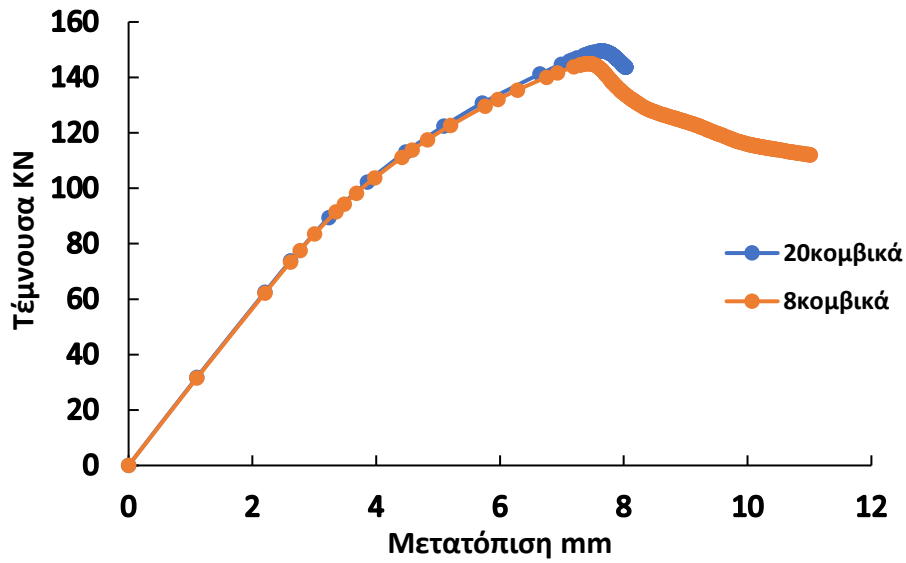
Σχήμα 4.11 Παραμορφώσεις οπλισμού μοντέλου N00

4.1.1 Ανάλυση μοντέλου N00 με C3D20R στοιχεία

Εκτός από την ανάλυση με δκομβικά πεπερασμένα (C3D8) πραγματοποιήθηκε επίσης ανάλυση με 20κομβικά δευτέρας τάξεως (quadratic) πεπερασμένα μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration). Όλες οι άλλες παράμετροι παρέμειναν ίδιες. Παρατηρούμε ότι η απόκλιση μεταξύ των δυο αναλύσεων είναι μηδαμινή.



Σχήμα 4.12 Σύγκριση καμπυλών ικανότητας μοντέλου N00 πειράματος και ανάλυσης με 20κομβικά quadratic στοιχεία με reduced integration



Σχήμα 4.13 Σύγκριση αναλύσεων με 8κομβικά και 20κομβικά πεπερασμένα στοιχεία

Πίνακας 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης με C3D8 C20DR στοιχεία

	Πείραμα	Abaqus 8κομβικά	Abaqus 20κομβικά
Τέμνουσα δύναμη στο εξεταζόμενο τμήμα (KN)	143	144.99	149.52
Μετατόπιση στο σημείο επιβολής φορτίου (mm)	7.39	7.42	7.64

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προσομοίωση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος γίνεται είτε δίνοντας στο πρόγραμμα την αντοχή σε εφελκυσμό σ_t και την ενέργεια θραύσης G_f ως χαρακτηριστικά, είτε εισάγοντας κατευθείαν τον νόμο τάσεων παραμορφώσεων σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους.

$$w_1 = 0.8G_f / f_t \quad (4.1)$$

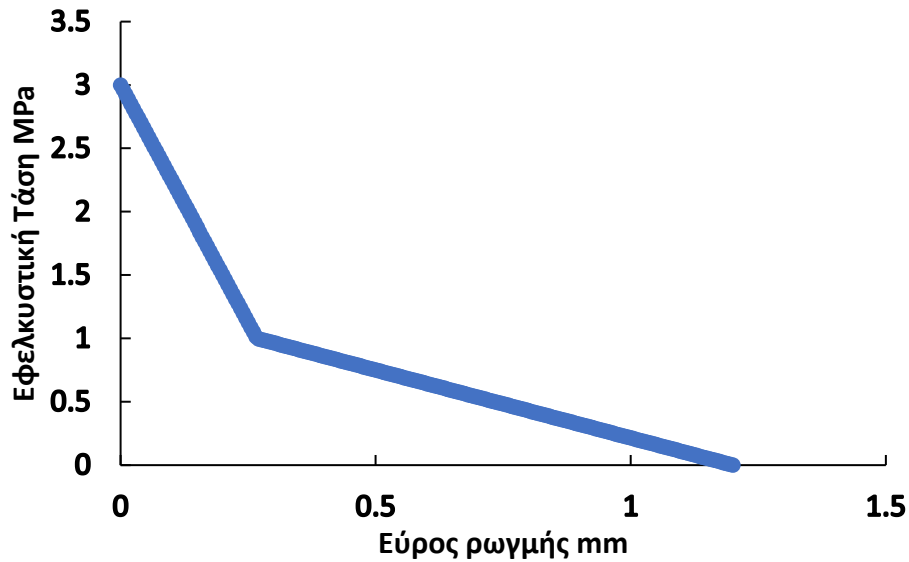
$$w_u = 3.6G_f / f_t \quad (4.2)$$

$$f_t = 0.33 \sqrt{f_c} \quad (4.3)$$

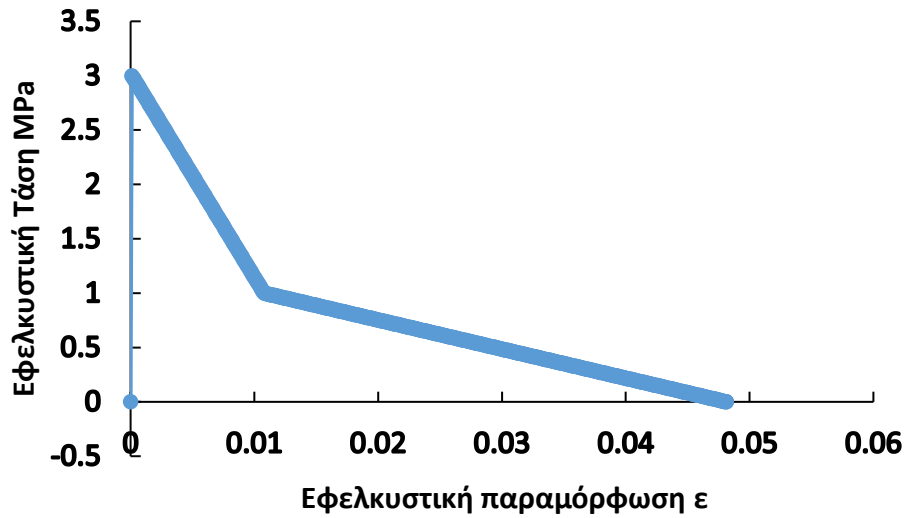
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{cr} + w_1 / l_c \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{cr} + w_u / l_c \quad (4.5)$$

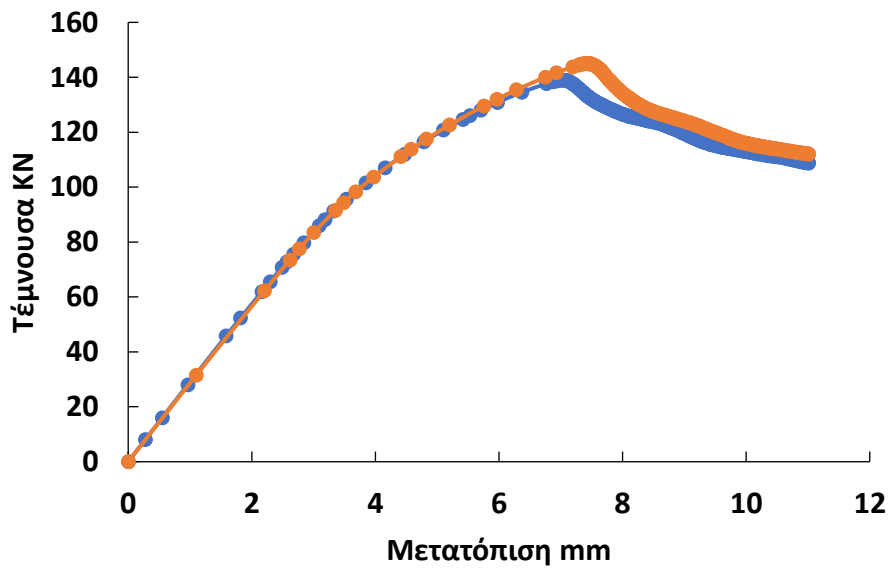
$$l_c = \sqrt[3]{V} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα Εφελκυσμού-εύρους ρωγμής μοντέλου N00



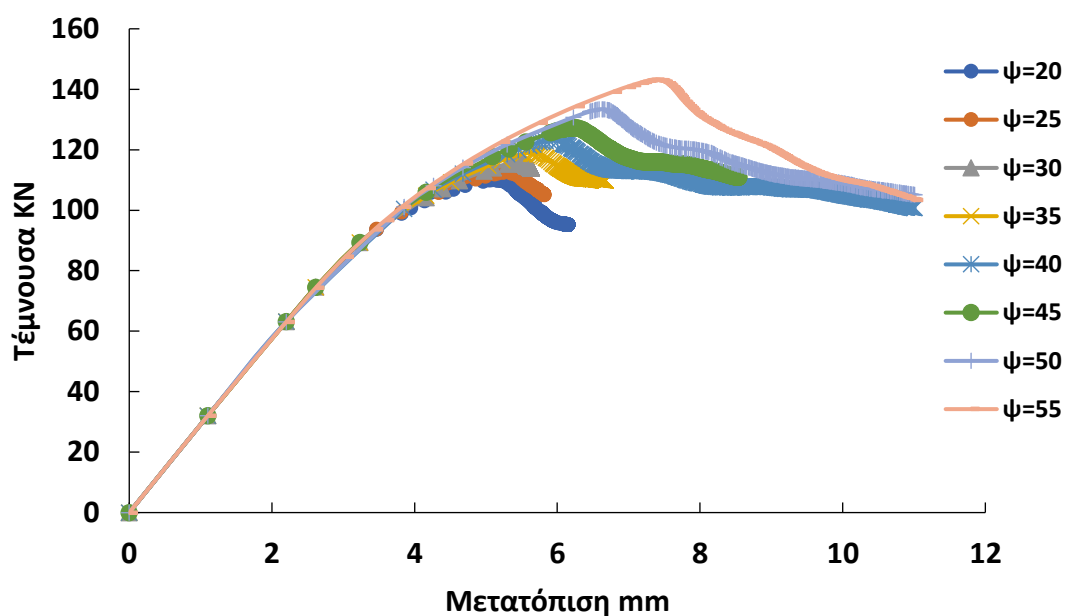
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος μοντέλου N00



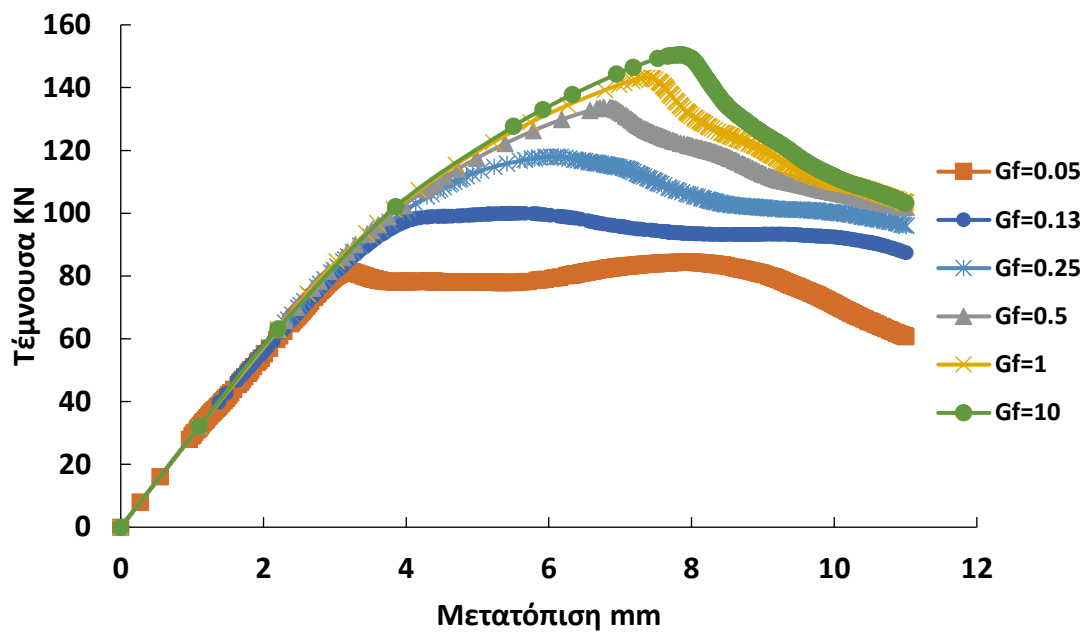
Σχήμα 4.16 Πορτοκαλί καμπύλη με εισαγωγή της ενέργειας θραύσης σκυροδέματος $G_f=1$, Μπλε καμπύλη με εισαγωγή της εφελκυστικής καμπύλης του σκυροδέματος

4.1.2 Διερεύνηση παραμέτρων μοντέλου CDP

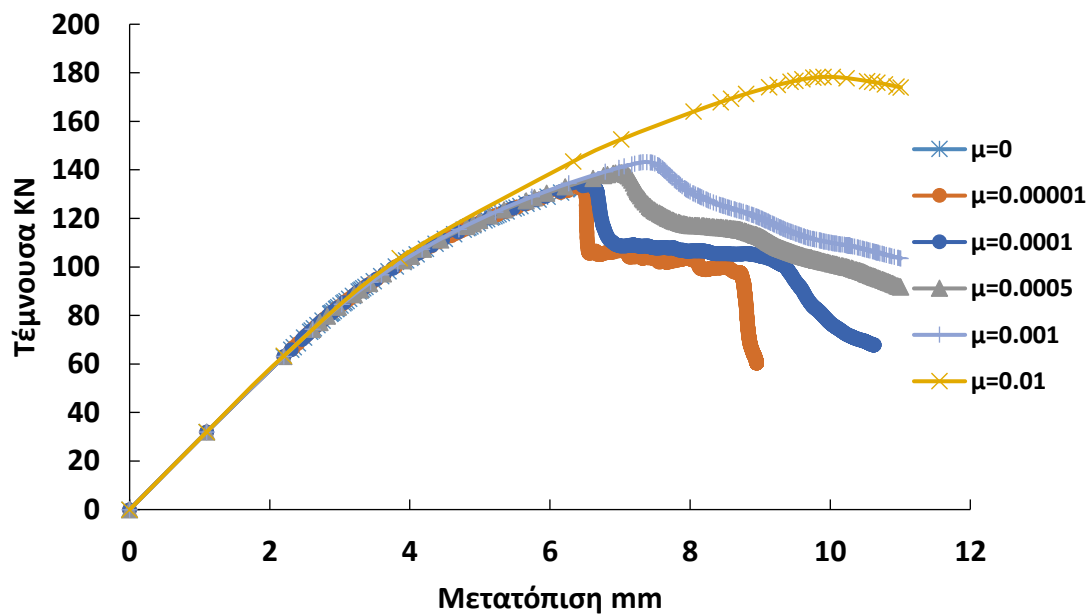
Τέλος, αξίζει να γίνει μια διερεύνηση στο πώς επηρεάζουν οι διάφορες παράμετροι του μοντέλου CDP τα αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας της δοκού N00, για διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής ψ (dilation angle), της ενέργειας θραύσης του σκυροδέματος G_f (N/mm), της παραμέτρου μ (viscosity parameter) και τέλος της παραμέτρου K_c η οποία καθορίζει το σχήμα της επιφάνειας διαρροής. Κάθε φορά τροποποιούμε την μια παράμετρο, ενώ οι άλλες παραμένουν σταθερές. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερες τιμές εισάγουμε τόσο αυξάνονται και οι αντοχές.



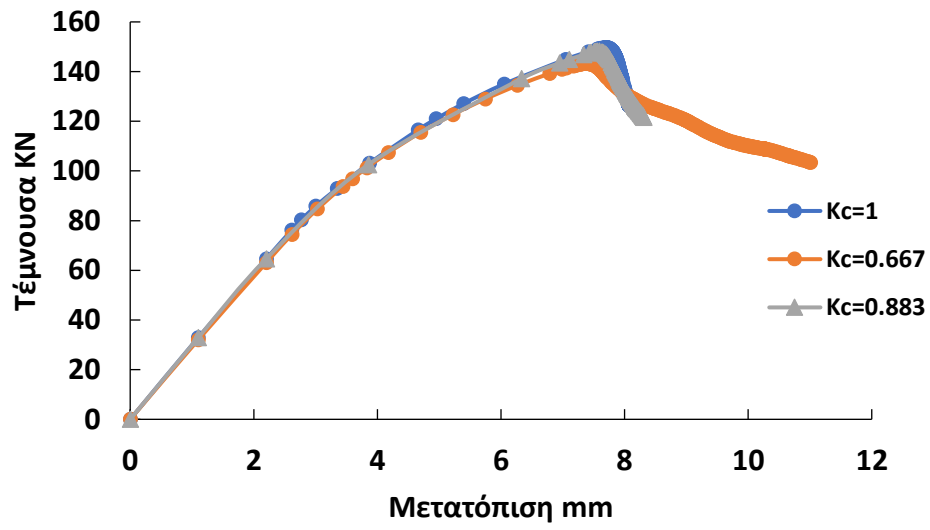
Σχήμα 4.17 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου N00 για διάφορες τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής ψ (μοίρες)



Σχήμα 4.18 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου N00 για διάφορες τιμές ενέργειας θραύσης G_f (N/mm)

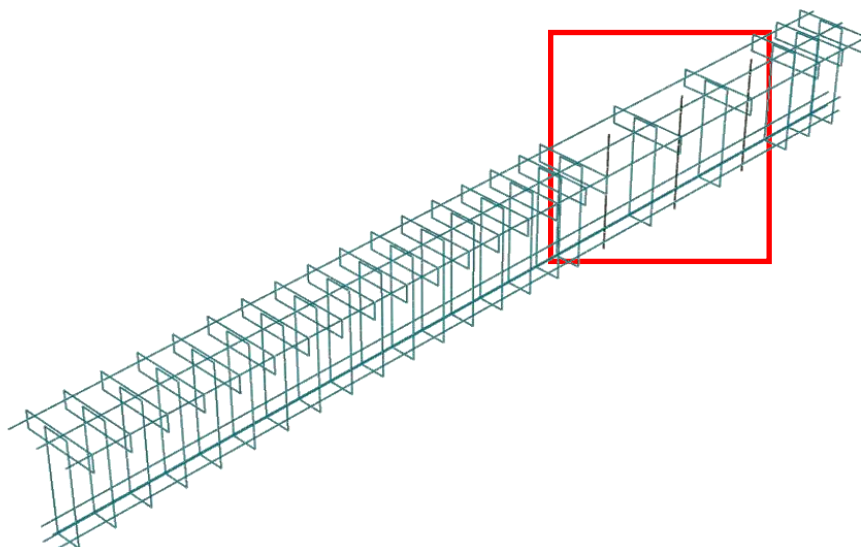


Σχήμα 4.19 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου N00 για διάφορες τιμές της μ



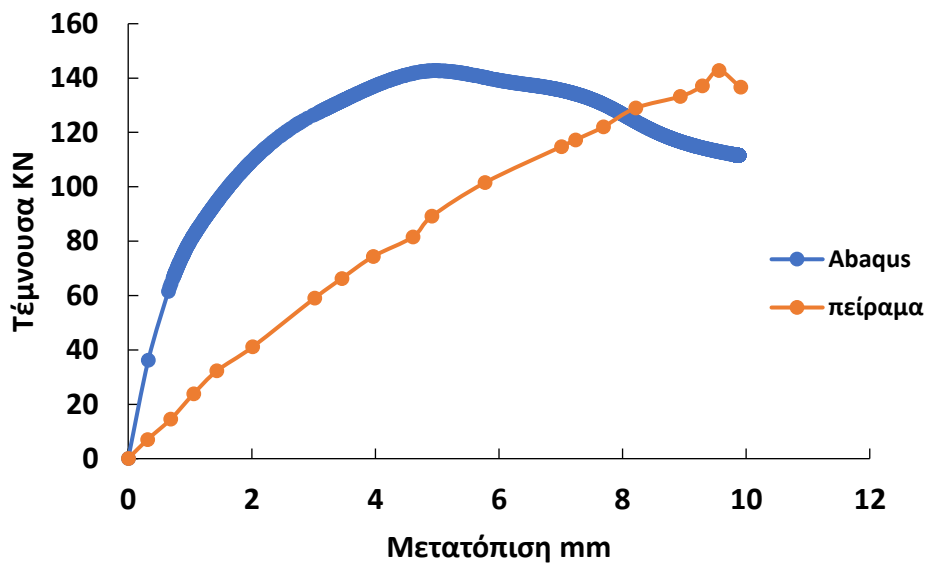
Σχήμα 4.20 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου N00 για διάφορες τιμές της Kc

4.2 Δοκός ενισχυμένη με ράβδους χωρίς διάβρωση, R00



Σχήμα 4.21 Διάταξη οπλισμού μοντέλου R00

Στο σχήμα 4.22 φαίνονται οι καμπύλες αντοχής της ενισχυμένης δοκού με ράβδους ινοπλισμένου πολυμερούς (CFRP Rods) χωρίς διάβρωση, R00, του πειράματος και της αντίστοιχης της ανάλυσης, ενώ στο πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι τιμές των παραμέτρων του CDP. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση με εισαγωγή των πραγματικών τιμών των παραμέτρων πετυχαίνουμε να υπολογίσουμε το πραγματικό οριακό φορτίο αλλά όχι τις σωστές μετατοπίσεις. Για να προσομοιώσουμε την πραγματική συμπεριφορά χρειάζεται να τροποποιηθούν κατάλληλα οι διάφορες παράμετροι.



