



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΥΠΟΣΤΕΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ν. Θεοδώρου

Επιβλέπων: Σάββας Τριανταφύλλου, Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Δημήτριος Ν. Θεοδώρου

«Αποτίμηση της διατμητικής αντοχής ενισχυμένων στοιχείων οπλισμένου
σκυροδέματος που έχουν υποστεί διάβρωση»

Διπλωματική Εργασία

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Dimitrios N. Theodorou

“Nonlinear response of corroded reinforced concrete members strengthened in shear”

Diploma Thesis

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

Athens, July 2021

Copyright © Δημήτριος Ν. Θεοδώρου, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Dimitrios N. Theodorou, 2021
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author. Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

*Scientists study the world as it is,
engineers create the world that never has been*
Theodore von Kármán (1881-1963)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή των Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Σε όλα τα χρόνια της φοίτησής μου ήρθα σε επαφή με μαθήματα και διδάσκοντες, οι οποίοι μου γνώρισαν την αξία του επαγγέλματος του πολιτικού μηχανικού και τον σημαντικό ρόλο που επιτελεί στη διαμόρφωση της κοινωνίας μας. Αναμφίβολα όλος αυτός ο καιρός ήταν γεμάτος πίεση, άγχος και δυσκολίες, ωστόσο δε μετάνιωσα ούτε μία στιγμή για την επιλογή αυτής της σχολής. Νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Αρχικά, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, τον κύριο Σάββα Τριανταφύλλου. Μέσα από αυτή τη διπλωματική γνώρισα έναν άνθρωπο, στο πρόσωπο του οποίου αποτυπώνονται όλες εκείνες οι αρετές και οι αξίες που συνθέτουν το σωστό καθηγητή. Υπομονετικός, καθοδηγητικός, επεξηγηματικός και πάνω από όλα πρόθυμος να απαντάει σε οποιαδήποτε απορία μου. Ένας άριστος γνώστης του αντικειμένου του, που μου καλλιέργησε το ζήλο και την επιμονή μέσω της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Θεωρώ ανεκτίμητη τη συνολική προσφορά του και τον ευγνωμονώ που με εμπιστεύθηκε να δουλέψουμε πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Samir Dirar, αναπληρωτή καθηγητή του Πανεπιστημίου του Birmingham και έναν από τους συγγραφείς μίας εργασίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική. Οι συμβουλές του και η εποπτεία του, μέσα από κάποιες, από κοινού με τον κύριο Τριανταφύλλου, διαδικτυακές συναντήσεις μας έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διπλωματική μου εργασία.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για όλες εκείνες τις υπέροχες στιγμές που περάσαμε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και συγκεκριμένα, τους γονείς μου Νίκο και Μαρία, αλλά και τον αδερφό μου Χρήστο, για την απεριόριστη συμπαράσταση, υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια. Τίποτα δε θα ήταν εφικτό χωρίς την αμέριστη συμβολή και βοήθειά τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xiv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xvi
ABSTRACT	xvii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Παρουσίαση του προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής και μεθοδολογία.....	4
1.3 Ερευνητικοί στόχοι.....	5
1.4 Δομή εργασίας	6
2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	7
2.1 Δοκίμια	7
2.2 Μηχανικές ιδιότητες υλικών	9
2.3 Προετοιμασία δοκιμών	10
2.4 Ενοργάνωση	11
2.5 Αποτελέσματα	11
3 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	15
3.1 Εισαγωγή	15
3.2 Προσομοίωση φορέα	16
3.3 Συνοριακές συνθήκες και περιορισμοί	19
3.4 Τύπος στοιχείου και διακριτοποίηση φορέα.....	21
3.5 Υλικά προσομοίωσης.....	28
3.5.1 Πλαστική συμπεριφορά σκυροδέματος.....	29
3.5.2 Θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος	31
3.5.3 Εφελκυστική συμπεριφορά σκυροδέματος.....	33
3.5.4 Χάλυβας οπλισμού	35
3.6 Φόρτιση.....	35
3.7 Αποτελέσματα ανάλυσης.....	36
3.8 Παραμετρική διερεύνηση	40
4 ΜΑΚΡΟΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	44
4.1 Εισαγωγή	44
4.2 Μοντελοποίηση φορέα.....	45
4.2.1 Χωρική διάσταση φορέα.....	45
4.2.2 Συνδεσμολογία φορέα	45

4.2.3	Συνοριακές συνθήκες φορέα	46
4.2.4	Παραμετροποίηση φορέα	46
4.3	Τεχνολογία στοιχείου	47
4.3.1	Στοιχεία διανεμημένης πλαστικότητας με πολυστρωματική ανάλυση διατομής 47	
4.3.2	Στοιχεία μεθόδου δυνάμεων	51
4.4	Υλικά διατομής	52
4.4.1	Σκυρόδεμα	53
4.4.2	Χάλυβας σπλισμού	54
4.4.3	Διατμητικά υλικά	55
4.5	Φόρτιση και λοιπές παράμετροι επίλυσης	60
4.6	Αποτελέσματα	62
5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	65
5.1	Εισαγωγή	65
5.2	Χρονική εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης	65
5.3	Επίδραση της διάβρωσης στις ιδιότητες των υλικών	69
5.3.1	Επιρροή στις ιδιότητες του σκυροδέματος	69
5.3.2	Επιρροή στις ιδιότητες του χάλυβα σπλισμού	72
5.4	Προσομοίωση διάβρωσης στο OpenSees	73
5.5	Αποτελέσματα ανάλυσης	74
6	ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ ΜΕ CFRP ΜΕΘΟΔΟΥΣ	79
6.1	Γενικά	79
6.2	Ενίσχυση με τη μέθοδο των ενσωματωμένων ράβδων	79
6.2.1	Κανονισμός ACI 440.1R-15	79
6.2.2	Κανονισμός JSCE 1997	80
6.2.3	Μέθοδος των L.D. Lorenzis και A. Nanni	81
6.2.4	Μέθοδος των S.J.E. Dias και J.A.O. Barros	83
6.2.5	Μέθοδος των P. Valerio, T.J. Ibell και A.P. Darby	85
6.2.6	Μέθοδος του A.K.M.A. Islam	85
6.3	Ενίσχυση με τη μέθοδο του εξωτερικού συνεχούς μανδύα	86
6.3.1	Κανονισμός ACI 440.2R-08	86
6.3.2	Μέθοδος του T.C. Triantafillou	88
6.3.3	Μέθοδος των T.C. Triantafillou και C.P. Antonopoulos	89
6.3.4	Μέθοδος των Z. Zhang και T. Hsu	89
6.3.5	Μέθοδος των G. Monti και M.A. Liotta βάσει κανονισμού CNR-DT200/2004 90	
6.3.6	Μέθοδος των A. Mofidi και O. Chaallal	92

6.4	Προσομοίωση ενίσχυσης στο OpenSees.....	93
6.5	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	94
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
7.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	107
7.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	109
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Συνέπειες διάβρωσης στο χάλυβα οπλισμού.....	2
Σχήμα 1.2 Μέθοδοι ενίσχυσης: (αριστερά) συνεχή φύλλα εξωτερικού μανδύα, (δεξιά άνω) NSM τεχνική ράβδων, (δεξιά κάτω) DE τεχνική ράβδων	4
Σχήμα 2.1 Διατάξεις δοκών ως προς τους οπλισμούς και τα μέσα ενίσχυσης (όλες οι διαστάσεις σε mm).....	8
Σχήμα 2.2 Μη ενισχυμένο δοκίμιο και διατομές ενισχυμένης πλακοδοκού (όλες οι διαστάσεις σε mm).....	8
Σχήμα 2.3 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για όλες τις κατηγορίες πλακοδοκών	13
Σχήμα 2.4 Μορφή αστοχίας πλακοδοκού N00	14
Σχήμα 3.1 Διάταξη πλακοδοκού και μεταλλικών πλακών έδρασης και φόρτισης.....	17
Σχήμα 3.2 Διάταξη διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού.....	18
Σχήμα 3.3 Διαχωρισμός δοκού σε περιοχές	18
Σχήμα 3.4 Δέσμευση ενσωματωμένου οπλισμού	19
Σχήμα 3.5 Δέσμευση επιφανειών δοκού και μεταλλικών πλακών	20
Σχήμα 3.6 Συνοριακές συνθήκες πλακοδοκού και φόρτιση	21
Σχήμα 3.7 Από αριστερά προς δεξιά, τα στοιχεία δικτύωματος 2 και 3 κόμβων, το εξαεδρικό στοιχείο 8 κόμβων και το εξαεδρικό στοιχείο 20 κόμβων	24
Σχήμα 3.8 Από αριστερά προς δεξιά, σημεία Gauss των εξαεδρικών στοιχείων για πρώτη, δεύτερη και τρίτη τάξη ολοκλήρωσης.....	24
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για το στοιχείο C3D20	25
Σχήμα 3.10 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για το στοιχείο C3D20R	26
Σχήμα 3.11 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για τα στοιχεία C3D8 και C3D8S.....	26
Σχήμα 3.12 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για το στοιχείο C3D8R	26
Σχήμα 3.13 Διακριτοποίηση πλακοδοκού	28
Σχήμα 3.14 Επιφάνεια διαρροής στο χώρο επίπεδων τάσεων (αριστερά) και στο αποκλίνον επίπεδο (δεξιά)	30
Σχήμα 3.15 Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού στο αποκλίνον επίπεδο (αριστερά) και γωνία διάδοσης και εκκεντρότητα (δεξιά).....	30
Σχήμα 3.16 Τυπική καμπύλη θλίψης σκυροδέματος που χρησιμοποιεί το Abaqus	32
Σχήμα 3.17 Καμπύλη τάσης-ανελαστικής παραμόρφωσης για τη θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος στο CDP μοντέλο	33
Σχήμα 3.18 Γραμμική απώλεια εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος συναρτήσει του εύρους ρωγμής	34
Σχήμα 3.19 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης με το Abaqus.....	36
Σχήμα 3.20 Διαβάθμιση ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης	37
Σχήμα 3.21 Απεικόνιση των κύριων πλαστικών παραμορφώσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	37
Σχήμα 3.22 Απεικόνιση των μέγιστων κύριων τάσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	38