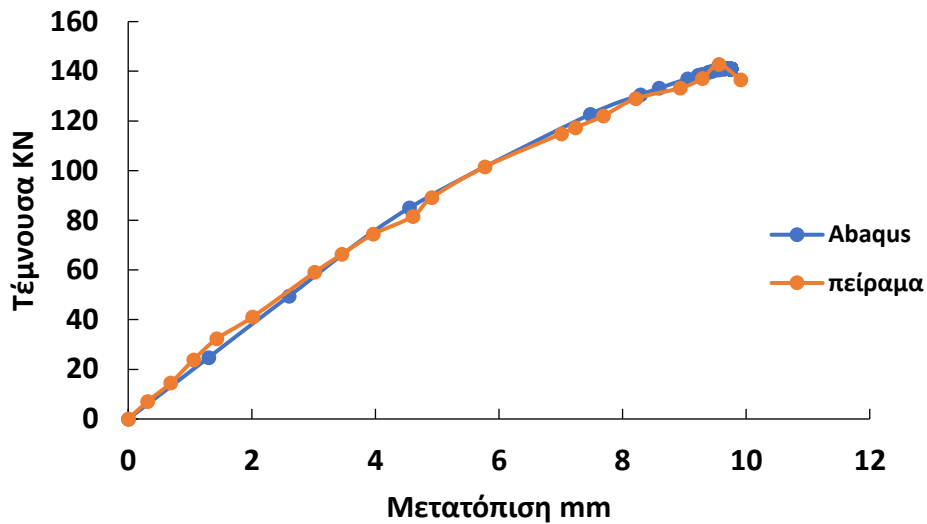
Σχήμα 4.22 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου R00 χωρίς βαθμονόμηση

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης R00 χωρίς βαθμονόμηση

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος MPa	21.7
Μέτρο ελαστικότητας GPa	25.6
Εφελκυστική αντοχή MPa	3.1
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.127
Γωνία εσωτερικής τριβής ψ	30°
Μέγιστη τέμνουσα στο εξεταζόμενο τμήμα KN	142.7
Βύθιση mm	5.0

Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η νέα καμπύλη ικανότητας του μοντέλου R00 με αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας E , στην ενέργεια θραύσης ($Gf=1$ N/mm) και στην γωνία εσωτερικής τριβής ψ . Παρατηρούμε ότι οι δυο καμπύλες ταυτίζονται τέλεια. Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε ίσο με το 9% της πραγματικής. Στον πίνακα 4.5

παρουσιάζονται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και του πειράματος



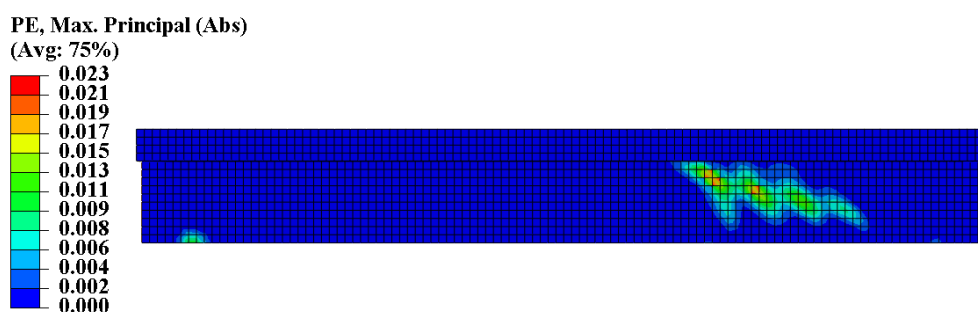
Σχήμα 4.23 Καμπύλη ικανότητας μοντέλου R00, με βαθμονόμηση

Πίνακας 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων R00

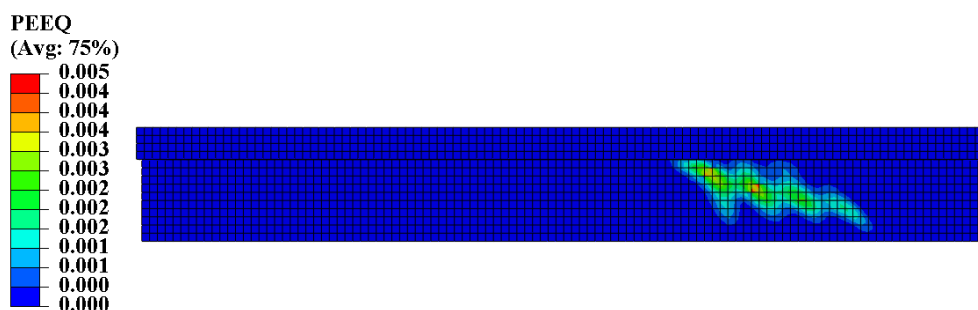
	Πείραμα	Abaqus
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	25.6	2.0
Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	1.5/3.1	3.1
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.127	1.0
Γωνία εσωτερικής τριβής ψ	30°	55°
Βύθιση (mm)	9.57	9.7
Συνολική τέμνουσα δύναμη (KN)	142	141

Στα σχήματα 4.24 και 4.25 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις PE και PEEQ του μοντέλου R00. Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση ότι η βλάβη συσσωρεύεται στο εξεταζόμενο τμήμα. Ακόμα η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από του μοντέλου N00.

Στο σχήματα 4.28 και 4.29 φαίνονται οι τάσεις Von Mises σε MPa και οι ανηγμένες παραμορφώσεις στον εγκάρσιο οπλισμό. Παρατηρούμε ότι ούτε εδώ ο οπλισμός έχει διαρρεύσει. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η μεσαία ράβδος ενίσχυσης, όπως και ο μεσαίος συνδετήρας, αναπτύσσει μεγαλύτερη τάση και παραμόρφωση από τις άλλες δυο, όπως έγινε και στο πείραμα.

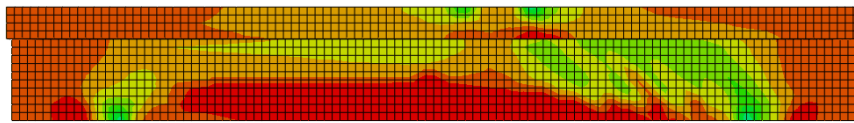
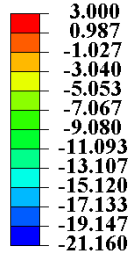


Σχήμα 4.24 Πλαστικές παραμορφώσεις σκυροδέματος μοντέλου R00



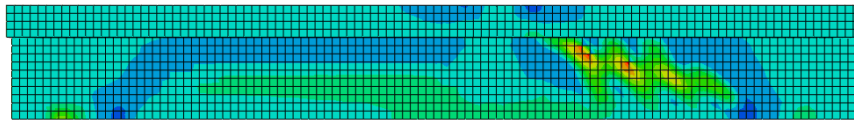
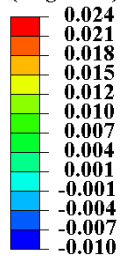
Σχήμα 4.25 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, PEEQ, μοντέλου R00

S, Max. Principal (Abs)
(Avg: 75%)



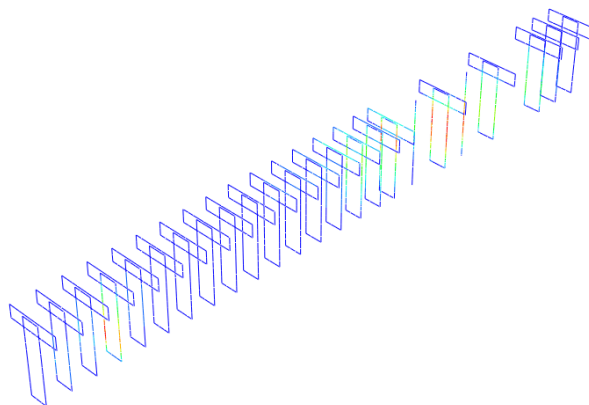
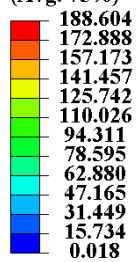
Σχήμα 4.26 Μέγιστες κύριες τάσεις στο σκυρόδεμα μοντέλου R00

E, Max. Principal (Abs)
(Avg: 75%)

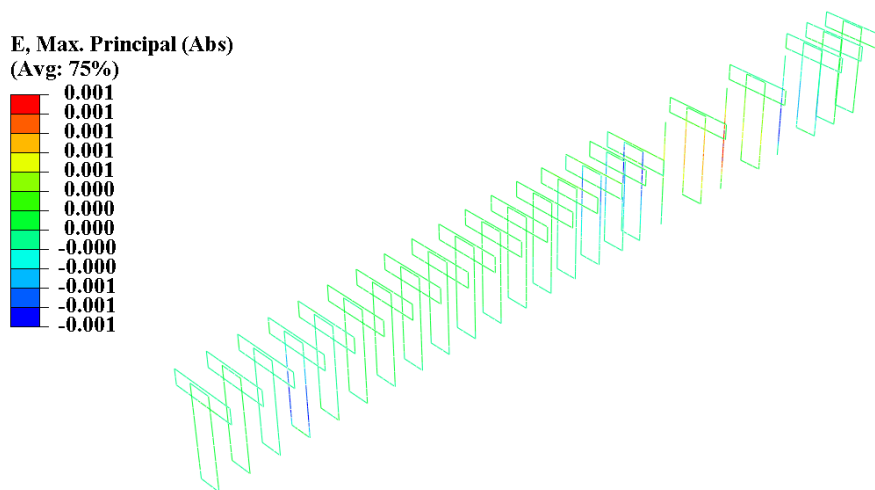


Σχήμα 4.27 Κύριες παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα μοντέλου R00

S, Mises
(Avg: 75%)

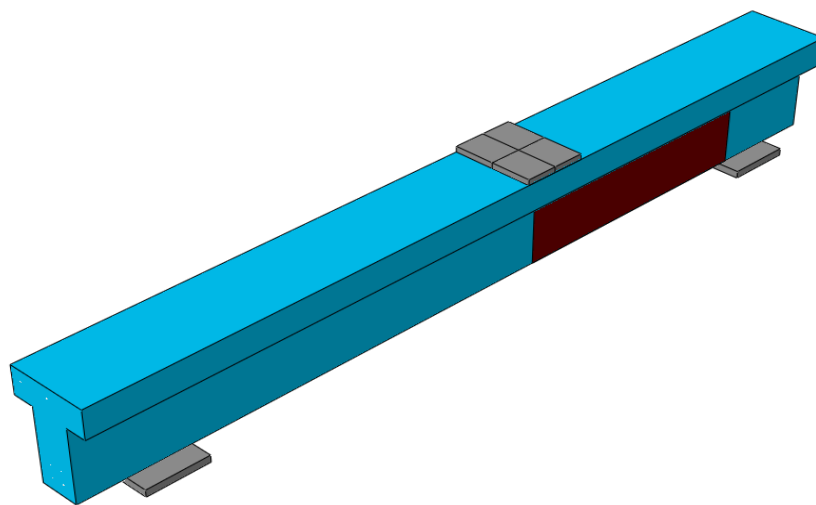


Σχήμα 4.28 Τάσεις Von Mises οπλισμού μοντέλου R00



Σχήμα 4.29 Παραμόρφωση σπλισμού μοντέλου R00

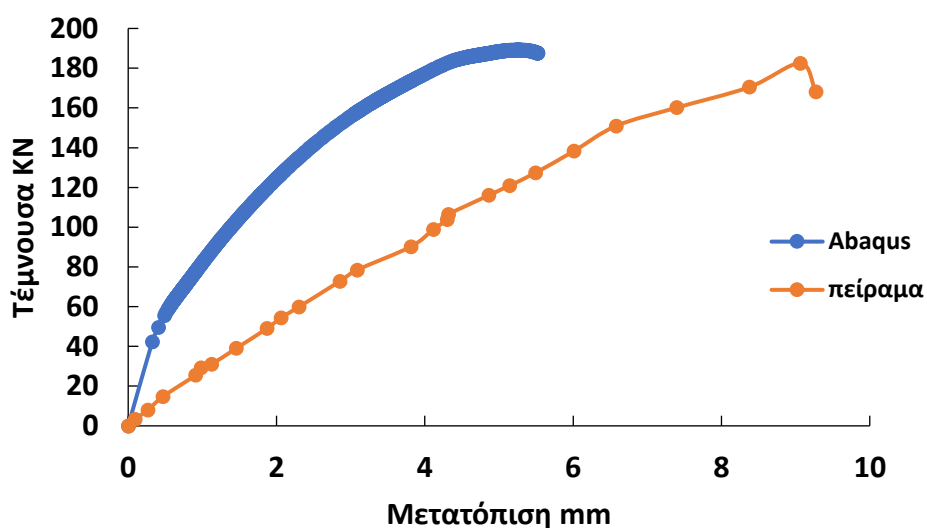
4.3 Δοκός ενισχυμένη με μανδύα χωρίς διάβρωση, S00



Σχήμα 4.30 Δοκός ενισχυμένη με μανδύα CFRP

Στο σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η αντοχή της ενισχυμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς χωρίς διάβρωση, S00, χωρίς βαθμονόμηση. Η ανάλυση αυτή, όπως και οι προηγούμενες, βρίσκει την σωστή αντοχή της δοκού, $P=189\text{KN}$ (σφάλμα 4%), αλλά αποτυγχάνει στις μετατοπίσεις. Ως θλιπτική αντοχή σκυροδέματος λήφθηκε η τιμή των $f_c=37\text{ MPa}$, δηλαδή η μέση θλιπτική αντοχή της δοκού όπως σε

όλες τις αναλύσεις, ενώ ως εφελκυστική λαμβάνεται η τιμή $\sigma_i=3$ MPa, περίπου ο μέσος όρος της εφελκυστικής αντοχής σε καθαρό εφελκυσμό και σε εφελκυσμό σε κάμψη όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Στον πίνακά 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

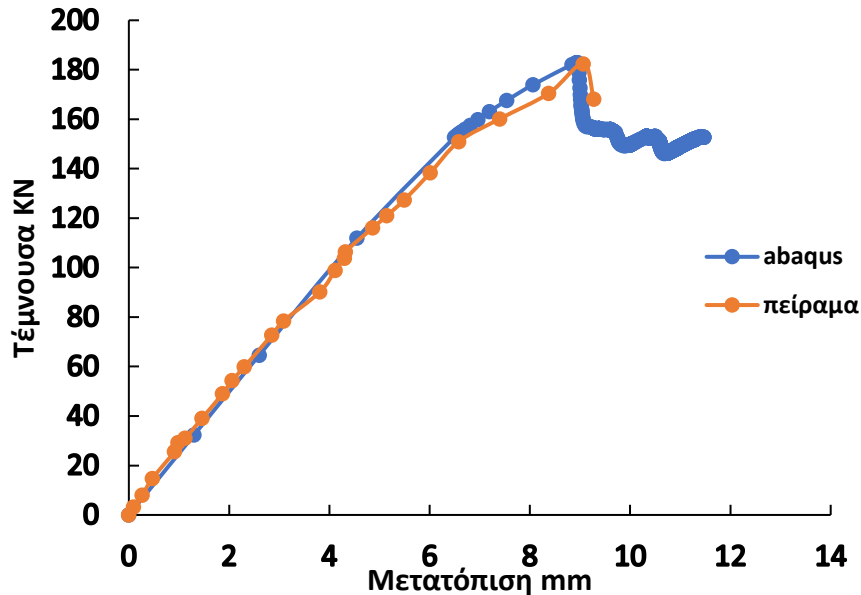


Σχήμα 4.31 Καμπύλη ικανότητας μοντέλου S00 χωρίς βαθμονόμηση

Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα μοντέλου S00 χωρίς βαθμονόμηση

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος MPa	37
Μέτρο ελαστικότητας GPa	33.5
Εφελκυστική αντοχή MPa	3.0
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.14
Γωνία εσωτερικής τριβής ψ	30°
Παράμετρος ιξώδους μ	0.0001
Μέγιστη τέμνουσα στο εξεταζόμενο τμήμα KN	189
Βύθιση mm	5.2

Ύστερα από την βαθμονόμηση του μοντέλου λαμβάνουμε την καμπύλη ικανότητας του σχήματος 4.32 όπου παρατηρούμε την ικανοποιητική ταύτιση των δυο καμπυλών. Το μέτρο ελαστικότητας της ανάλυσης λήφθηκε ίσο με το 10% της πραγματικής. Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

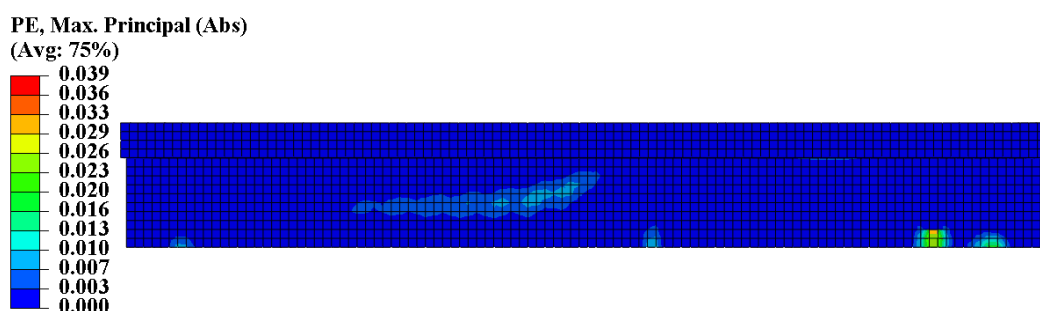


Σχήμα 4.32 Σύγκριση καμπύλων ικανότητας μοντέλου S00

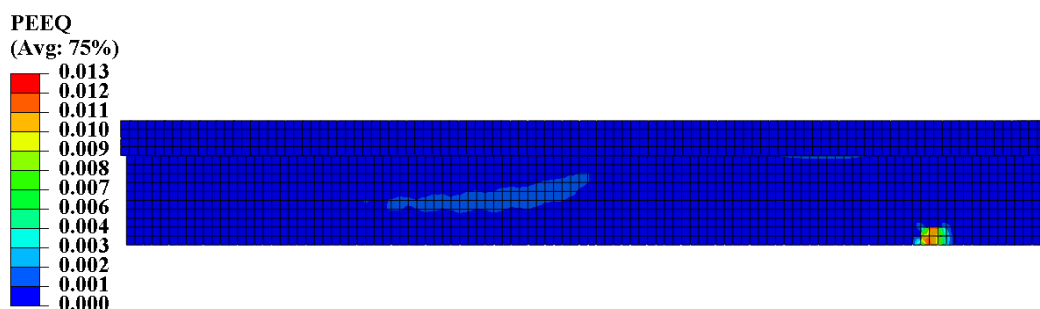
Πίνακας 4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου S00