Σχήμα 3.23 Τάσεις Mises του οπλισμού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	38
Σχήμα 3.24 Διαβάθμιση ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων σε ενδιάμεσο βήμα της ανάλυσης.....	38
Σχήμα 3.25 Απεικόνιση των κύριων πλαστικών παραμορφώσεων σε ενδιάμεσο βήμα της ανάλυσης.....	39
Σχήμα 3.26 Απεικόνιση των μέγιστων κύριων τάσεων σε ενδιάμεσο βήμα της ανάλυσης.....	39
Σχήμα 3.27 Τάσεις Mises του οπλισμού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	39
Σχήμα 3.28 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της παραμέτρου ιξώδους.....	40
Σχήμα 3.29 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της γωνίας διάδοσης.....	41
Σχήμα 3.30 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της ενέργειας θραύσης.....	42
Σχήμα 3.31 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της ενέργειας θραύσης.....	43
Σχήμα 4.1 Μοντελική διάταξη πλακοδοκού.....	46
Σχήμα 4.2 Ορισμός quad patch στο OpenSees.....	48
Σχήμα 4.3 Ορισμός layer straight στο OpenSees.....	49
Σχήμα 4.4 Καμπύλη θλιπτικής συμπεριφοράς τάσης και παραμόρφωσης του σκυροδέματος.....	53
Σχήμα 4.5 Διγραμμικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του χάλυβα οπλισμού στο OpenSees.....	54
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του υλικού Concrete02 του OpenSees.....	57
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του υλικού Hysteretic του OpenSees.....	58
Σχήμα 4.8 Συνδυασμός αποκρίσεων σε διαφορετική διεύθυνση μέσα από την εντολή του section Aggregator.....	59
Σχήμα 4.9 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης με το OpenSees για τα δύο διατμητικά υλικά.....	62
Σχήμα 4.10 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, πειράματος, προσομοίωσης με το Abaqus και αριθμητικής προσομοίωσης με το OpenSees για το Concrete02.....	64
Σχήμα 5.1 Διάγραμμα κρίσιμης συγκέντρωσης χλωριούχων και λόγου (w/c).....	67
Σχήμα 5.2 Καμπύλες θλιπτικών τάσεων και παραμορφώσεων του σκυροδέματος, για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης για την περίπτωση της διάβρωσης αμιγώς των συνδετήρων.....	70
Σχήμα 5.3 Καμπύλες θλιπτικών τάσεων και παραμορφώσεων του σκυροδέματος, για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης για την περίπτωση της διάβρωσης του συνολικού οπλισμού.....	71
Σχήμα 5.4 Από αριστερά, τα patches της διατομής χωρίς διάβρωση, της διατομής με διάβρωση των συνδετήρων και της διατομής με διάβρωση του πλήρους οπλισμού...	71

Σχήμα 5.5 Διγραμμικές καμπύλες τάσεων και παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού, για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης.....	73
Σχήμα 5.6 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορα ποσοστά διάβρωσης στην περίπτωση διαβρωμένων συνδετήρων	75
Σχήμα 5.7 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορα ποσοστά διάβρωσης στην περίπτωση διαβρωμένου ολόκληρου του οπλισμού	76
Σχήμα 5.8 Ραβδόγραμμα απομείωσης διατμητικής αντοχής δοκού για διάφορα ποσοστά διάβρωσης για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.....	77
Σχήμα 6.1 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%	95
Σχήμα 6.2 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%	96
Σχήμα 6.3 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15% σε σχέση με τη N00 περίπτωση	97
Σχήμα 6.4 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%	98
Σχήμα 6.5 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%	99
Σχήμα 6.6 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35% σε σχέση με τη N00 περίπτωση	99
Σχήμα 6.7 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%	100
Σχήμα 6.8 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%.....	101
Σχήμα 6.9 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15% σε σχέση με τη N00 περίπτωση	102
Σχήμα 6.10 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%	103
Σχήμα 6.11 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%.....	104
Σχήμα 6.12 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35% σε σχέση με τη N00 περίπτωση	104
Σχήμα 6.13 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού του πειράματος για τις ράβδους και το μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστά διάβρωσης δοκού 7% και 12% σε σχέση με τη N00 περίπτωση	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες σκυροδέματος.....	9
Πίνακας 2.2 Ιδιότητες χάλυβα	10
Πίνακας 2.3 Ιδιότητες CFRP εξωτερικού μανδύα.....	10
Πίνακας 2.4 Ιδιότητες CFRP ράβδων.....	10
Πίνακας 2.5 Αποτελέσματα πειράματος.....	12
Πίνακας 3.1 Θέσεις σημείων Gauss και συντελεστές βάρους ανάλογα την τάξη ολοκλήρωσης	24
Πίνακας 3.2 Τιμές παραμέτρων πλαστικότητας μοντέλου CDP	31
Πίνακας 5.1 Ιδιότητες οπλισμών για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης των συνδετήρων.....	68