	Πείραμα	Abaqus
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	33.5	3.0
Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος εκ κάμψεως (MPa)	2.4/4.2	3.0
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.14	1.0
Βύθιση (mm)	9.02	8.95
Συνολική τέμνουσα δύναμη (KN)	182	182.89

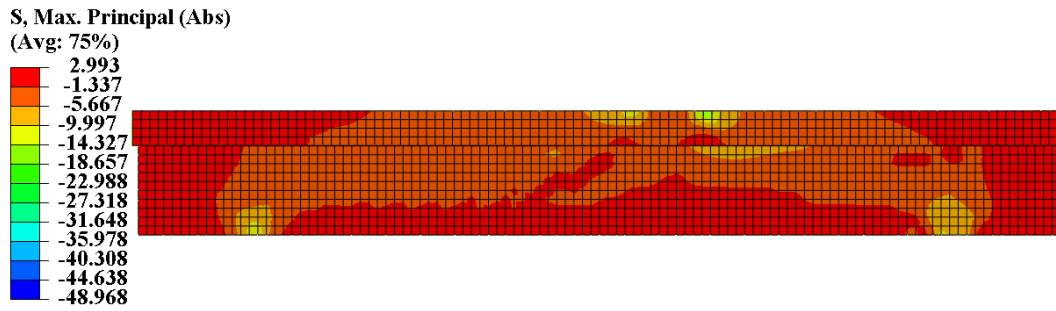
Στα σχήματα 4.33 και 4.34 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις PE και οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, PEEQ, αντίστοιχα στο σκυρόδεμα. Παρατηρούμε ότι η πλαστικότητα συσσωρεύεται στο μη εξεταζόμενο τμήμα (αριστερό) γεγονός που υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με τον μανδύα, ενώ η μέγιστη βλάβη εντοπίζεται στην δεξιά στήριξη, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις όπου η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση αναπτυσσόταν στην αριστερή στήριξη. Στα σχήματα 4.38 και 4.39 απεικονίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του μανδύα, αντίστοιχα. Οι παραμορφώσεις αυτές όμως είναι μεγαλύτερες από εκείνες που αναπτυχθήκαν πραγματικά στο πείραμα καθώς εκεί υπήρξε πρόωρη αποκόλληση του μανδύα με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις να είναι κάτω του 0.0013. Η προσομοίωση δηλαδή με την tie technique δεν μπορεί να προβλέψει την αποκόλληση γιατί υποθέτει τέλεια συνοχή. Παρατηρούμε ότι ο μανδύας φορτίζεται με τάση πολύ μικρότερη από την αντοχή του, η οποία είναι $\sigma_u=986$ MPa.



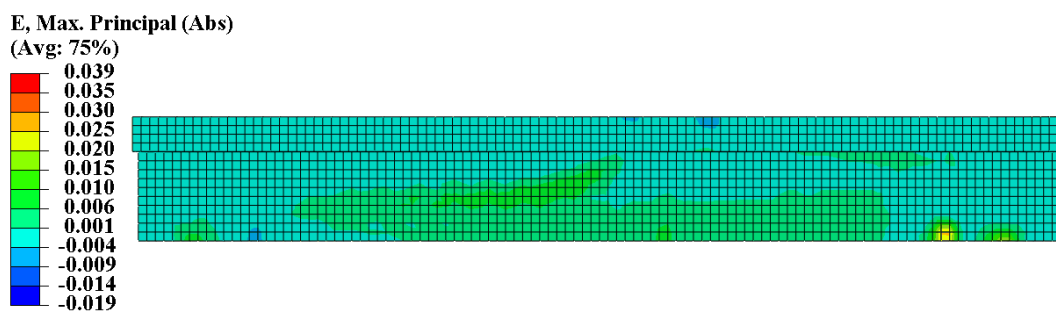
Σχήμα 4.33 Πλαστική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα μοντέλου S00



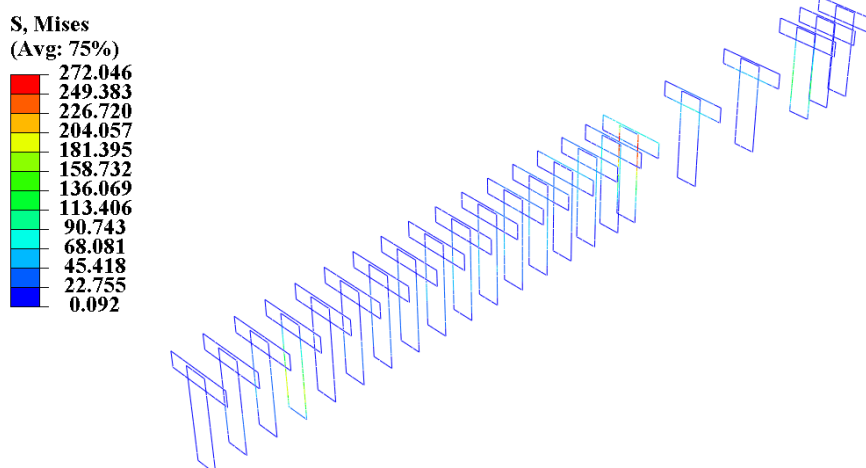
Σχήμα 4.34 Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα μοντέλου S00



Σχήμα 4.35 Μέγιστες κύριες τάσεις στο σκυρόδεμα

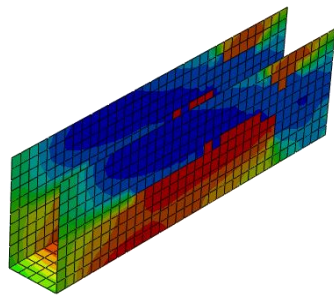
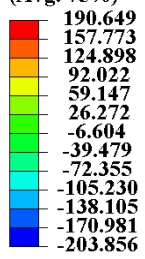


Σχήμα 4.36 Παραμορφώσεις σκυροδέματος μοντέλου S00

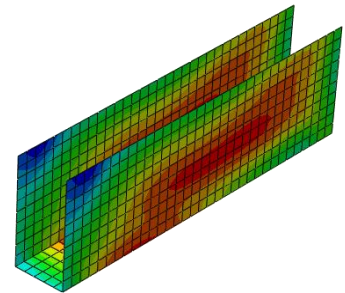
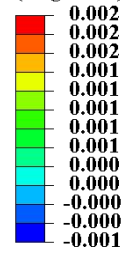


Σχήμα 4.37 Τάσεις Von Mises στον σπλισμό μοντέλου S00

S, Max. Principal (Abs)
(Avg: 75%)



E, Max. In-Plane Principal
(Avg: 75%)



Σχήμα 4.38 Μέγιστες κύριες τάσεις
στον μανδύα μοντέλου S00

Σχήμα 4.39 Παραμόρφωση μανδύα
μοντέλου S00

4.4 Ανακυκλιζόμενη φόρτιση δοκών N00, R00, S00

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των μη διαβρωμένων δοκών υποβαλλόμενα σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Υπενθυμίζεται ότι για την προσομοίωση της απόκρισης της συμπεριφοράς στοιχείων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση πρέπει να εισάγουμε τους συντελεστές βλάβης σε εφελκυσμό και θλίψη dt και dc αντίστοιχα σύμφωνα με τις εξισώσεις

$$dt = 1 - \sigma_t / \sigma_{tu} \quad (4.7)$$

$$dc = 1 - \sigma_c / \sigma_{cu} \quad (4.8)$$

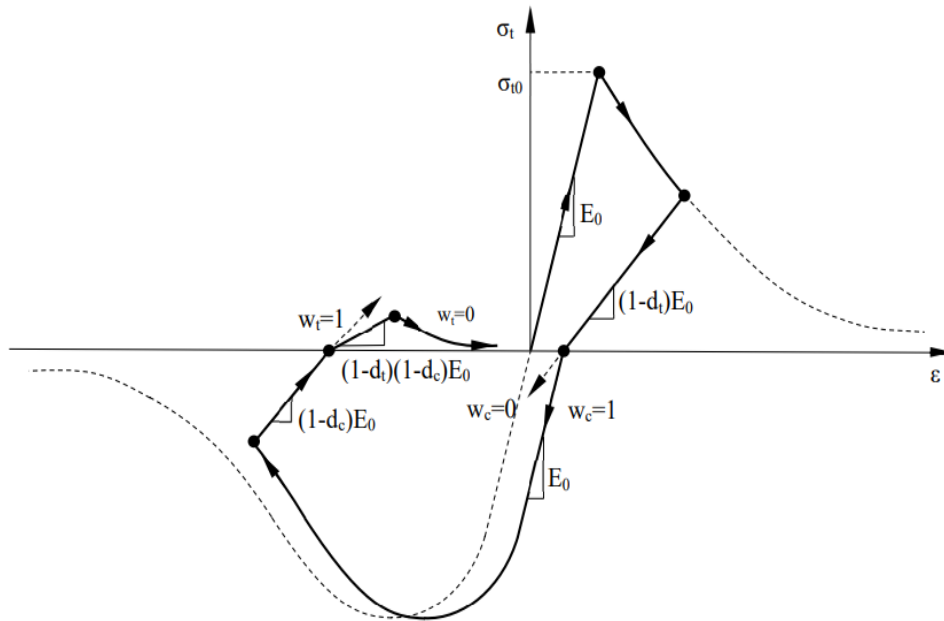
όπου σ_{tu} η εφελκυστική αντοχή και σ_{cu} η θλιπτική αντοχή

ενώ το πρόγραμμα μετατρέπει αυτόματα τις ανελαστικές παραμορφώσεις $\bar{\epsilon}_t^{ck}$, $\bar{\epsilon}_c^{in}$ σε πλαστικές $\bar{\epsilon}_t^{pl}$ και $\bar{\epsilon}_c^{pl}$ σύμφωνα με τους τύπους 3.1 και 3.2 της παραγράφου 3.1.

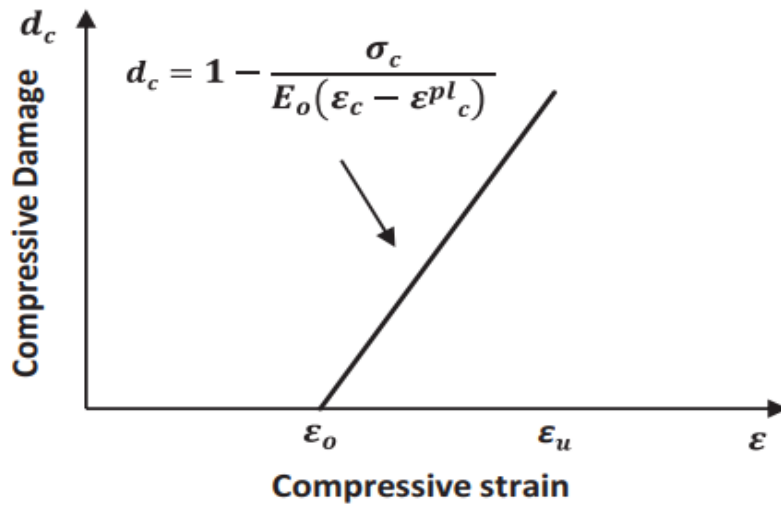
Στο σχήμα 4.40 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα φόρτισης-αποφόρτισης στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση. Κατά την αποφόρτιση, η κλίση του διαγράμματος μειώνεται από E_0 σε $(1-dt)E_0$ στην περιοχή των εφελκυσμών, ενώ στην αποφόρτιση σε θλίψη το νέο μέτρο ελαστικότητας γίνεται $(1-dc)E_0$, όπου dt , dc οι συντελεστές βλάβης κάθε στιγμής. Ακόμα οι μεταβλητές w_c , w_t εκφράζουν την ικανότητα της δοκού να επαναφέρει την δυσκαμψία, να κλείσει δηλαδή τις ρωγμές είτε εφελκυσμού είτε θλίψης που έχουν σχηματιστεί, όταν αντιστρέφεται η φόρτιση. Στην παρούσα εργασία επιλέγονται οι τιμές $w_c=1$, δηλαδή η δοκός ανακάμπτει την θλιπτική δυσκαμψία όταν η φόρτιση μεταπίπτει από εφελκυσμό σε θλίψη και $w_t=0$ που σημαίνει ότι εφελκυστική δυσκαμψία δεν επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση μόλις σχηματιστούν μικρορωγμές από την θλίψη κατά την αντιστροφή από θλίψη σε εφελκυσμό.

Στο σχήμα 4.43 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της N00 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση με μπλε γραμμή, ενώ με πορτοκαλί η αντίστοιχη τέμνουσα αντοχής σε μονοτονική στατική φόρτιση. Παρατηρούμε ότι μόλις η δοκός φτάσει την αντοχή της, υπάρχει μια σημαντική πτώση, ενώ στον τελευταίο 5° κύκλο έχουμε κατάρρευση. Αντίθετα στα σχήματα 4.44 και 4.45 όπου φαίνονται οι καμπύλες φόρτισης-αποφόρτισης των ενισχυμένων δοκών R00, S00 αντίστοιχα δεν παρατηρείται ολική κατάρρευση, πάρα μόνο σημαντική μείωση της αντοχής υστέρη από υπέρβαση της.

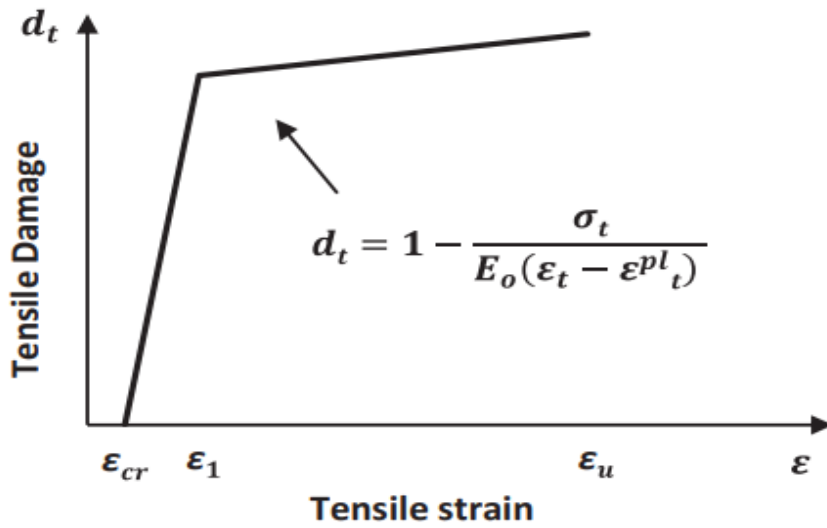
Στις αναλύσεις αυτές δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων όπως παρουσιάστηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια και όχι οι βαθμονομημένες.



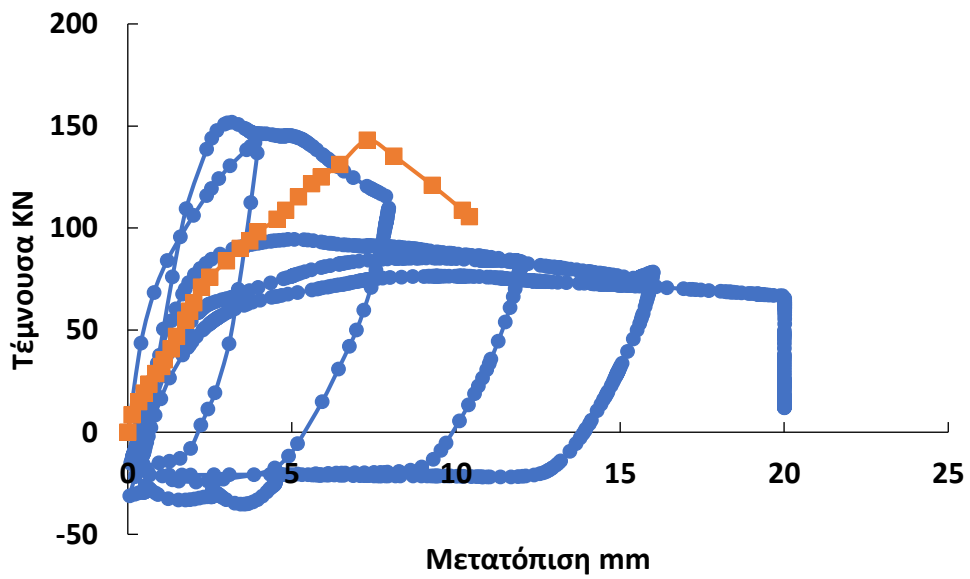
Σχήμα 4.40 Βλάβη σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση



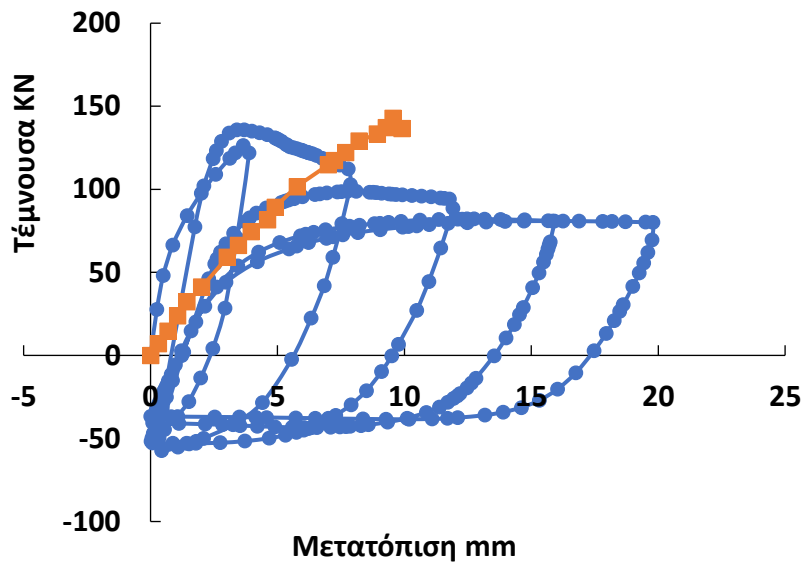
Σχήμα 4.41 Συντελεστής βλάβης σε θλίψη dc



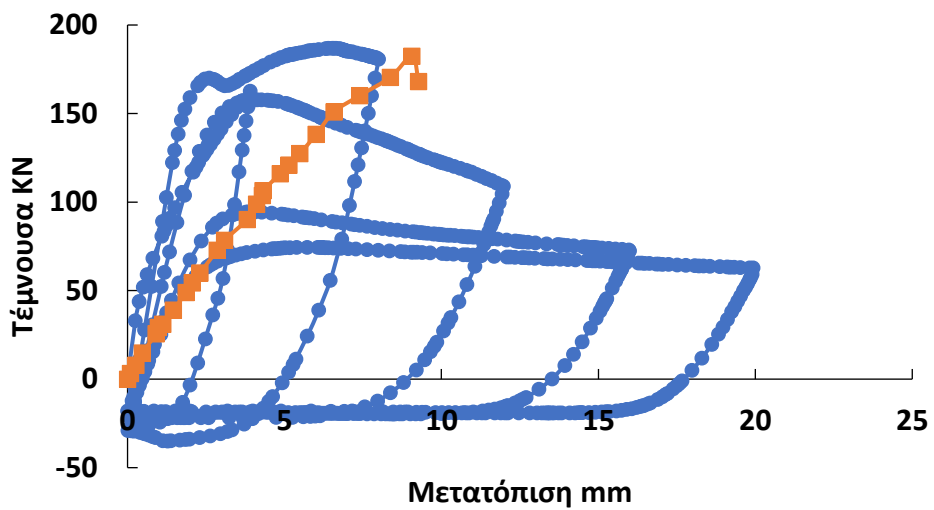
Σχήμα 4.42 Συντελεστής βλάβης σε εφελκυσμό d_t



Σχήμα 4.43 Δοκός N00 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Σχήμα 4.44 Δοκός R00 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Σχήμα 4.45 Δοκός S00 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

5 Διάβρωση

5.1 Γενικά

Η διάβρωση του σιδηρού οπλισμού είναι ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο απειλεί την ασφάλεια και την καταλληλότητα των κατασκευών. Στο Ηνωμένο Βασίλειο έχει εκτιμηθεί ότι το κόστος για την επισκευή κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες έχουν υποστεί βλάβες από διάβρωση ανέρχεται στα £616.5 εκατομμύρια (Broomfield 2005). Στις Ηνωμένες Πολιτείες η κατάσταση είναι ακόμη χειρότερη με το άμεσο κόστος αντικατάστασης ή επιδιόρθωσης γεφυρών να ανέρχεται στο ύψος των \$8.3 δις (Koch et al. 2001). Στην Αυστραλία, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, το κόστος από την διάβρωση του οπλισμού ανέρχεται στο 3-4% του ΑΕΠ. Άλλες χώρες στην νότια Αμερική και στην Ευρώπη αντιμετωπίζουν το ίδιο πρόβλημα καθιστώντας το πρόβλημα παγκόσμιο.

Η χρήση αντιπαγωτικών αλάτων και τα άλατα που μεταφέρονται από τον άνεμο κοντά σε παράκτιες περιοχές είναι η κύρια αίτια προσβολής χλωριοντών στο σκυρόδεμα (El-Maaddawy and Chekfeh 2013). Τα χλωριόντα καταστρέφουν το προστατευτικό παθητικό στρώμα των οξειδίων του σιδήρου γύρω από την ράβδο με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η περεταίρω διάβρωση. Ο όγκος των προϊόντων οξείδωσης, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από τον όγκο του χάλυβα που καταναλώθηκε στην διαδικασία της οξείδωσης, πιέζει το περιβάλλον σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρωγμές και αποφλοίωση του εξωτερικού σκυροδέματος (El-Maaddawy and Soudki 2007).

Οι συνδετήρες είναι πιο ευάλωτοι στην διάβρωση από ότι οι διαμήκεις οπλισμοί, εξαιτίας της εγγύτητας στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος. Η διάβρωση των συνδετήρων μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες στην διατμητική αντοχή των μελών και να οδηγήσει σε ψαθυρές μορφές αστοχίας (Xia et al. 2011). Συνεπώς καθίσταται ζήτημα ασφάλειας και λειτουργικότητας οι αξιόπιστες μέθοδοι ενισχύσεως έναντι διατμήσεως.

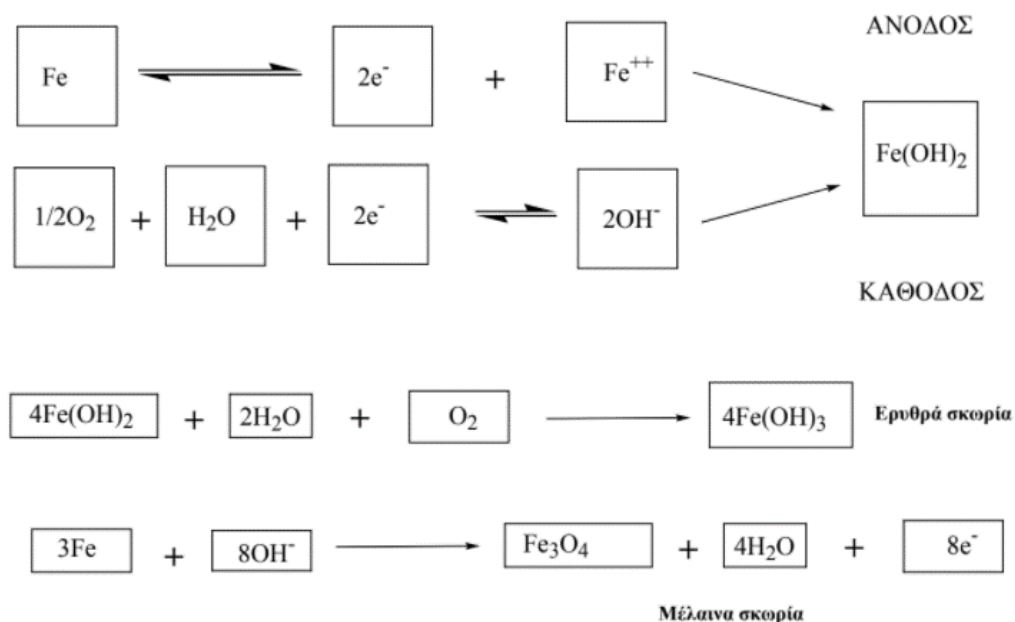
5.2 Μηχανισμός διάβρωσης

Η διάβρωση του οπλισμού συμβαίνει με διάφορους τρόπους. Παρόλο ότι γενικά, η διάβρωση του χάλυβα οφείλεται στην οξείδωση του σιδήρου, στο σκυρόδεμα η διάβρωση του χάλυβα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην παρουσία διαφόρων ειδών ή ανομοιόμορφης σύστασης μετάλλων (ηλεκτροχημική διάβρωση).

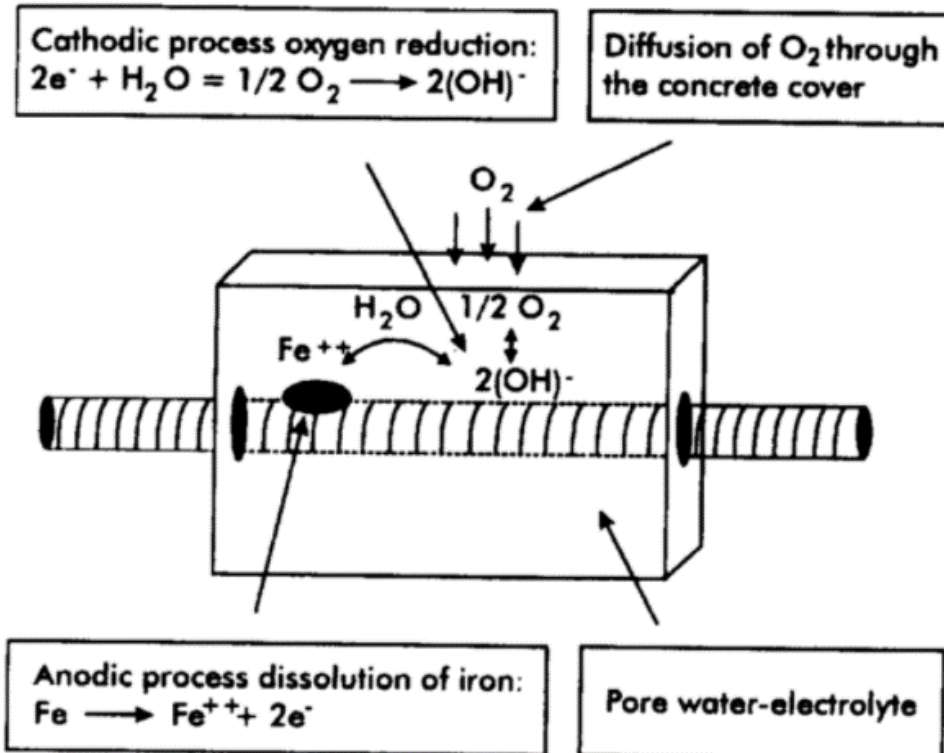
Γενικά, η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα ακολουθεί δύο γενικά σχήματα:

1. Μείωση της αλκαλικότητας λόγω απελευθέρωσης αλκαλικών ειδών και συναφών αντιδράσεων στα ποζολανικά υλικά ή μερική εξουδετέρωση της αλκαλικότητας με διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα όξινα χημικά είδη.
2. Ηλεκτροχημική δράση λόγω της παρουσίας ιόντων χλωρίου και οξυγόνου.

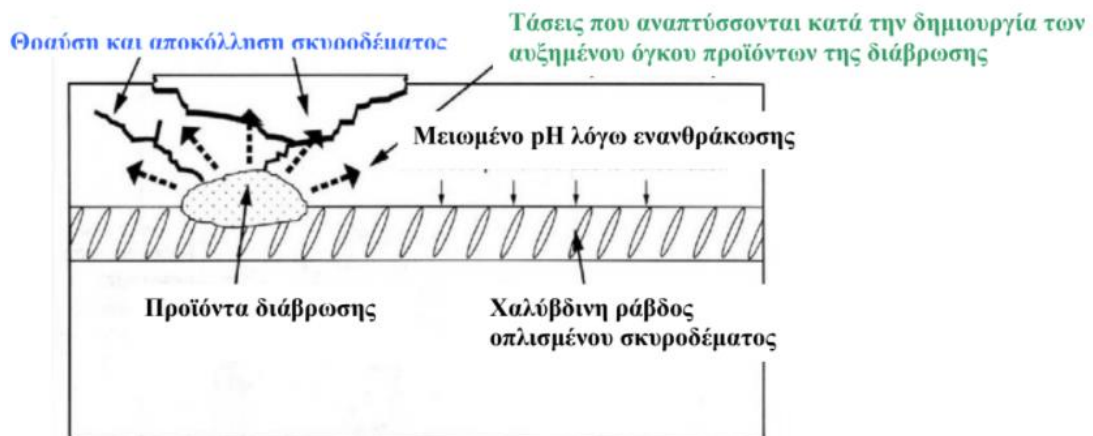
Από ηλεκτροχημική άποψη η διάβρωση είναι μια κλασσική περίπτωση αντιδράσεως την οποία λαμβάνει χώρα μεταφορά φορτίου. Κάθε αντίδραση οξείδωσης είναι συζευγμένη με μια αντίδραση αναγωγής. Στην περίπτωση του χάλυβα έχουμε τόσο περιοχές στις οποίες λαμβάνει χώρα αποβολή ηλεκτρονίων ή οξείδωση (ανοδικές περιοχές) όσο και περιοχές όπου προσλαμβάνονται ηλεκτρόνια, γίνεται δηλαδή αναγωγή (καθοδικές περιοχές). Παρουσία νερού και οξυγόνου στο χάλυβα έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τις ανοδικές προς τις καθοδικές περιοχές. Συνέπεια της ροής αυτής είναι η παραγωγή υδροξυλίων (OH^-) στην κάθοδο. Η επαφή των ανιόντων αυτών με το μέταλλο της καθόδου (σίδηρος) έχει ως συνέπεια τον σχηματισμό οξειδίων του σιδήρου σύμφωνα με το παρακάτω σχήματα



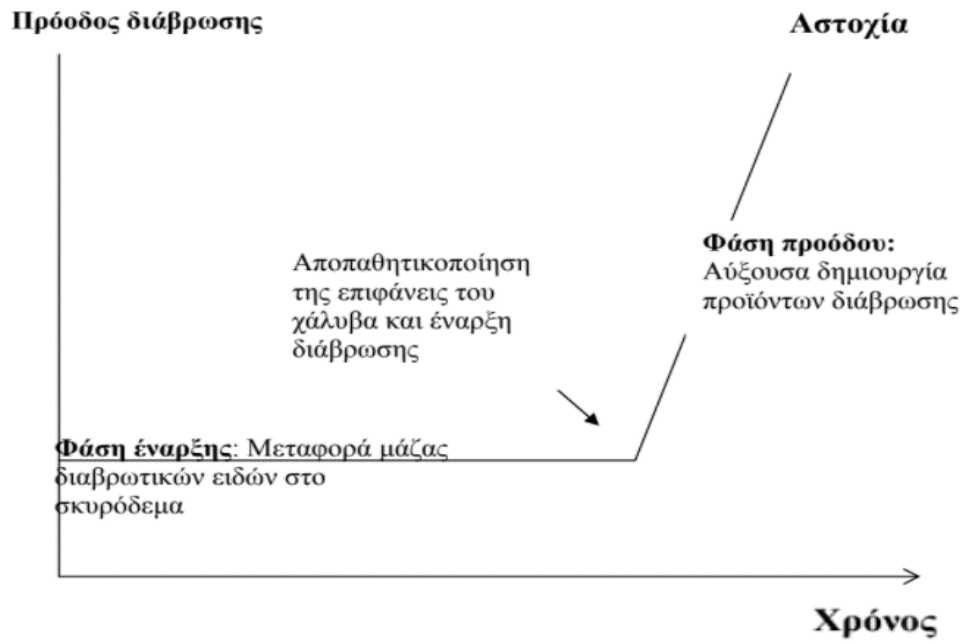
Σχήμα 5.1 Χημική αντίδραση διάβρωσης



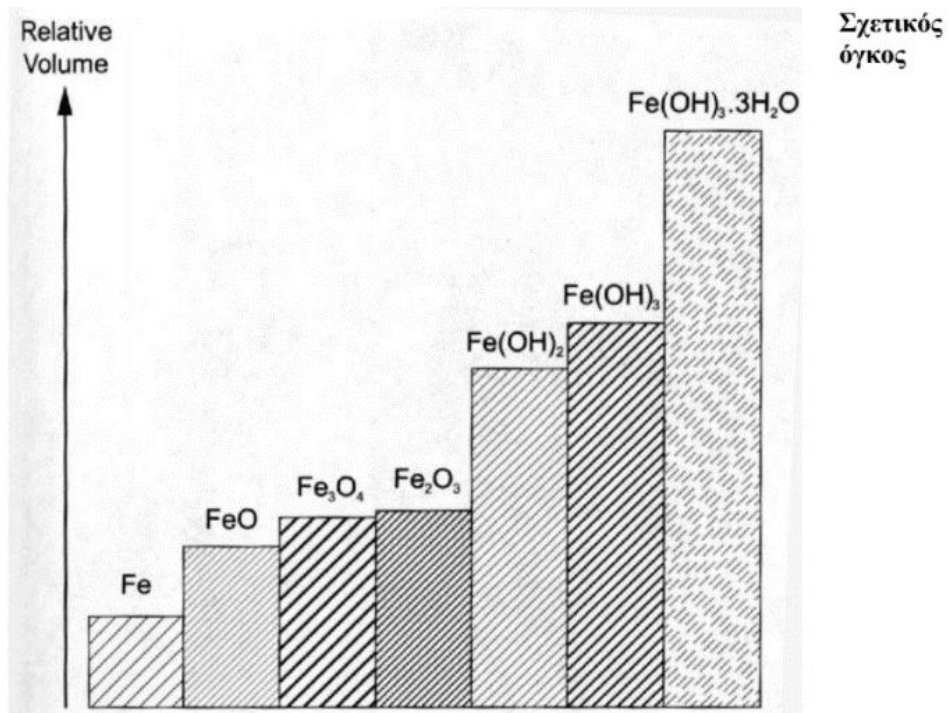
Σχήμα 5.2 Μεταφορά ηλεκτρονίων



Σχήμα 5.3 Ρωγμές λόγω διάβρωσης



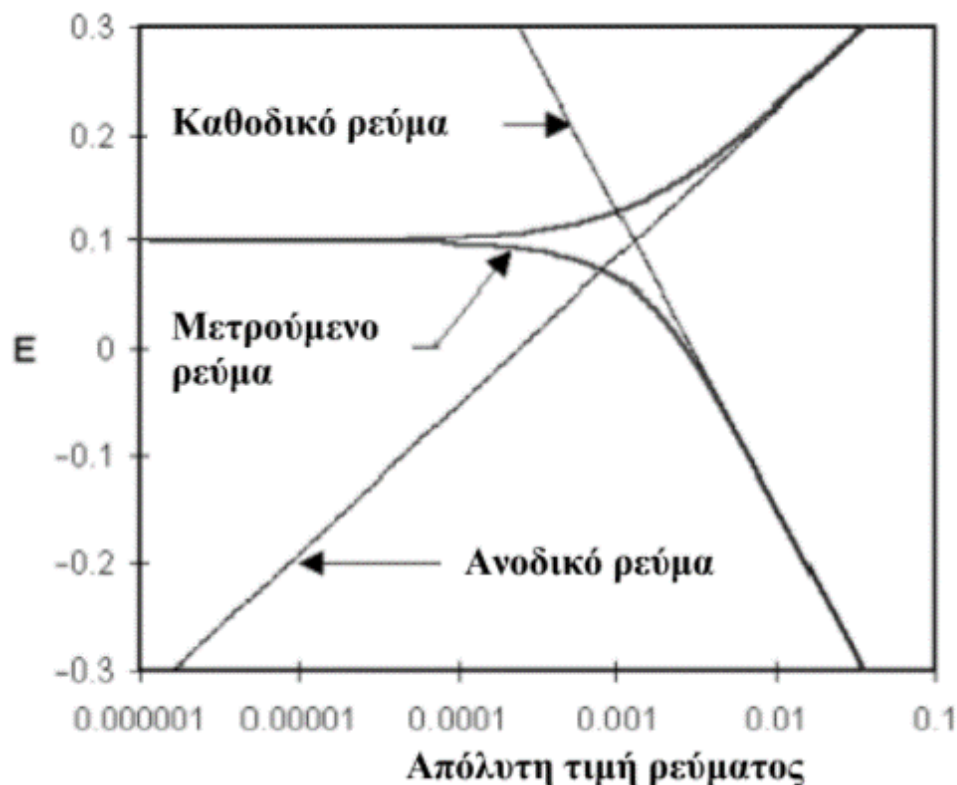
Σχήμα 5.4 Πρόδος διάβρωσης



Σχήμα 5.5 Προϊόντα οξειδωσης

5.3 Διαδικασία διάβρωσης στο εργαστήριο

Ο απλούστερος τρόπος για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την ταχύτητα διάβρωσης είναι ο υπολογισμός της από τα λεγόμενα διαγράμματα πόλωσης. Τα διαγράμματα αυτά λαμβάνονται με την βοήθεια πειραματικών διατάξεων μέτρησης του δυναμικού με σταθερό ρεύμα (γαλβανοστατικές μετρήσεις) ή μέτρησης του ρεύματος με σταθερό δυναμικό (ποτενσιοστατικές μέθοδοι). Οι λαμβανόμενες μετρήσεις επιτρέπουν την σχεδίαση διαγραμμάτων δυναμικού ρεύματος όπως αυτό του σχήματος 5.6. Τα διαγράμματα αυτά, γνωστά και ως καμπύλες πόλωσης έχουν στον κατακόρυφο άξονα το δυναμικό και στον οριζόντιο το λογάριθμο της απόλυτης τιμής του μετρούμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Οι θεωρητικές τιμές του ρεύματος για την ανοδική και την καθοδική αντίδραση είναι ευθείες γραμμές. Η καμπύλη είναι το συνολικό ρεύμα, το οποίο μετρείται κατά την σάρωση των δυναμικών ενός μετάλλου με την βοήθεια του ποτενσιοστάτη.