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα σημαντικό ποσοστό των υφιστάμενων κατασκευών έχει υπερβεί τη διάρκεια ζωής του. Εντός αυτού του χρονικού διαστήματος, οι κατασκευές υπόκεινται σε εντεινόμενες περιβαλλοντικές δράσεις και σε επαυξημένα φορτία που δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Ειδικά στην περίπτωση γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος, οι συνεπιβαλλόμενοι συχνότεροι και εντονότεροι κύκλοι φόρτισης συντελούν στην εμφάνιση ρηγματώσεων του σκυροδέματος, που διευκολύνουν τη διάβρωση του οπλισμού. Το φαινόμενο της διάβρωσης επηρεάζει σημαντικά τη διατμητική φέρουσα ικανότητα των κατασκευών, ενώ είναι αρκετά δαπανηρή η επιδιόρθωση, η ανακατασκευή ή η αντικατάσταση των διαβρωμένων στοιχείων της κατασκευής. Για αυτό το λόγο κρίνεται αδήριτη η μελέτη του φαινομένου αυτού. Ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισής της είναι η εφαρμογή μη διαβρούμενων μέσων ενίσχυσης από ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες άνθρακα (CFRP).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκεται η διατύπωση μιας μεθοδολογίας για την ανάλυση ενισχυμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι διάβρωσης. Πρώτα, επιχειρείται η αριθμητική προσομοίωση της αρχικής, μη ενισχυμένης και μη διαβρωμένης κατάστασης της δοκού. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιείται μέσω δύο διαφορετικών μεθόδων, ήτοι με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και με την αξιοποίηση της μακροπροσομοίωσης, μέσω των λογισμικών Abaqus και OpenSees, αντίστοιχα. Κάθε μεθοδολογία βαθμονομείται κατάλληλα ώστε να προσεγγιστεί όσο καλύτερα γίνεται το πείραμα αναφοράς, που υποβάλει δοκίμια ελέγχου με ή χωρίς διάβρωση και με ή χωρίς μέσα ενίσχυσης, ίδιας γεωμετρίας και χαρακτηριστικών, σε στατική pushover. Έχοντας εξακριβώσει ότι τα μακροστοιχεία μπορούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά της δοκού, υιοθετούνται σαν κύρια μέθοδος για την εξέταση της απόκρισης της δοκού έναντι διάβρωσης και ενίσχυσης. Διερευνώνται δύο περιπτώσεις διάβρωσης οπλισμού, μεμονωμένα των συνδετήρων και αυτών μαζί με το διαμήκη, σε πέντε ποσοστά διάβρωσης, 7%, 15%, 20%, 25% και 35%. Ύστερα εφαρμόζονται δύο μέθοδοι ενίσχυσης, αυτές των ενσωματωμένων ράβδων και του εξωτερικού συνεχούς μανδύα, με σκοπό να προβλεφθεί η ενισχυμένη αντοχή της δοκού. Μελετήθηκαν έξι σχέσεις για κάθε μέθοδο ενίσχυσης από την υφιστάμενη βιβλιογραφία. Η ανάλυση γίνεται σε δύο σενάρια διάβρωσης, εφαρμογή ενίσχυσης στο 15% διάβρωσης του πλήρους οπλισμού και εξέλιξη αυτής μέχρι το 35% μαζί με την ενίσχυση.

Η διπλωματική αυτή παρήγαγε σημαντικά συμπεράσματα, που άπτονται της συνολικής διαδικασίας ανάλυσής της μέσω των δύο μεθόδων προσομοίωσης, αλλά και συμπεράσματα που αφορούν τη διάβρωση του οπλισμού της και την ενίσχυσής της. Το σημαντικότερο από όλα είναι ότι η μακροπροσομοίωση είναι ικανή να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια τη μη γραμμική απόκριση των κατασκευών σε όλες τις εκφάνσεις τους, σε αμελητέο υπολογιστικό κόστος, έναντι της θεώρησης με τα μικροσκοπικά πεπερασμένα στοιχεία.

ABSTRACT

A significant proportion of the existing infrastructure has surpassed its, designed for, life expectancy. Within this time period, structures are subjected to intense environmental actions and to increased loads that had not been taken into account during their designing. This results in an increasing number of loading cycles, which often leads to fatigue induced damage, i.e., cracking. Propagating cracks facilitate the corrosion of the steel reinforcement. Corrosion greatly affects the shear strength of R/C members. An effective means of mitigating this detrimental effect, is the utilization of non-corrosive carbon fiber reinforced polymers (CFRP) as a strengthening solution.