Σχήμα 5.6 Καμπύλες πόλωσης

Το δυναμικό ισορροπίας το οποίο αποκτά το μέταλλο απουσία ηλεκτρικών συνδέσεων ονομάζεται δυναμικό ανοικτού κυκλώματος, E_{oc} . Στις περισσότερες ηλεκτροχημικές

μετρήσεις το πρώτο βήμα είναι η μέτρηση της παραμέτρου αυτής. Η τιμή του ανοδικού ή του καθοδικού ρεύματος στο E_{oc} , ονομάζεται ρεύμα διάβρωσης, I_{corr} . Η γνώση της τιμής του ρεύματος διάβρωσης συνδέεται με τον ρυθμό διάβρωσης. Η μέτρηση του μεγέθους αυτού γίνεται με την βοήθεια μετρήσεων του λογαρίθμου του ρεύματος σε μια περιοχή δυναμικών περίπου 500 mV. Με βάση την παραδοχή ότι οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις καθορίζονται από την μεταφορά ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου, η πυκνότητα του ρεύματος δίνεται από την εξίσωση Tafel:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{2.303(E-E_0)}{b}\right) \quad (5.1)$$

όπου I το ρεύμα το οποίο οφείλεται στην ηλεκτροχημική αντίδραση, I_0 το ρεύμα ανταλλαγής (σταθερά, ανεξάρτητη της αντίδρασης), E το δυναμικό του ηλεκτροδίου, E_0 το δυναμικό ισορροπίας (για την συγκεκριμένη αντίδραση) και b η σταθερά Tafel για την αντίδραση (ορισμένη για ορισμένη αντίδραση). Οι εξισώσεις Tafel τόσο για την καθοδική όσο και για την ανοδική αντιδράσεις σε ένα σύστημα διάβρωσης συνδυάζονται στην εξίσωση Butler-Volmer

$$I = I_{corr} \exp\left(\frac{2.303(E-E_0)}{ba}\right) I_0 \exp\left(\frac{2.303(E-E_{corr})}{bc}\right) \quad (5.2)$$

όπου I το μετρούμενο ρεύμα, I_{corr} το ρεύμα διάβρωσης, E το δυναμικό του ηλεκτροδίου, E_{corr} το δυναμικό διάβρωσης, ba η ανοδική σταθερά Tafel, και bc η καθοδική σταθερά Tafel. Τα διαγράμματα του λογαρίθμου του ρεύματος, $\log I$, συναρτήσει του δυναμικού, E , ονομάζεται διάγραμμα Tafel. Η εξίσωση 5.2 μπορεί να απλουστευθεί εάν περιορισθούμε σε τιμές του δυναμικού πλησίον της τιμής του E_{corr} . Στην περιοχή αυτή, η καμπύλη μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία η κλίση της οποίας έχει μονάδες αντίστασης (ohms). Η κλίση ως εκ τούτου ονομάζεται Αντίσταση Πόλωσης, R_p . Η τιμή της R_p είναι δυνατόν να συνδυασθεί με εκτίμηση των συντελεστών β , και κατ' επέκταση να υπολογισθεί το ρεύμα διάβρωσης. Η εξίσωση (5.2) με γραμμικοποίηση των εκθετικών όρων γίνεται:

$$I_{corr} = \frac{1}{R_p} \frac{babc}{2.303(ba+bc)} \quad (5.3)$$

Η εξίσωση (5.3) είναι μια μορφή της γνωστής εξίσωσης Stern-Geary.

Οι υπολογισμοί της απώλειας μάζας λόγω διάβρωσης στηρίζονται στην παραδοχή ότι για την αντίδραση η οποία περιγράφει την διάβρωση ενός είδους S κατά το σχήμα :



Το ρεύμα το οποίο δημιουργείται, υπολογίζεται από τον νόμο του Nernst:

$$Q = nFM \quad (5.5)$$

όπου Q είναι το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο προκύπτει από την αντίδραση του είδους S, n ο αριθμός των ηλεκτρονίων τα οποία μεταφέρονται ανά μόριο ή άτομο του S, F η σταθερά του Faraday (= 96,486.7 coulombs/mole) και M ο αριθμός των moles του S τα οποία αντιδρούν. Αν το ισοδύναμο βάρους, EW, είναι η μάζα του είδους S που θα αντιδράσει με φορτίο 1 Faraday : $EW = AW/n$ (όπου AW το ατομικό βάρος του είδους). Επειδή $M = W/AW$ αντικατάσταση στην 5.5 δίνει:

$$W = \frac{EW Q}{F} \quad (5.6)$$

όπου W η μάζα του S που αντέδρασε.

Η μετατροπή της απώλειας βάρους σε ρυθμό διάβρωσης, CR, είναι εύκολη. Απαιτείται γνώση της πυκνότητας, d, και της επιφάνειας του δείγματος, A. Το ηλεκτρικό φορτίο δίνεται από την $Q = It$, όπου t ο χρόνος και I το ρεύμα. Αντικατάσταση στην εξίσωση 5 δίνει:

$$CR = \frac{I_{corr} K EW}{d A} \quad (5.7)$$

όπου K σταθερά για την μετατροπή των μονάδων.

5.4 Υπολογισμός διάβρωσης σε υφιστάμενες κατασκευές

Οι γέφυρες αποτελούν τυπικό παράδειγμα κατασκευών που υφίστανται διάβρωση, εξαιτίας της άμεσης έκθεσης τους στην ατμόσφαιρα, στην ενανθράκωση και στην προσβολή από χλωριόντα.

Η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών σχετίζεται με το ποσοστό διάβρωσης, το οποίο υπολογίζεται από τον λόγο απώλειας μάζας σύμφωνα με την σχέση

$$\Delta w = (d_{b0}^2 - d_{br}^2) / d_{b0}^2 \quad (5.8)$$

όπου Δw είναι το ποσοστό διάβρωσης, d_{b0} είναι η αρχική διάμετρος της ράβδου και d_{br} είναι η μειωμένη διάμετρος.

Η συγκέντρωση των χλωριοντών C (Kg/m³) σε βάθος y (mm) του οπλισμού σε χρόνο t (χρόνια) δίνεται από την σχέση

$$C=C_s[1-\text{erf}\left(\frac{0.1y}{2\sqrt{Dc*t}}\right)] \quad (5.9)$$

όπου C_s είναι επιφανειακή συγκέντρωση χλωριοντών (Kg/m²), erf η συνάρτηση σφάλματος, Dc ο συντελεστής διαχύσεως (cm²/χρόνο). Ο συντελεστής C_s εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και υπολογίζεται από την σχέση

$$C_s=0.998[1.29r w^{0.386}d_{s0}^{-0.952}]^{0.379} \quad (5.10)$$

όπου w είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων, r είναι ο λόγος του χρόνου κατά τον οποίο ο άνεμος πνέει από την θάλασσα προς την γέφυρα προς τον συνολικό χρόνο παρατήρησης και d_{s0} είναι η απόσταση της θάλασσας. Ο συντελεστής Dc υπολογίζεται από την εξίσωση

$$Dc=10^{[-6.77(w/c)^2 + 10.1(w/c) - 3.14]} \quad (5.11)$$

όπου w/c είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο.

Η διάβρωση του οπλισμού εξαιτίας προσβολής από χλωρίοντα ξεκινά όταν η πιθανότητα κατά την οποία η συγκέντρωση χλωριοντών C στον οπλισμό υπερβεί την κρίσιμη C_r είναι μεγαλύτερη από 10%. Η πιθανότητα υπολογίζεται από προσομοίωση Monte Carlo. Στην προσομοίωση η C_r προσομοιώνεται με μια ομοιόμορφη κατανομή με εύρος 1.0-1.2 Kg/m³. Η αβεβαιότητα εισέρχεται στην ταχύτητα του ανέμου w, στην επιφανειακή συγκέντρωση χλωριοντών στον οπλισμό C_s, στον συντελεστή διαχύσεως Dc, στην συγκέντρωση των χλωριοντών στον οπλισμό C και στο βάθος y. Αφού ξεκινήσει η διάβρωση η μείωση της διαμέτρου της ράβδου υπολογίζεται από την εξίσωση

$$d_{br}=d_{b0} - \frac{1.0508(1-\frac{w}{c})^{-1.64}}{d_c} (t_{corr} - T_{corr})^{0.71} \quad (5.12)$$

όπου t_{corr} (χρόνια) είναι ο χρόνος μετά την έναρξη της διάβρωσης, T_{corr} ο χρόνος για την έναρξη της διάβρωσης, d_{b0} (mm) η αρχική διάμετρος της ράβδου στον χρόνο t_{corr}=0 και d_c το βάθος της επικάλυψης (mm)

5.5 Επίδραση της διάβρωσης στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών

Η διάβρωση επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του οπλισμού και οι επιπτώσεις συνοψίζονται σε: i) μείωση της αντοχής του μη περισφιγμένου σκυροδέματος εξαιτίας της ογκομετρικής διαστολής των προϊόντων της οξειδωσης, ii) υποβάθμιση των ιδιοτήτων του περισφιγμένου σκυροδέματος λόγω της οξειδωσης του οπλισμού περίσφιξης, iii) μείωση στην δυσκαμψία, την αντοχή και την πλαστιμότητα του οπλισμού και iv) μείωση της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη μόνο οι αλλαγές στον οπλισμό διάτμησης και στο μη περισφιγμένο σκυροδέμα όπως περιγράφονται παρακάτω. Αλλαγές στην συνάφεια δεν ελήφθησαν υπόψη καθώς στα πειράματα δεν υπήρξε κάποια σχετική ολίσθηση.

5.6 Μείωση της αντοχής του μη περισφιγμένου σκυροδέματος

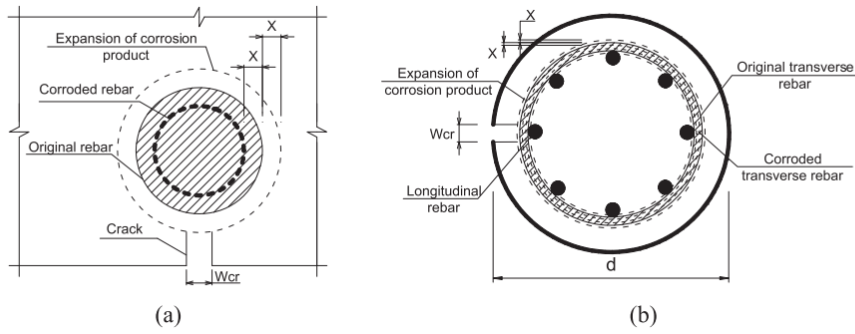
Η διαστολή του διαβρωμένου οπλισμού προκαλεί εφελκυστικές παραμορφώσεις ϵ_r στο σκυρόδεμα. Αυτό οδηγεί σε ρηγμάτωση το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την μείωση της καμπύλης αντοχής. Η εφελκυστική παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο

$$\epsilon_r = \Sigma w_{cr} / b_0 \quad (5.13)$$

όπου b_0 είναι η περιφέρεια του σκυροδέματος που υφίσταται την διάβρωση και Σw_{cr} είναι το άθροισμα του εύρους των ρωγμών. Ως b_0 λαμβάνεται η περίμετρος του κορμού, δηλαδή το κάτω πέλμα και 2 φορές το ύψος του κορμού, ενώ το εύρος ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$w_{cr} = \pi (V_{rs} - 1) 2\chi \quad (5.14)$$

όπου 2χ είναι η μείωση της διαμέτρου του οπλισμού και V_{rs} είναι ο συντελεστής διαστολής της διαμέτρου της ράβδου εξαιτίας της διάβρωσης. Το V_{rs} λαμβάνεται ίσο με 2 σε αυτήν την εργασία. Ακόμα λαμβάνεται $n=6$ ρωγμές στον κορμό, 2 σε κάθε παρειά.



Σχήμα 5.7 Μείωση της διατομής της ράβδου

Η μείωση της αντοχής του μη περισφιγμένου σκυροδέματος λαμβάνεται υπόψη με τον συντελεστή ζ ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\zeta = 0.9 / \sqrt{1 + 600\varepsilon_r} \quad (5.15)$$

όπου ε_r είναι η εφελκυστική παραμόρφωση όπως υπολογίστηκε. Ο συντελεστής ζ λαμβάνεται ίσος με 1 για μηδενική διάβρωση. Η μείωση της καμπύλης αντοχής υπολογίζεται σύμφωνα με (Hsu)

$$\text{ανοδικός κλάδος } \sigma = \zeta f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (5.16)$$

$$\text{καθοδικός κλάδος } \sigma = \zeta f_c \left[1 - \left(\frac{\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_0} - 1}{\frac{\zeta}{2} - 1} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

όπου σ και ε είναι η θλιπτική τάση και η θλιπτική παραμόρφωση του διαβρωμένου σκυροδέματος, f_c είναι η μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και ε_0 είναι η παραμόρφωση στην μέγιστη τάση και είναι ίση με 0.002.

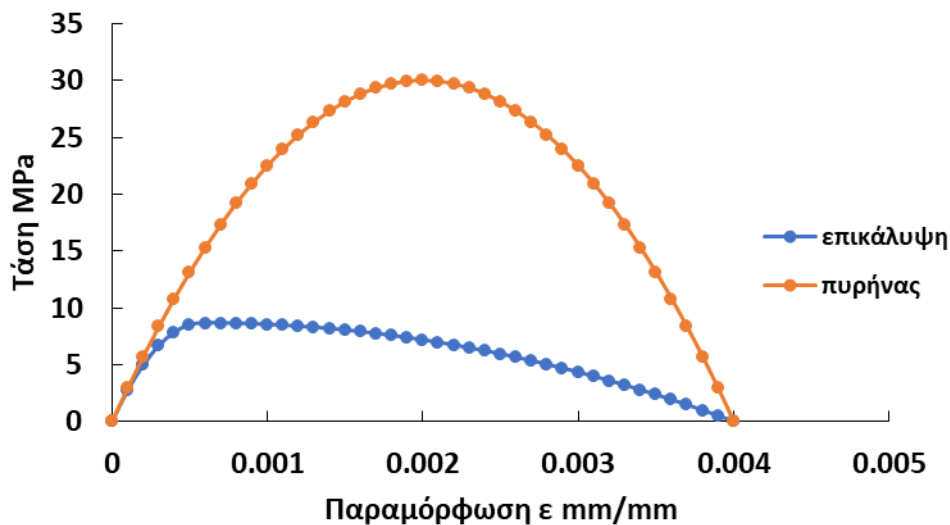
Οι τιμές των παραπάνω μεταβλητών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1 Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή ζ για διάβρωση $\Delta w = 12\%$

Δw	b_0 mm	V_{rs}	$2x$	w_{cr} mm	Αριθμός ρωγμών	Σw_{cr} mm	ε_r	ζ
12%	645	2	0.455	1.556	6	9.336	0.01447	0.289

Πίνακας 5.2 Αντοχή μη περισφιγμένου σκυροδέματος για διάβρωση $\Delta w=12\%$

$\Delta w=12\%$, $\zeta=0.289$	Αντοχή πυρήνα MPa	Αντοχή επικάλυψης MPa
N	41.8	12.0
R	37.0	10.7
S	42.9	12.3



Σχήμα 5.8 Καμπύλη ικανότητας περισφιγμένου και μη σκυροδέματος αρχικής αντοχής $f_c=30$ MPa

5.7 Αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού

Η διάβρωση επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού με αποτέλεσμα να πρέπει να λάβουμε υπόψη την αλλαγή της καμπύλης αντοχής του χάλυβα οπλισμού όταν υπολογίζουμε την καμπτική και διατμητική αντοχή των μελών. Οι αλλαγές εξαρτώνται από τον βαθμό διάβρωσης Δw και διατυπώνονται ως εξής:

$$\sigma_y = (1 - 1.98\Delta w) \sigma_{y0} \quad (5.18)$$

$$\sigma_u = (1 - 1.57\Delta w) \sigma_{u0} \quad (5.19)$$

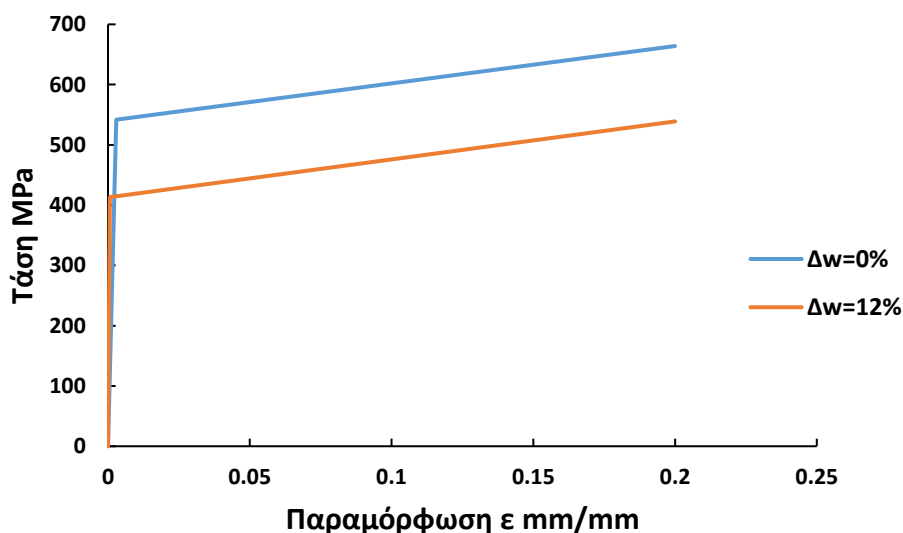
$$E_s = (1 - 1.15\Delta w) E_{s0} \quad (5.20)$$

$$\varepsilon_{su} = (1 - 2.59\Delta w) \varepsilon_{su0} \quad (5.21)$$

όπου σ_y , σ_u , E_s , ϵ_s είναι η τάση διαρροής, η τάση αστοχίας, το μέτρο ελαστικότητας και η παραμόρφωση αστοχίας αντίστοιχα του διαβρωμένου χάλυβα, ενώ σ_{y0} , σ_{u0} , E_{s0} , ϵ_{su0} οι αντίστοιχες τιμές του μη διαβρωμένου χάλυβα. Οι νέες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμού διάτμησης για ποσοστό διάβρωσης 12% σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.3 Ιδιότητες οπλισμού διατμήσεως για διάβρωση $\Delta w=12\%$

$\Delta w=12\%$	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E_s (GPa)	ϵ_{su}
Μη εξεταζόμενο τμήμα	436.86	531.60	157.75	0.002068
Εξεταζόμενο τμήμα	413.22	538.90	160.33	0.002068

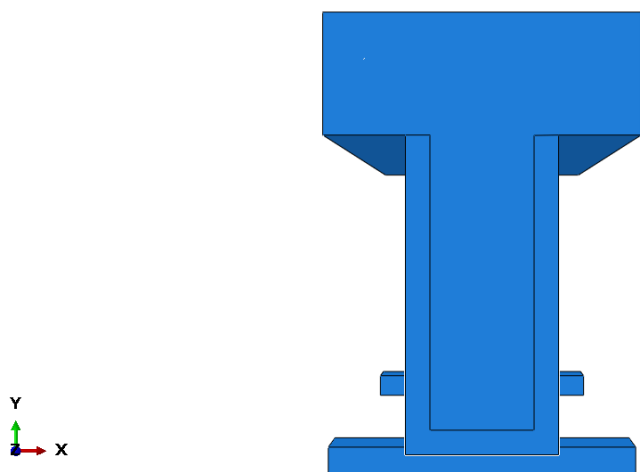


Σχήμα 5.9 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού διατμήσεως για διάβρωση 0% και 12%

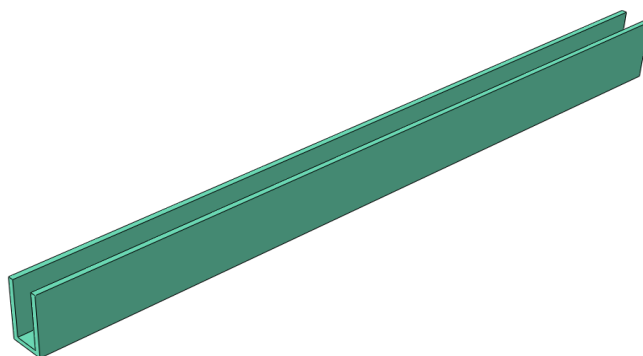
6 Αποτελέσματα ανάλυσης για ποσοστό διάβρωσης 12%

6.1 Δοκός χωρίς ενίσχυση με διάβρωση $\Delta w=12\%$, N12

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των διαβρωμένων δοκών με ποσοστό $\Delta w=12\%$, N12, R12, S12. Η διάβρωση, όπως έχει είδη αναφερθεί επιφέρει αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού και στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα. Ως μη περισφιγμένο σκυρόδεμα θεωρείται το τμήμα του κορμού με πάχος $c=22$ mm. Το τμήμα αυτό έχει διαφορετικό νόμο θλίψης όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 5.5, εισάγοντας τον μειωτικό συντελεστή ζ . Με τον ίδιο συντελεστή πολλαπλασιάστηκε και η εφελκυστική αντοχή, εισάγοντας νέα μειωμένη $\sigma_i' = \zeta * \sigma_i$. Το μέτρο ελαστικότητας είναι ίδιο. Όλες οι άλλες παράμετροι του μοντέλου CDP παραμένουν ίδιες.