This thesis aims at developing a robust methodology for the analysis of fiber reinforced polymer strengthened R/C beams considering the effect of corrosion. First, the case of a non-corroded and unstrengthened beam is examined and analyzed. . This simulation is performed by two different approaches, i.e. with finite elements and macro-elements, using Abaqus and OpenSees, respectively. Each method is suitably calibrated so as to approach the reference experiment, in which control samples with the same geometry and properties, having or not suffered corrosion and having or not been strengthened , are examined by static pushover analysis. After proving that macroelements can accurately describe the real behavior of the beam, macrosimulation is adopted in order to study the shear response of the beam against corrosion and strengthening applications. Two scenarios of corroded reinforcement are investigated, the transverse reinforcement only and both the transverse and longitudinal reinforcement of the beam, at five thresholds of corrosion, 7%, 15%, 20%, 25% and 35%. After that, two methods of strengthening are implemented, the deep embedded CFRP rods and the externally bonded continuous CFRP sheet, so as to predict the shear response of the strengthened beam. The study of strengthening methods included the use of six relations for each strengthening application from the existing literature. The strengthening analysis is performed in two levels of corrosion, firstly by implementing the CFRP composites at the 15% level of corrosion of the full reinforcement and secondly, by examining the evolution of corrosion up to 35% level along with the CFRP strengthening.

The present diploma thesis yielded some important conclusions, that refer to both the total procedure of the two method simulation and the simulation of corrosion and strengthening techniques. However, the most fundamental outcome of this work is that macroelement simulation is capable of describing the nonlinear response of the structures through all their states in a highly accurate way and mainly, at a negligible time cost, in contrast to the microscopic finite element simulation.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Παρουσίαση του προβλήματος

Στον κατασκευαστικό κλάδο το οπλισμένο σκυρόδεμα κατέχει μία σημαντική θέση, καθώς πληθώρα κατασκευών έχουν ως πρώτη ύλη αυτό. Από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευάζονται κτήρια, γέφυρες, σήραγγες, φράγματα, δρόμοι και γενικά οποιοσδήποτε κατασκευές είναι άρρηκτα συνυφασμένες με την ανθρώπινη διαβίωση και ανάπτυξη. Η ευρεία εφαρμογή του υλικού αυτού επετεύχθη χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει και συγκεκριμένα, εξαιτίας της οικονομικότητάς του σε σχέση με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, της ευκολίας στην εργασία του, αφού μπορεί να λαμβάνει οποιαδήποτε μορφή σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου, της υψηλής αντοχής του σε θλίψη και στο χρόνο καθώς και της πυραντίστασης που προσφέρει έναντι των διαφόρων δράσεων που επενεργούν σε αυτό.

Ωστόσο, ένα σημαντικό ποσοστό υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει υπερβεί το προσδόκιμο όριο ζωής σχεδιασμού του, που δύναται να θεωρηθεί το όριο των 50 ετών για συμβατικές κατασκευές και αυτό των 100 για γέφυρες (European Committee, 2002). Εντός αυτού του διαστήματος και έπειτα, έχουν συντελεστεί διάφορες κοινωνικοτεχνολογικές αλλαγές, όπως αλλαγή του πληθυσμού, αύξηση του ρυθμού κυκλοφορίας, ανάπτυξη βαρύτερων οχημάτων, αλλαγή του κλίματος με έντονες εναλλαγές θερμοκρασίας και γενικότερα αλλαγή της χρήσης των κατασκευών αυτών. Ως εκ τούτου, αυτές υπόκεινται σε εντεινόμενες, πλέον, περιβαλλοντικές δράσεις, που δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό τους, ή σε φορτία αυξημένης τιμής, που προσεγγίζουν αυτά με τα οποία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός τους με τους τότε ισχύοντες κανονισμούς. Τέτοιες δράσεις μπορεί να είναι οι συστολοδιαστολές του οπλισμού ή τα αυξημένα κινητά φορτία.

Αυτό συνεπάγεται τον αυξημένο αριθμό κύκλων φόρτισης της κατασκευής, που με τη σειρά του συμβάλλει στην εντονότερη ανάπτυξη του φαινομένου της κόπωσης. Αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης είναι η εμφάνιση μικρορηγματώσεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος και η απομείωση της διάρκειας ζωής του κατά 7% (Bastidas-Arteaga, 2018), χωρίς απαραίτητα να πλήττεται η γενική ευστάθεια και αντοχή του προσβαλλόμενου μέλους. Ωστόσο, οι ρηγματώσεις αυτές συνεπικουρούν στην απομείωση της υδατοστεγανότητας του σκυροδέματος με απόρροια την έκθεση του οπλισμού στο νερό υπό οποιαδήποτε μορφή του. Τελική έκβαση της παραπάνω κατάστασης είναι η διάβρωση του οπλισμού.