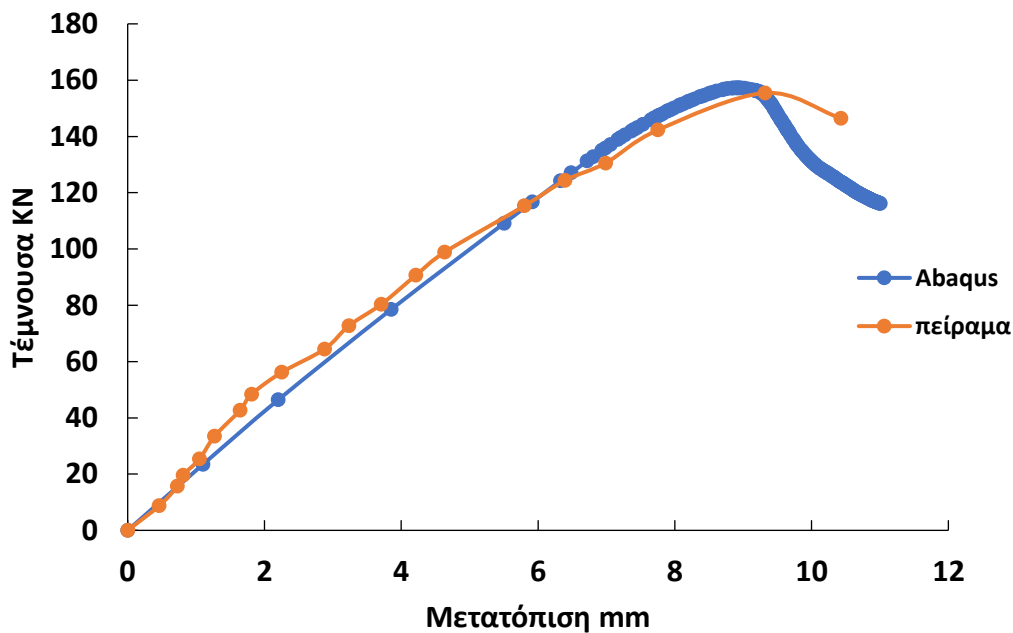


Σχήμα 6.1 Διαβρωμένη δοκός όπου διακρίνεται η διαφοροποίηση του πυρήνα σκυροδέματος από την επικάλυψη



Σχήμα 6.2 Μη περισφιγμένο σκυρόδεμα κορμού πάχους $c=22$ mm

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου N12, ύστερα από την βαθμονόμηση. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας του πειράματος και της ανάλυσης. Παρατηρούμε ότι οι δυο καμπύλες είναι πολύ κοντά. Η ανάλυση έχει πιάσει το μέγιστο οριακό φορτίο και την αντίστοιχη μετατόπιση. Όπως και στις άλλες αναλύσεις, το ίδιο και εδώ χρησιμοποιείται πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας και συγκεκριμένα το 7% του πραγματικού E_0 . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

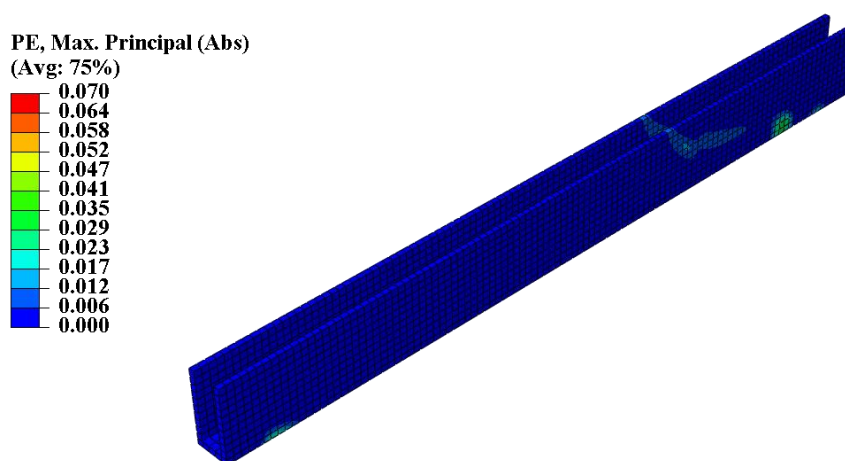


Σχήμα 6.3 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου N12 με βαθμονόμηση

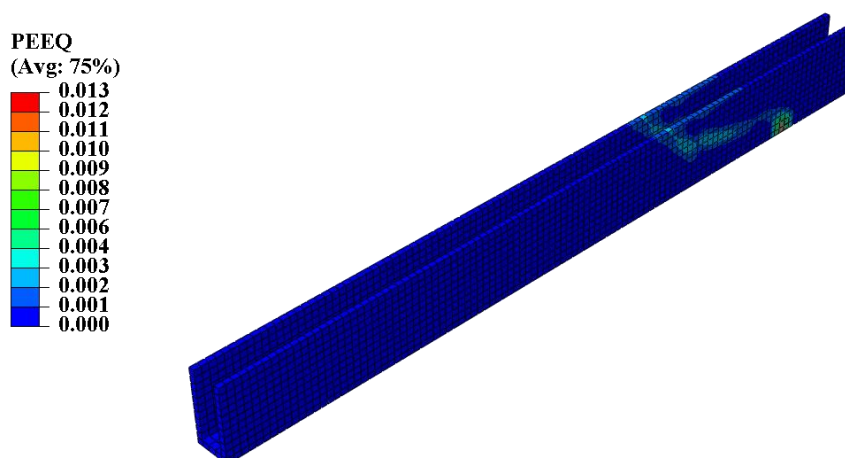
Πίνακας 6.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου N12

	Πείραμα	Abaqus
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	35.6	2.5
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	2.2/6.1	6.1
Ενέργεια θραύσης G_f (N/mm)	0.143	1.0
Βύθιση (mm)	9.29	8.97
Συνολική Τέμνουσα δύναμη (KN)	155	158

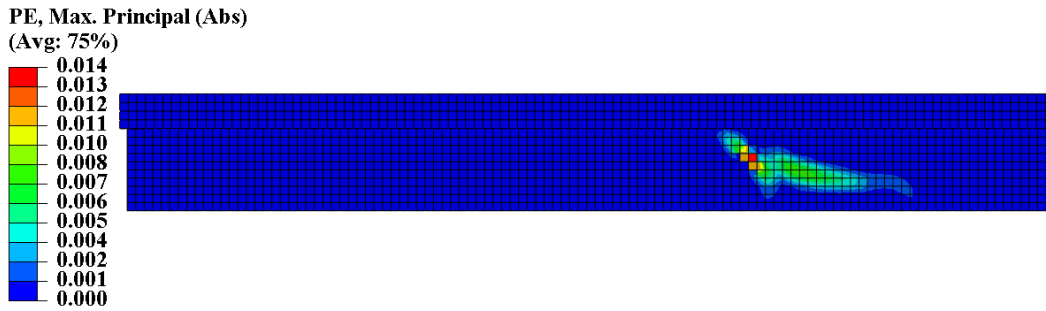
Παρακάτω παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις PE και PEEQ στην επικάλυψη και στον πυρήνα της δοκού. Παρατηρούμε ότι η βλάβη στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα είναι πολύ μεγαλύτερη από το περισφιγμένο, εξαιτίας της μειωμένης αντοχής του (μειωτικός συντελεστής ζ) καθώς ακόμα και από την αντίστοιχη του μοντέλου N00.



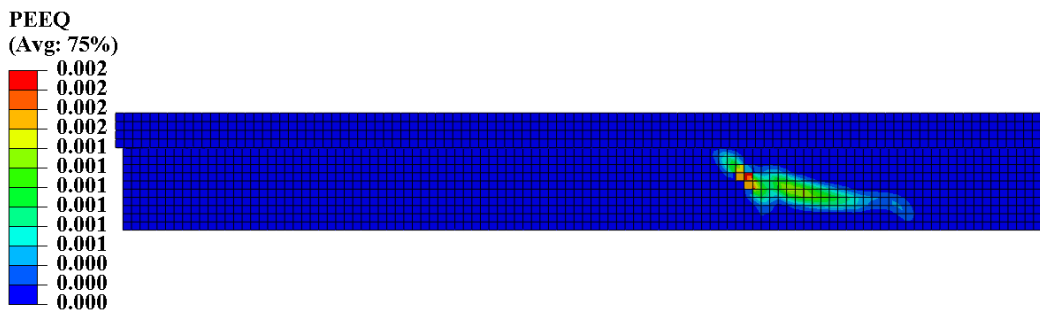
Σχήμα 6.4 Πλαστικές παραμορφώσεις στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα μοντέλου N12



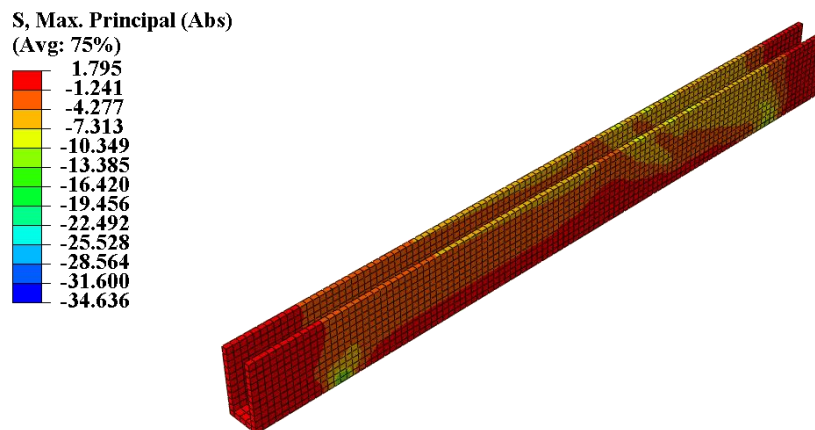
Σχήμα 6.5 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις επικάλυψης μοντέλου N12



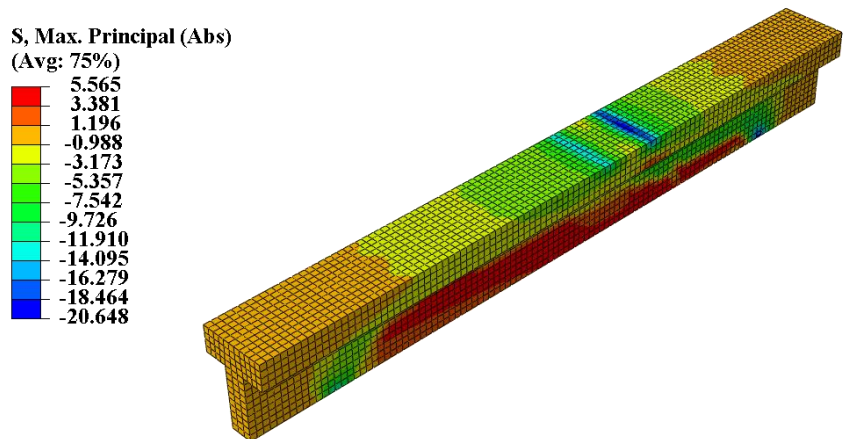
Σχήμα 6.6 Πλαστικές παραμορφώσεις περισφιγμένου σκυροδέματος N12



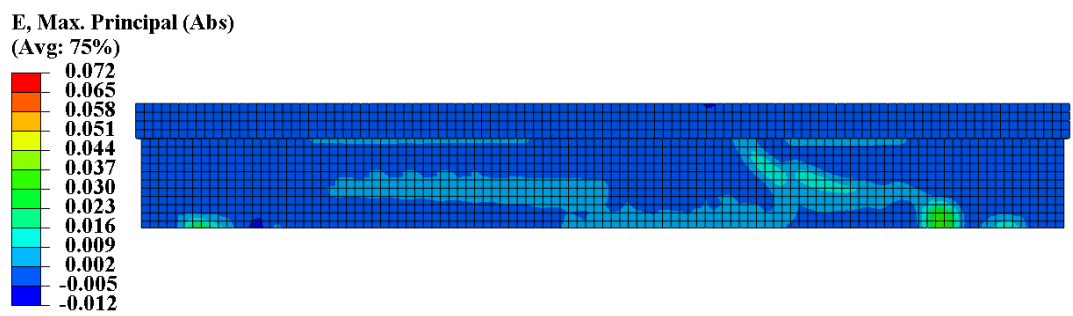
Σχήμα 6.7 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις περισφιγμένου σκυροδέματος μοντέλου N12



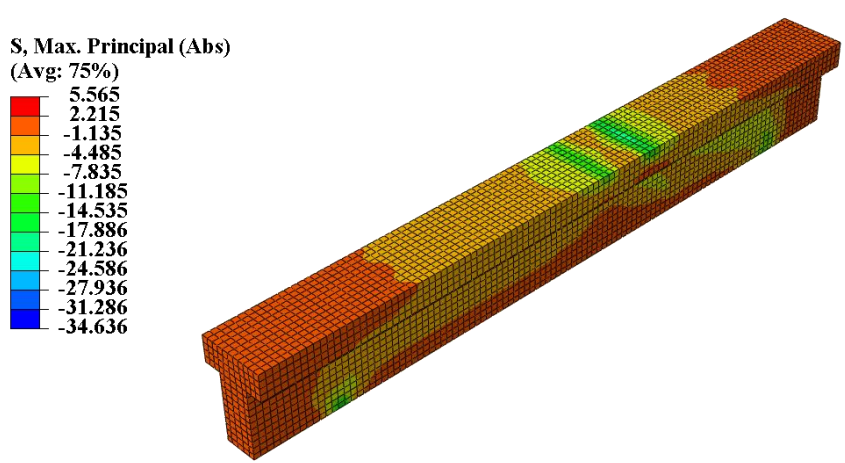
Σχήμα 6.8 Αναπτυσσόμενες τάσεις στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα μοντέλου N12



Σχήμα 6.9 Αναπτυσσόμενες τάσεις στο περισφιγμένο σκυρόδεμα μοντέλου N12

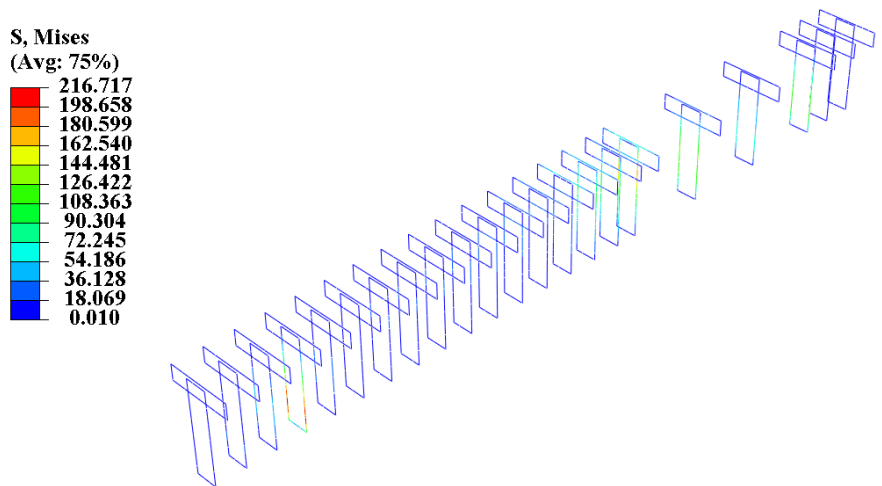


Σχήμα 6.10 Παραμορφώσεις σκυροδέματος N12

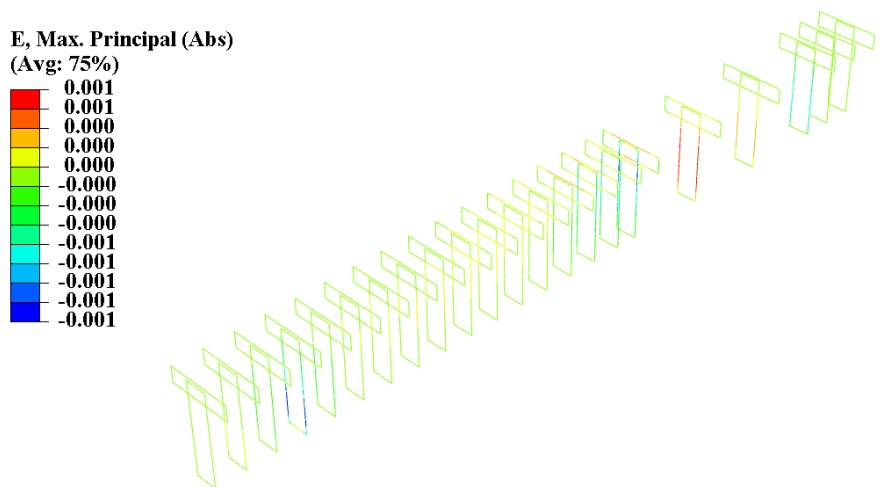


Σχήμα 6.11 Αναπτυσσόμενες τάσεις στην δοκό N12

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι τάσεις Von Mises και οι παραμορφώσεις του οπλισμού διατμήσεως του μοντέλου N12. Παρατηρούμε ότι οι οπλισμοί δεν έχουν διαρρεύσει όπως και στα άλλα μοντέλα. Ακόμα διαπιστώνουμε ότι οι οπλισμοί αναπτύσσουν μικρότερη τάση από τους αντίστοιχους του μοντέλου N00, ενώ η μέγιστη τάση παρατηρείται και σε διαφορετικό συνδετήρα και συγκεκριμένα στο μοντέλο N00 στον συνδετήρα κάτω από το σημείο επιβολής, ενώ εδώ στον συνδετήρα της αριστερής στήριξης.



Σχήμα 6.12 Τάσεις Von Mises οπλισμού μοντέλου N12

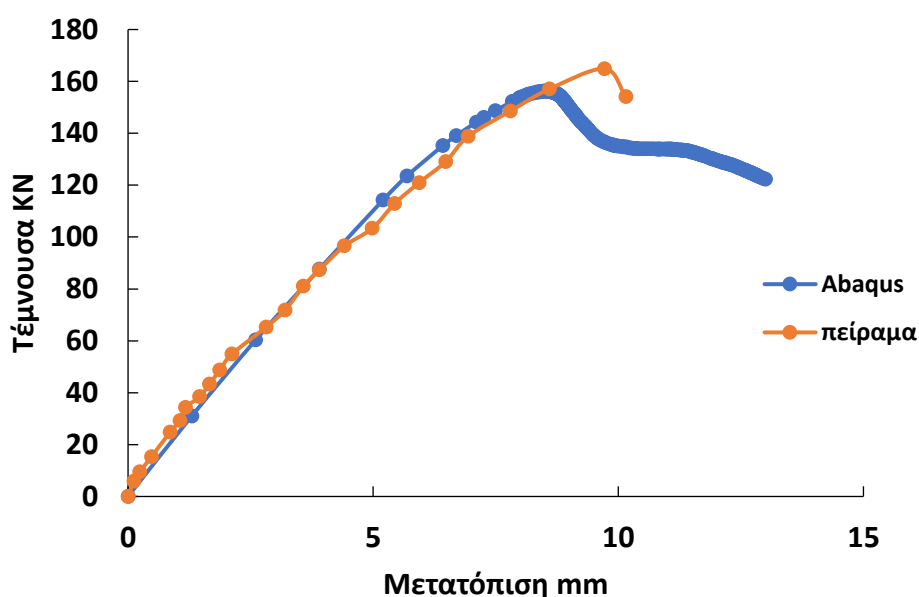


Σχήμα 6.13 Ανηγμένες παραμορφώσεις οπλισμού μοντέλου N12

6.2 Δοκός ενισχυμένη με ράβδους με διάβρωση $\Delta w=12\%$, R12

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ενισχυμένης δοκού με ράβδους CFRP με διάβρωση $\Delta w=12\%$.