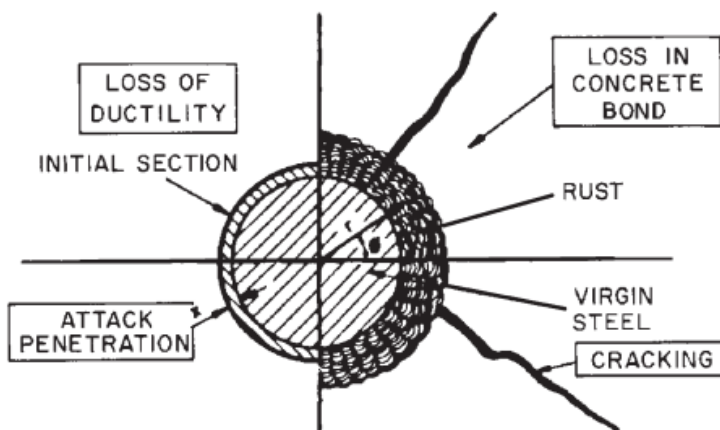
Μία άλλη αιτία που μπορεί να οδηγήσει στη ρηγματώση του σκυροδέματος και κατ' επέκταση στη διάβρωση του οπλισμού του είναι η κακή σχεδιάσή του, η ακατάλληλη κατασκευή του, η ανεπαρκής επιλογή των υλικών που το απαρτίζουν ή ένας συνδυασμός αυτών, με αποτέλεσμα την απειλή της λειτουργικότητας και της ασφάλειας του (Broomfield, 2007).

Σύμφωνα με έκθεση της National Academy of Engineering (Jacobson, 2016) αναφέρεται ότι η διάβρωση έχει παγκόσμιο κόστος περίπου 2,5 τρισεκατομμύρια δολάρια, ποσό που αποτελεί σχεδόν το 3,4% του παγκόσμιου ΑΕΠ. Αυτό το ποσό

επιμερίζεται σε 701,5 δισεκατομμύρια δολάρια για την Ευρωπαϊκή Ένωση, 451,3 δισεκατομμύρια για τις ΗΠΑ, 394,9 δισεκατομμύρια για την Κίνα και 957,7 δισεκατομμύρια για τις υπόλοιπες περιοχές της οικουμένης (impact.nace.org, 2013). Κατά την τεχνική έκθεση των (Koch, Brogers, Thompson, Virmani, & Payer, 2002) εκτιμήθηκε ότι 8,3 δισεκατομμύρια δολάρια κοστίζει συνολικά η επισκευή, αντικατάσταση και συντήρηση των γεφυρών του εθνικού οδικού δικτύου των ΗΠΑ, που έχουν υποστεί διάβρωση. Το υπουργείο μεταφορών του Ηνωμένου Βασιλείου υπολογίζει ότι το κόστος διάβρωσης, εξ αλάτων, γεφυρών που ανήκουν σε εθνικές οδούς και αυτοκινητόδρομους αγγίζει τα 616,5 εκατομμύρια λίρες (Broomfield, 2007). Ανάλογα είναι και τα κόστη σε ειδικές περιπτώσεις ανά την υφήλιο. Αυτά τα ποσά καθιστούν πρόδηλη τη σημασία του φαινομένου αυτού σε παγκόσμια κλίμακα και πρέπει επομένως να προσδιοριστεί ο τρόπος αντιμετώπισής του.

Η διάβρωση του χάλυβα είναι ένα σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο (Andrade, 2007), μία αντίδραση που περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα αντιδρόν στο άλλο. Κατά τη διάβρωση το μεταλλικό υλικό υπό την επίδραση του περιβάλλοντος χάνει ηλεκτρόνια, τα οποία δεσμεύονται από το οξυγόνο του περιβάλλοντος. Μέσα από χημικές αντιδράσεις παράγονται ιόντα σιδήρου και υδροξυλίου τα οποία μεταξύ τους σχηματίζουν διάφορες μορφές σκουριάς. Τα προϊόντα παραγωγής έχουν όγκο πολλαπλάσιο από αυτόν του χάλυβα, ενώ περαιτέρω ενυδάτωση αυτών προξενεί πρόσθετη διόγκωσή τους. Το σκυρόδεμα που περικλείει τον οπλισμό, παρέχει προστασία έναντι διάβρωσης, λόγω του έντονα αλκαλικού χαρακτήρα που διαθέτει. Αυτή η προστασία, όμως, μπορεί να καταστραφεί από δύο μηχανισμούς, την ενανθράκωση και την παρουσία χλωριούχων ιόντων. Η ενανθράκωση συμβαίνει όταν έρχεται σε επαφή το σκυρόδεμα με το CO₂ του περιβάλλοντος. Από αυτή την αντίδραση το PH του προστατευτικού σκυροδέματος μειώνεται, με αποτέλεσμα την έναρξη της διάβρωσης του οπλισμού. Ο δεύτερος μηχανισμός, των χλωριούχων ιόντων, καταστρέφει το προστατευτικό στρώμα των οξειδίων του σιδήρου και διευκολύνει τη διάβρωση του οπλισμού κατά αυτόν τον τρόπο.

Στο σχήμα (1.1) που έπεται, φαίνονται σχηματικά οι συνέπειες της διάβρωσης στον οπλισμό του σκυροδέματος. Ως αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας επέρχεται η απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του.