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας της ανάλυσης και του πειράματος με βαθμονόμηση. Η κλίση των διαγραμμάτων είναι ικανοποιητική, ενώ παρατηρείται ένα σφάλμα της τάξης 5% στο μέγιστη τέμνουσα. Στον πίνακα 6.2 φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα.

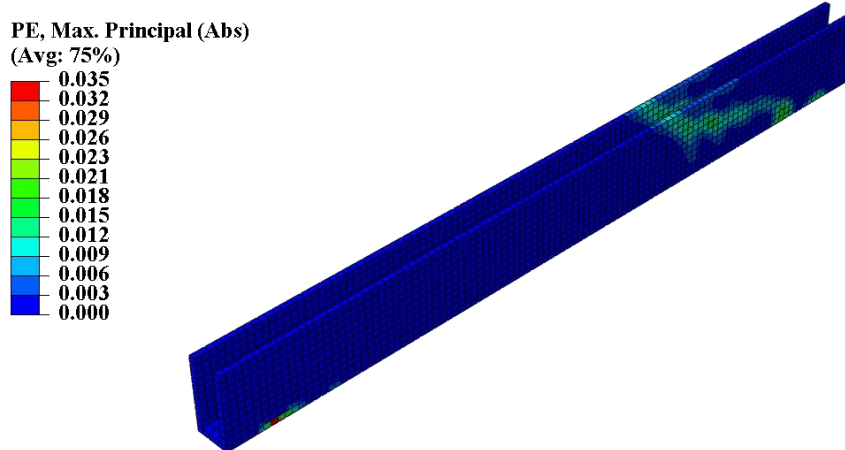


Σχήμα 6.14 Καμπύλη Ικανότητας μοντέλου R12 με βαθμονόμηση

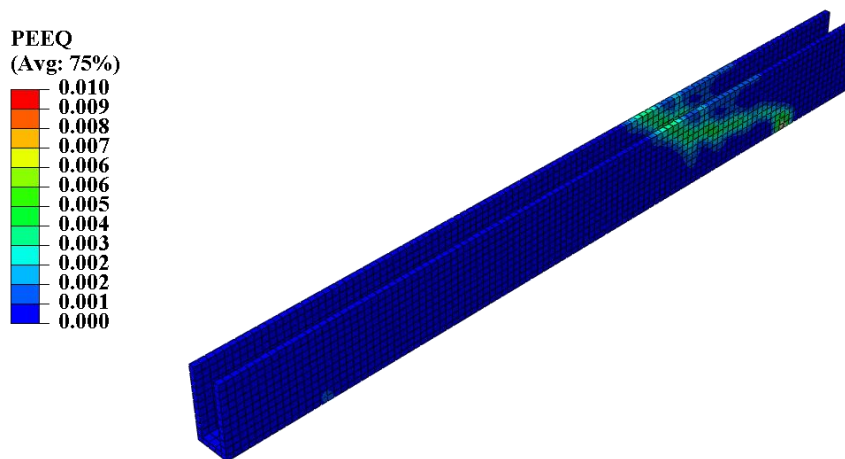
Πίνακας 6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου R12

	Πείραμα	Abaqus
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	33.5	3.0
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	1.9/5.3	5.3
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.14	1.0
Βύθιση (mm)	9.69	8.5
Συνολική Τέμνουσα δύναμη (KN)	164.8	156.2

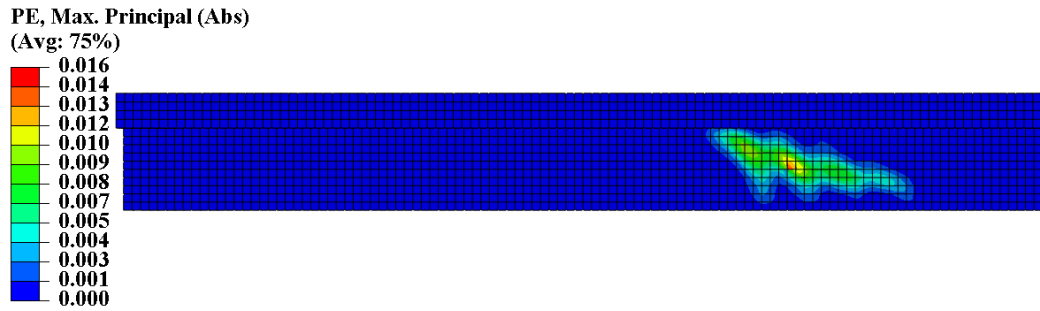
Στα σχήματα 6.15 και 6.16 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις PE και PEEQ στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα, ενώ στα σχήματα 6.17 και 6.18 του πυρήνα. Εξαιτίας της μικρότερης αντοχής της επικάλυψης, η πλαστική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από του πυρήνα.



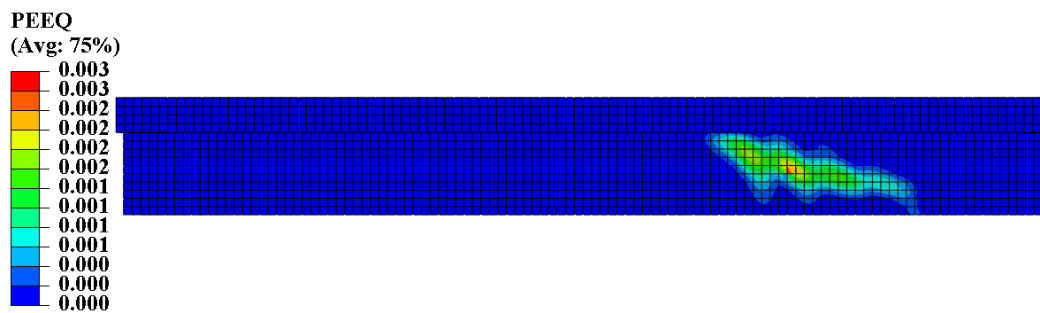
Σχήμα 6.15 Πλαστικές παραμορφώσεις στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα μοντέλου R12



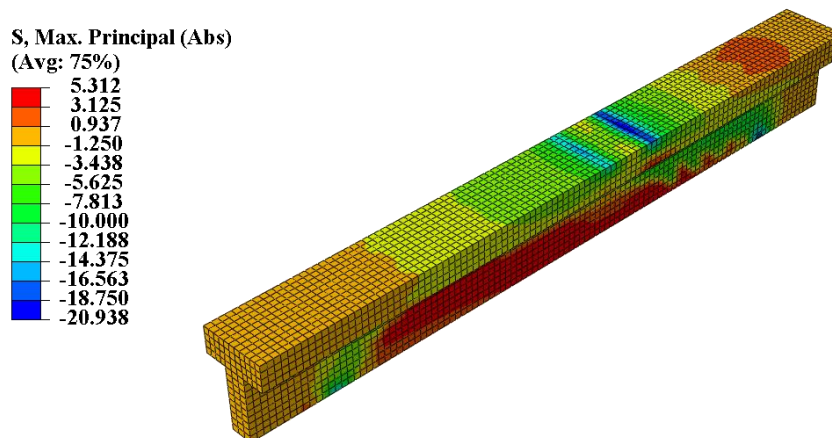
Σχήμα 6.16 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις επικάλυψης μοντέλου R12



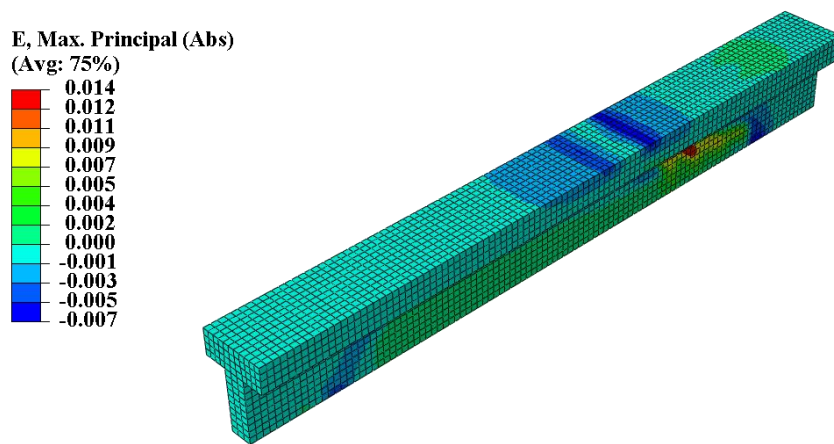
Σχήμα 6.17 Πλαστικές παραμορφώσεις περισφιγμένου σκυροδέματος μοντέλου R12



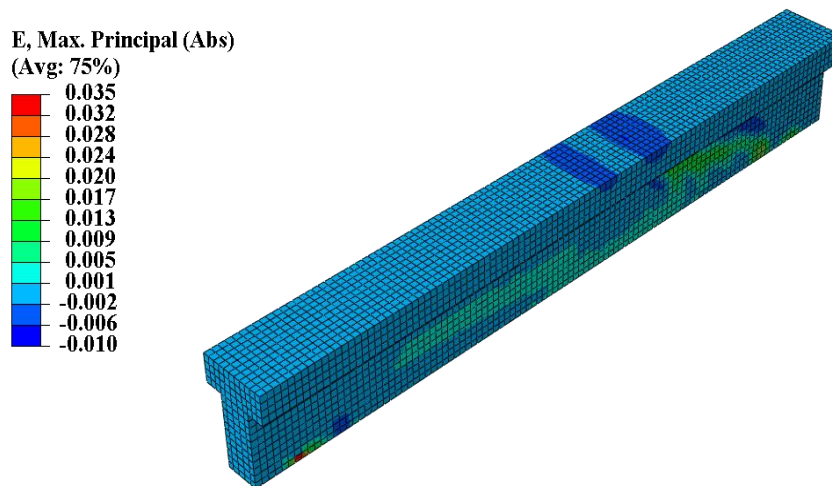
Σχήμα 6.18 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις περισφιγμένου σκυροδέματος μοντέλου R12



Σχήμα 6.19 Αναπτυσσόμενες τάσεις στο περισφιγμένο σκυρόδεμα του μοντέλου R12

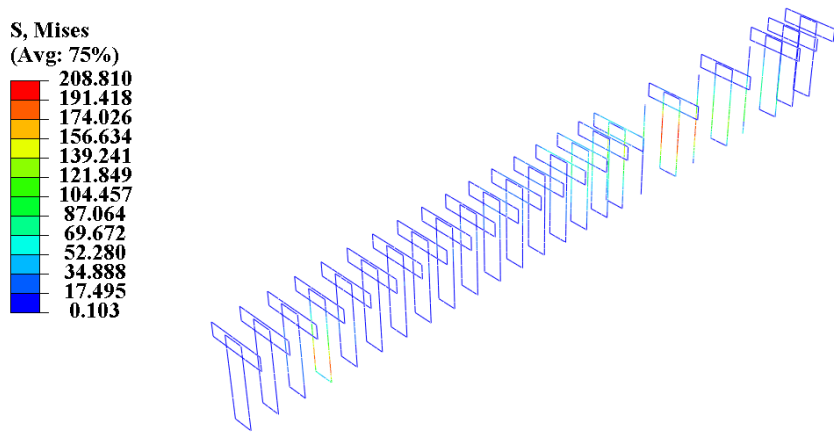


Σχήμα 6.20 Παραμορφώσεις στο περισφιγμένο σκυρόδεμα του μοντέλου R12

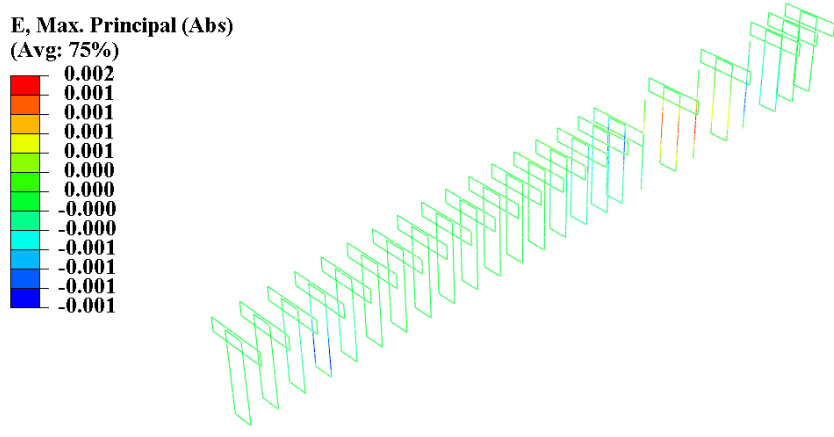


Σχήμα 6.21 Παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα μοντέλου R12

Στα σχήματα 6.22, 6.23 παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises και οι παραμορφώσεις του οπλισμού αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η μεσαία ράβδος ενίσχυσης και ο μεσαίος συνδετήρας αναπτύσσουν μεγαλύτερη τάση όπως και η αντίστοιχη δοκός R00, αλλά μεγαλύτερη από εκείνους.



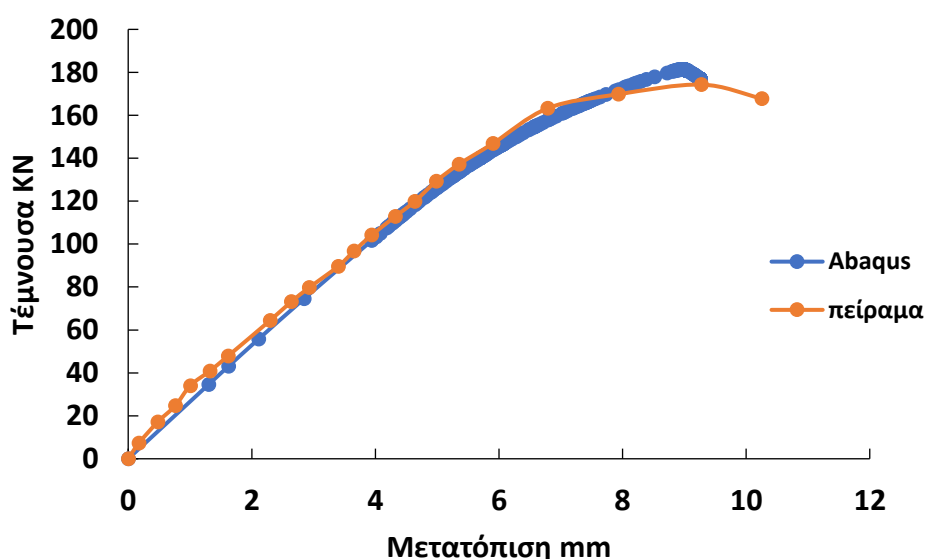
Σχήμα 6.22 Τάσεις Von Mises οπλισμου μοντέλου R12



Σχήμα 6.23 Παραμορφώσεις οπλισμού μοντέλου R12

6.3 Δοκός ενισχυμένη με μανδύα με διάβρωση $\Delta w=12\%$, S12

Στο σχήμα 6.24 φαίνονται οι καμπύλες ικανότητας της ενισχυμένης δοκού με μανδύα με ποσοστό διάβρωσης $\Delta w=12\%$, του πειράματος και της ανάλυσης ύστερα από βαθμονόμηση. Παρατηρούμε ότι οι δυο καμπύλες ταυτίζονται σε σημαντικό βαθμό. Παρατηρούμε ότι η ανάλυση πετυχαίνει μεγαλύτερο φορτίο από το πείραμα κατά 7 KN, δηλαδή έχουμε ένα σφάλμα της τάξης του 4%. Ως εφελκυστική αντοχή εισήγαμε την τιμή 3 MPa, την μισή δηλαδή της εφελκυστικής εκ κάμψεως. Ακόμα, όπως στην περίπτωση S00, ως γωνία εσωτερικής τριβής χρησιμοποιήθηκε η τιμή $\psi=40^\circ$, ενώ όλες οι άλλες παράμετροι του καταστατικού μοντέλου CDP παρέμειναν ίδιες. Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα.

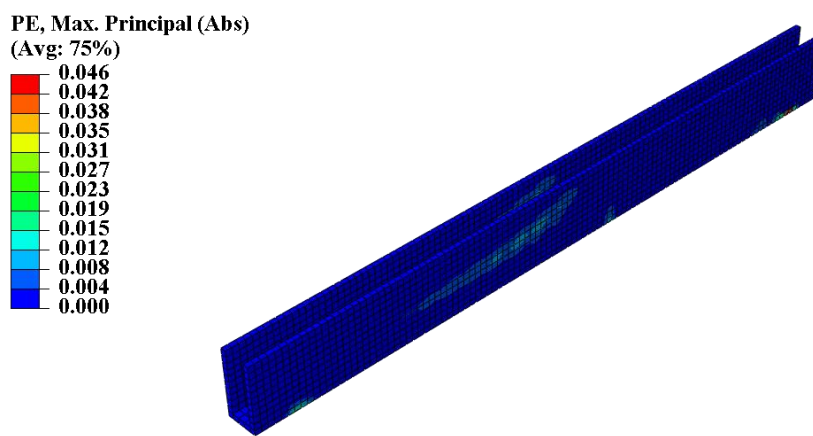


Σχήμα 6.24 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου S12 με βαθμονόμηση

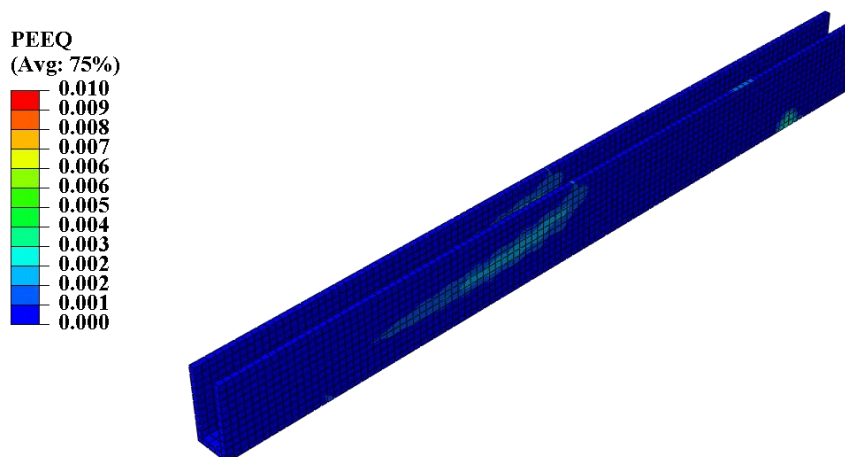
Πίνακας 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου S12

	Πείραμα	Abaqus
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	36	3.0
Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	2.1/6.1	3.0
Ενέργεια θραύσης σκυροδέματος Gf (N/mm)	0.14	1.0
Βύθιση (mm)	9.24	8.96
Συνολική τέμνουσα δύναμη (KN)	174.3	181.3

Στις εικόνες 6.25 και 6.26 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις PE και PEEQ που αναπτύσσονται στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα ενώ στα σχήματα 6.28, 6.29 στο περισφιγμένο. Όπως και στο μοντέλο S00, έτσι και εδώ η πλαστικότητα αναπτύσσεται στο μη εξεταζόμενο τμήμα, εξαιτίας της αποτελεσματικής δράσης του μανδύα, ενώ η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση είναι στην δεξιά στήριξη η οποία είναι πιο κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου και το κομμάτι εκείνο είναι χωρίς ενίσχυση.