Σχήμα 1.1 Συνέπειες διάβρωσης στο χάλυβα οπλισμού

Εξαιτίας της διείδυσης της διάβρωσης ακολουθεί η μείωση της διατομής του χάλυβα οπλισμού, μέρος της οποίας αντικαθίσταται από τα προϊόντα των αντιδράσεων. Μετά υφίσταται μείωση της πλαστιμότητας του χάλυβα λόγω της ευθραυστότητας της διεπιφάνειας χάλυβα οπλισμού και σκυροδέματος που προκαλείται από την οξειδωση του οπλισμού. Ταυτόχρονα γίνεται και η μείωση της συνάφειας μεταξύ ράβδων και σκυροδέματος λόγω της μειωμένης διατομής του οπλισμού και της παρεμβολής των οξειδίων του σιδήρου. Τέλος, έπεται ρηγμάτωση του σκυροδέματος εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων που δημιουργεί η ογκομετρική διόγκωση των προϊόντων της διάβρωσης. Η ρηγμάτωση αυτή εντείνεται και μπορεί να καταλήξει μέχρι και την εκτίναξη της επικάλυψης του σκυροδέματος, με απόρροια να εκτίθεται πλήρως ο οπλισμός.

Η απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα έχει ως αντίκτυπο την ελάττωση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, συνδέεται αρκετά στενά με θέματα διατμητικής φύσεως, αφού ο διατμητικός οπλισμός είναι αυτός που κείται πιο εξωτερικά από όλους τους οπλισμούς. Η διατμητική απώλεια αντοχής συνοδεύεται από ψαθυρής μορφής αστοχίες που δεν είναι προβλέψιμες και μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες με αποκορύφωμα και την απειλή της ανθρώπινης ζωής. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η αντιμετώπιση όλης αυτής της κατάστασης.

Σύμφωνα με την έκθεση των (Chajes, Rollins, Dai, & Murphy, 2019) μία αποτελεσματική μέθοδος που εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια είναι η ενίσχυση των κατασκευών με ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers ή FRP). Πρόκειται για ένα σύστημα αποτελούμενο από μία μήτρα θερμοπλαστικού πολυμερούς στην οποία ενσωματώνονται ίνες οπλισμού. Το δίκτυο ινών είναι το συστατικό που παραλαμβάνει την ένταση, ενώ η μήτρα πολυμερούς αναλαμβάνει να συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, να διατηρεί τον προσανατολισμό τους, να μεταφέρει τα φορτία στις ίνες και να τις προστατεύει εν γένει. Τα πιο διαδεδομένα υλικά ινών είναι από ύαλο (Glass), άνθρακα (Carbon) ή αραμίδιο (Aramid). Από αυτά, ο άνθρακας παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή εφελκυστική αντοχή, αντοχή έναντι δράσεων πρόκλησης κόπωσης και χαμηλή θερμική διαστολή, ενώ σαν μέσο είναι ψαθυρό, απαιτεί πολύπλοκες διεργασίες κατασκευής και κυρίως, είναι υψηλού κόστους.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν εξαιρετικό λόγο αντοχής προς βάρος και δεν επηρεάζονται από τη διάβρωση. Για αυτό ενδείκνυνται σαν μέσο αντιμετώπισης των υφισταμένων κατασκευών που έχουν υποστεί διάβρωση. Ένα άλλο πλεονέκτημα που έχουν είναι η προσαρμογή τους σε εύρη αντοχών, τροποποιώντας τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών και τεχνικών κατασκευής τους. Έτσι, μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε ανάγκη προκύπτει. Τέλος, η αντοχή τους είναι τόσο υψηλή που υπερκεράζει αυτή των μετάλλων και του χάλυβα οπλισμού.

Ανάλογα με τις γεωμετρικές ιδιομορφίες της κατασκευής υπάρχει μία πληθώρα επιλογών εγκατάστασης του συστήματος ενίσχυσης. Δύο αρκετά διαδεδομένες τεχνικές είναι αυτές του εξωτερικού μανδύα (Externally bonded sheet) και των ενσωματωμένων ράβδων (Embedded rods). Η πρώτη τεχνική άπτεται της παράθεσης του σύνθετου αυτού υλικού στην πρόσοψη ή στην παρειά μιας κατασκευής με εποξειδική ρητίνη. Αυτή δρα ως το πολυμερές μήτρα. Με αυτή την τεχνική μπορούν να μορφωθούν συστήματα FRP λωρίδων, πλακών, συνεχών φύλλων ή και ολόκληρων