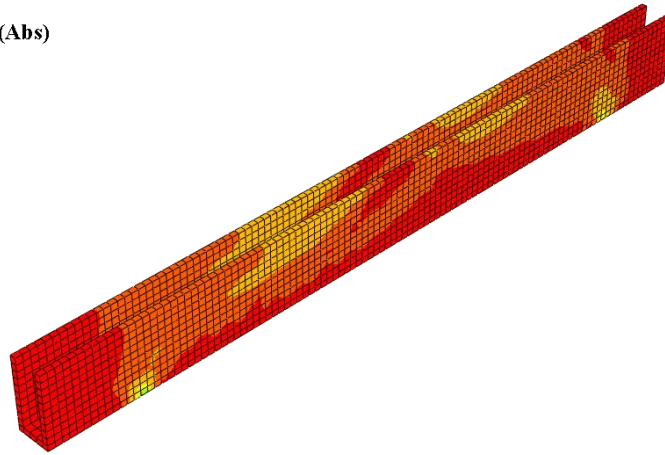
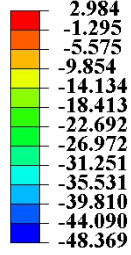


Σχήμα 6.25 Πλαστικές παραμορφώσεις στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα μοντέλου S12



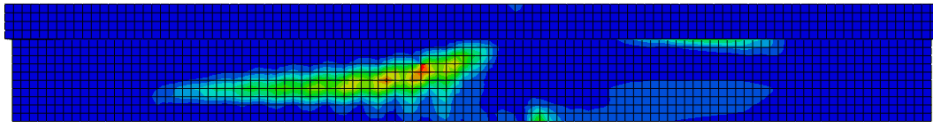
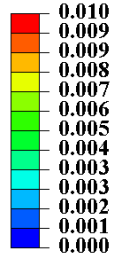
Σχήμα 6.26 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις επικάλυψης μοντέλου S12

S, Max. Principal (Abs)
(Avg: 75%)



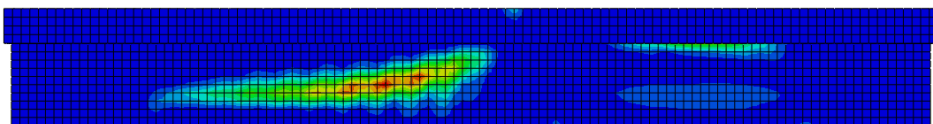
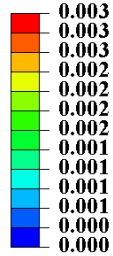
Σχήμα 6.27 Αναπτυσσόμενες τάσεις στο μη περισφιγμένο σκυρόδεμα μοντέλου S12

PE, Max. Principal (Abs)
(Avg: 75%)



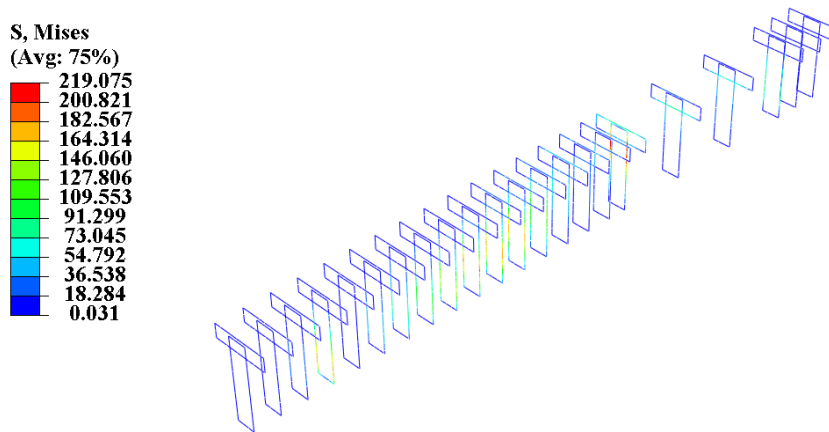
Σχήμα 6.28 Πλαστικές παραμορφώσεις πυρήνα μοντέλου S12

PEEQ
(Avg: 75%)

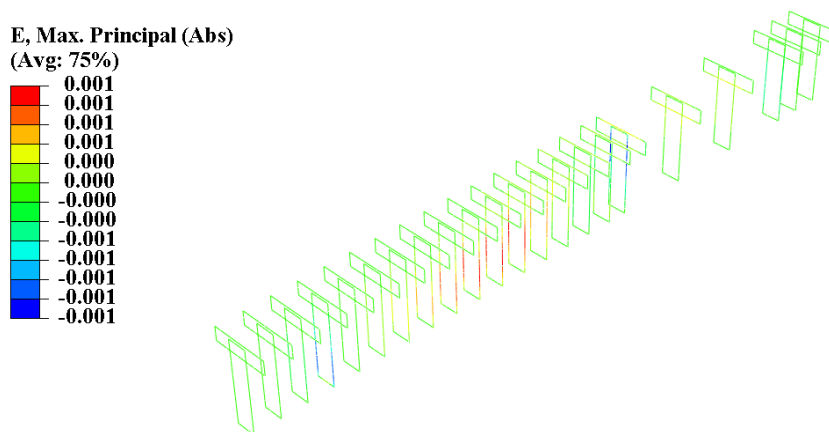


Σχήμα 6.29 Ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, PEEQ, πυρήνα μοντέλου S12

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises του σπλισμού. Παρατηρούμε ότι οι συνδετήρες του μη εξεταζόμενου τμήματος αναπτύσσουν μεγαλύτερη τάση σε σχέση του εξεταζόμενου εξαιτίας της εκεί δράσης του μανδύα, οποίος αναλαμβάνει τον μεγαλύτερο εφελκυσμό. Ακόμα οι τάσεις είναι μικρότερες από το μοντέλο S00.



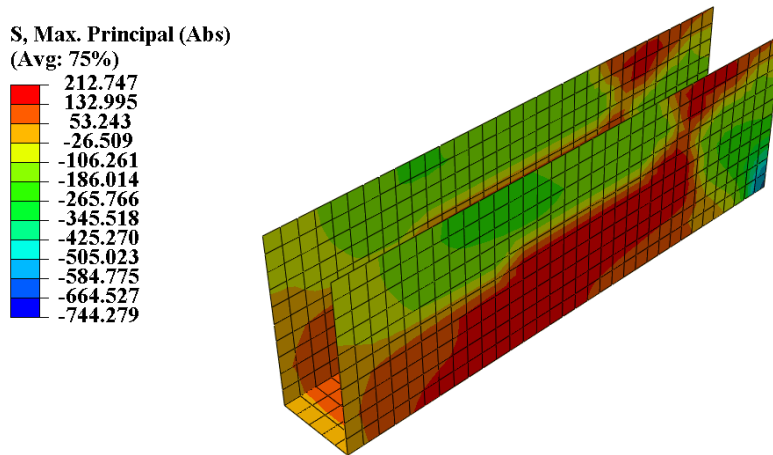
Σχήμα 6.30 Τάσεις Von Mises σπλισμου μοντελου S12



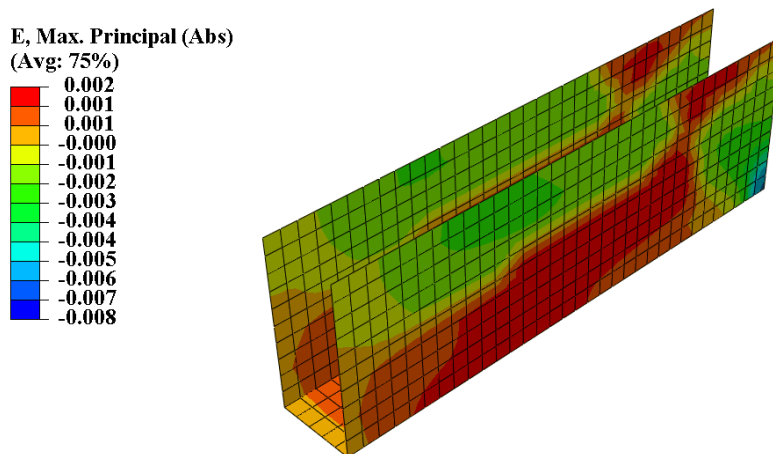
Σχήμα 6.31 Παραμορφώσεις σπλισμού μοντέλου S12

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μανδύα. Συγκεκριμένα στα σχήματα 6.32 και 6.33 φαίνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται, αντίστοιχα. Όπως και στην αντίστοιχη δοκό της προσομοίωσης S00, αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις από ότι εκείνες του πειράματος. Παρατηρούμε όμως ότι

αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις σε σχέση και με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς διάβρωση, S00. Παρόλα αυτά ούτε σε αυτή την περίπτωση έχουμε υπέρβαση αντοχής. Η μέγιστη θλιπτική τάση και παραμόρφωση αναπτύσσονται στο κάτω δεξί μέρος του μανδύα προς την στήριξη.



Σχήμα 6.32 Αναπτυσσόμενες τάσεις μανδύα μοντέλου S12



Σχήμα 6.33 Παραμορφώσεις μανδύα μοντέλου S12

6.4 Διερεύνηση διατμητικής αντοχής για μεγάλα ποσοστά διάβρωσης

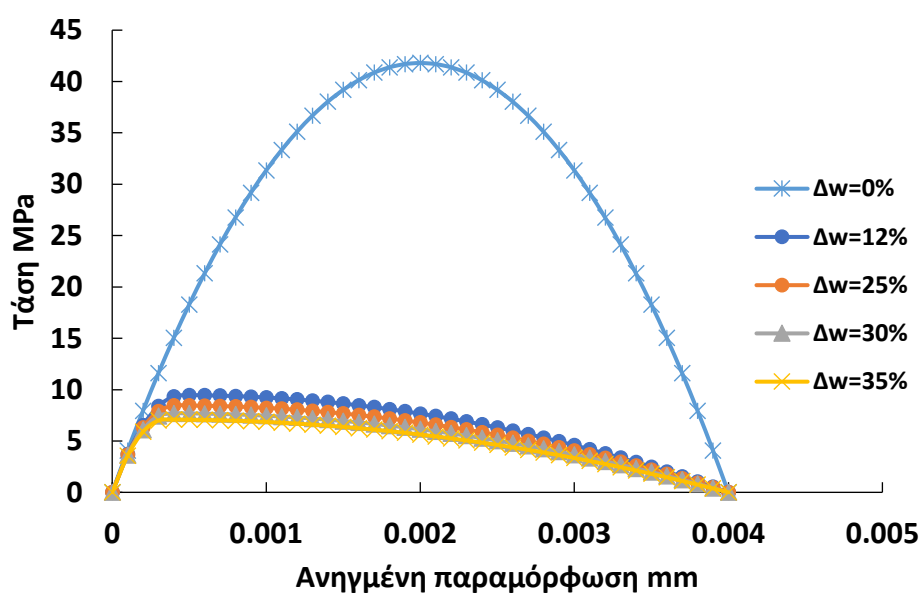
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της δοκού χωρίς ενίσχυση για ποσοστό διάβρωσης μεγαλύτερο από το 12% και συγκεκριμένα για 20, 25, 30, 35. Ως διαβρωμένο σκυρόδεμα θεωρείται και σε αυτές της περιπτώσεις το τμήμα του κορμού πάχους $c=22\text{mm}$. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει διαφορά στις αντοχές. Ο λόγος είναι ότι η αντοχή της επικάλυψης είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις διάβρωσης. Συνεπώς η αντοχή του λοξού θλιπτήρα είναι ίδια σε όλες τις δοκούς, η οποία είναι και η κρίσιμη παράμετρος, γιατί αν δεν ήταν τότε θα ήταν η εφελκυστική αντοχή του οπλισμού κρίσιμη, όπου όμως οι αντοχές για κάθε ποσοστό διάβρωσης είναι αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους. Στα σχήματα 6.34 και 6.35 παρουσιάζονται οι καμπύλες θλιπτικής αντοχής του μη περισφιγμένου σκυροδέματος και της εφελκυστικής αντοχής του οπλισμού διατμήσεως στο εξεταζόμενο τμήμα για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης. Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού, ενώ στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα μεγέθη που χρειάζονται για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή ζ , ο οποίος καθορίζει την θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος της επικάλυψης όπως υπολογίζονται από τους τύπους που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 5.5 και 5.6. Υπενθυμίζεται ότι Δw είναι το ποσοστό διάβρωσης του οπλισμού διατμήσεως του κορμού, 2χ η μείωση της διαμέτρου της ράβδου, w_{cr} η ρωγμή που δημιουργείται από την εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_r του σκυροδέματος, ενώ Σw_{cr} το άθροισμα του πλάτους των n ρωγμών.

Πίνακας 6.4 Ιδιότητες οπλισμού διατμήσεως στο εξεταζόμενο τμήμα για διάφορα ποσοστά διάβρωσης

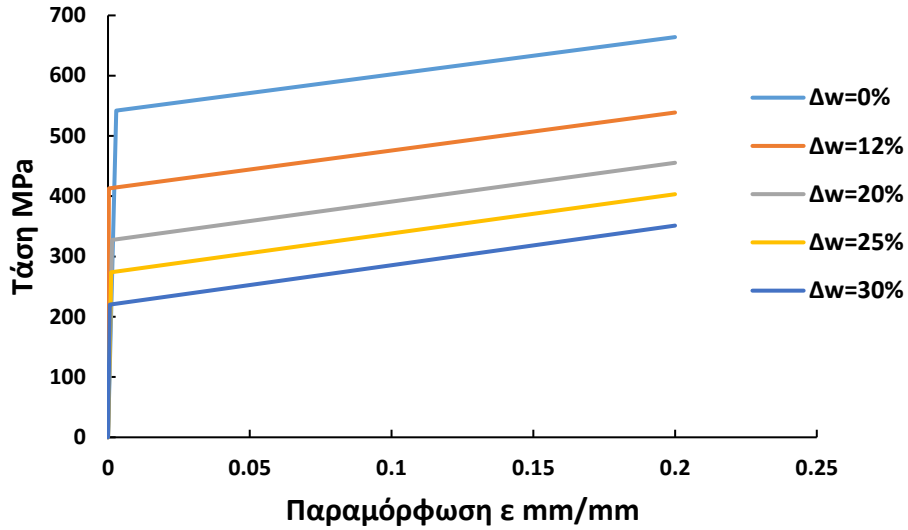
Δw %	σ_y MPa	σ_u MPa	E GPa	ϵ_y
20	327.7	455.5	143.2	0.00145
25	273.8	403.4	132.5	0.00106
30	220.1	351.3	121.8	0.00067
35	166.4	299.1	111.1	0.00028

Πίνακας 6.5 Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή ζ για διάφορα ποσοστά διάβρωσης

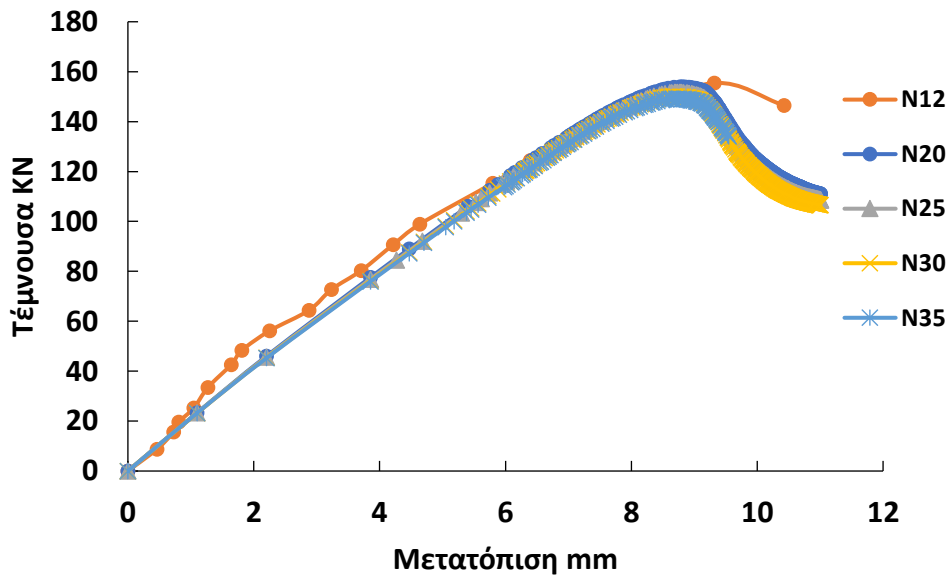
Δw %	$2x$ mm	W_{cr} mm	n	Σw_{cr} mm	ϵ_r	ζ
12	0.495	1.556	6	9.336	0.0145	0.290
20	0.844	2.653	6	15.919	0.0247	0.228
25	1.072	3.367	6	20.202	0.0313	0.202
30	1.307	4.105	6	24.630	0.0382	0.184
35	1.551	4.869	6	29.219	0.0453	0.170



Σχήμα 6.34 Καμπύλη θλιπτικής συμπεριφοράς μη περισιγμένου σκυροδέματος για διάφορα ποσοστά διάβρωσης



Σχήμα 6.35 Καμπύλη εφελκυστικής αντοχής οπλισμού διατήσεως για διάφορα ποσοστά διάβρωσης



Σχήμα 6.36 Καμπύλες ικανότητας μοντέλου N για μεγάλα ποσοστά διάβρωσης

7 Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως σκοπό την προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς διαβρωμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, με και χωρίς ενίσχυση, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Abaqus/Standard. Για την προσομοίωση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης του σκυροδέματος, ως καταστατικό μοντέλο βλάβης χρησιμοποιήθηκε το Concrete Damage Plasticity, CDP, το οποίο οδήγησε σε αξιόπιστα συμπεράσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι με εφαρμογή των πραγματικών τιμών του μέτρου ελαστικότητας και της ενέργειας θραύσης του σκυροδέματος και των συνιστώμενων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, πετυχαίνουμε την εύρεση του οριακού φορτίου, αλλά όχι τις πραγματικές μετατοπίσεις.

Προς επίτευξη της προσομοίωσης της πραγματικής συμπεριφοράς της δοκού απαιτείται κατάλληλη βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί η μεγάλη μείωση του μέτρου ελαστικότητας, η μεγάλη αύξηση στην ενέργεια θραύσης του σκυροδέματος καθώς επίσης και στην γωνία εσωτερικής τριβής (dilation angle), ενώ αλλαγή του K_c που καθορίζει το σχήμα της επιφάνειας διαρροής δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Η προσομοίωση της διάβρωσης πετυχαίνεται με μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμού διάβρωσης και μείωση της θλιπτικής και εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος της επικάλυψης του κορμού πάχους $c=22$ mm. Άλλοι παράγοντες όπως μείωση της αντοχής του πυρήνα σκυροδέματος ή μείωση της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος δεν ελήφθησαν υπόψη.

Τέλος για μεγάλα ποσοστά διάβρωσης η μη ενισχυμένη δοκός (N) δεν παρουσιάζει αλλαγή στην διατμητική της αντοχή.

8 Βιβλιογραφία

Qin, S., Dirar, S., Yang, J., Chan, A. H., & Elshafie, M. (2015). CFRP shear strengthening of reinforced-concrete T-beams with corroded shear links. *Journal of Composites for Construction*, 19(5), 04014081.

Σπυράκος, Κ. (2004). Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία. *ΤΕΕ, Αθήνα*.

ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9

Ou, Y. C., Fan, H. D., & Nguyen, N. D. (2013). Long-term seismic performance of reinforced concrete bridges under steel reinforcement corrosion due to chloride attack. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(14), 2113-2127.

Mercan, B., Schultz, A. E., & Stolarski, H. K. (2010). Finite element modeling of prestressed concrete spandrel beams. *Engineering Structures*, 32(9), 2804-2813.

Sümer, Y., & Aktaş, M. (2015). Defining parameters for concrete damage plasticity model. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 1(3), 149-155.

Vieira, A. D. A., Triantafyllou, S. P., & Bournas, D. A. (2020). Strengthening of RC frame subassemblies against progressive collapse using TRM and NSM reinforcement. *Engineering Structures*, 207, 110002.

Genikomsou, A. S., & Polak, M. A. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering structures*, 98, 38-48.

Λήδα Γκίβαλου – Μαρία Ελένη Μιτζήθρα «Διάβρωση και προστασία. Οπλισμένου Σκυροδέματος».