περιτυλιγμάτων. Από αυτά το πιο διαδεδομένο είναι το συνεχές φύλλο, καθώς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Εμποδίζει την περαιτέρω ανάπτυξη ήδη υπαρχόντων ρωγμών και διάδοσή τους, αλλά και μελλοντικές ρωγμές, αυξάνει την αντοχή και τη στιβαρότητα των κατασκευών και κυρίως, προστατεύει από τη διάβρωση. Μπορούν να τοποθετηθούν στην εφελκυστική περιοχή του σκυροδέματος και να βελτιώσουν την καμπτική συμπεριφορά ή στο πλάι των δοκών για ανάληψη διάτμησης. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να αποκολληθούν εύκολα και για αυτό απαιτούν πρόσθετα μέσα αγκύρωσης. Η δεύτερη τεχνική, των ενσωματωμένων ράβδων, περιλαμβάνει δύο περιπτώσεις. Την τοποθέτηση ράβδων κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Near Surface Mounted ή NSM) και την πλήρη ενσωμάτωση (Deep Embedded ή DE). Στην πρώτη ανοίγονται αύλακες στις παρειές του σκυροδέματος και τοποθετούνται οι ράβδοι μαζί με την εποξειδική ρητίνη. Στη δεύτερη περίπτωση ανοίγονται οπές σε διάφορες θέσεις του σκυροδέματος και ενσωματώνονται οι ράβδοι πλήρως στο σκυροδέμα, ώστε να υπάρχει περιμετρική συνάφεια, σε αντιδιαστολή με την πρώτη που είναι στις τρεις παρειές του αύλακα.



Σχήμα 1.2 Μέθοδοι ενίσχυσης: (αριστερά) συνεχή φύλλα εξωτερικού μανδύα, (δεξιά άνω) NSM τεχνική ράβδων, (δεξιά κάτω) DE τεχνική ράβδων

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής και μεθοδολογία

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μακροσκοπική αποτίμηση της διατμητικής ικανότητας μίας πλακοδοκού σε όρους δύναμης και μετατόπισης αστοχίας στο βαθμό ελευθερίας της φόρτισης. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται μέσω αριθμητικής προσομοίωσης, με τη χρήση μακροστοιχείων, της δοκού σε όλες τις καταστάσεις της, δηλαδή στη φάση που δεν έχει υποστεί διάβρωση, στην περίπτωση που έχει διαβρωθεί ο οπλισμός της και στην τελική κατάσταση κατά την οποία της εφαρμόζονται μέσα ενίσχυσης.

Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται, πρώτα, η προσομοίωση της δοκού μέσω δύο προσεγγίσεων, της μικροπροσομοίωσης, δηλαδή μέσω της χρήσης μικροσκοπικών πεπερασμένων στοιχείων χιλιάδων βαθμών ελευθερίας στο σύνολο και μέσω μακροπροσομοίωσης, ήτοι διακριτοποίηση του φορέα με ελάχιστα στοιχεία και λίγους βαθμούς ελευθερίας. Η προσομοίωση αυτή γίνεται στην αρχική φάση της δοκού που

δεν έχει υποστεί διάβρωση και δεν έχει γίνει χρήση ενισχυτικών μέσων. Η αριθμητική αυτή ανάλυση προϋποθέτει την ύπαρξη ενός πειράματος αναφοράς, ώστε να γίνει η απαραίτητη βαθμονόμηση των μοντέλων. Γίνεται σε αυτή τη φάση, διότι αναζητείται η μελλοντική απόκριση μίας υφιστάμενης κατασκευής έναντι διάβρωσης. Η προσομοίωση ακολουθεί σε γενικές γραμμές την πορεία εξέτασης της δοκού από το πείραμα. Έτσι, η ανάλυση των δοκών λαμβάνει χώρα με τις ίδιες ακριβώς διατάξεις του πειράματος, ήτοι γεωμετρία, ιδιότητες υλικών και φύση πειράματος, όπως η εφαρμογή στατικής pushover. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις του προβλήματος συγκρίνονται, εξετάζονται ποιες παραδοχές και ποιες παράμετροι απαιτούνται και αναλύονται τα υπέρ και τα κατά καθεμιάς από αυτές. Για την εξέταση της ακρίβειας της μακροπροσομοίωσης συνεχίζεται η ανάλυση με αυτή τη μέθοδο. Διερευνάται η απόκριση της δοκού έναντι της διάβρωσης. Εξετάζεται η συμπεριφορά της πλακοδοκού σε δύο σενάρια διάβρωσης, αυτό των μεμονωμένων συνδετήρων, που υπάρχει και η πειραματική αντιστοίχιση και γίνεται μία απόπειρα πρόβλεψης της απόκρισης απέναντι στη διάβρωση του πλήρους οπλισμού, εγκαρσίου και διαμήκους. Σε κάθε σενάριο επιχειρείται η απόκριση της δοκού απέναντι σε πέντε ποσοστά διάβρωσης, σε 7%, που και εδώ υπάρχουν αποτελέσματα από το πείραμα αναφοράς, σε 15%, 20%, 25% και σε μία αρκετά ακραία περίπτωση του 35%. Κατόπιν, διερευνάται η ενίσχυση της δοκού. Εξετάζονται δύο μέθοδοι ενίσχυσης CFRP NSM και DE εσωτερικών ράβδων, θεωρώντας τις σαν ομοειδή μέθοδο και τη μέθοδο του εξωτερικού συνεχούς μανδύα. Για κάθε μέθοδο ενίσχυσης αξιοποιούνται έξι σχέσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία και πάλι γίνεται απόπειρα εξέτασης της απόκρισης της πλακοδοκού που έχει ήδη διαβρωθεί. Θεωρείται ότι έχει διαβρωθεί στο 15% και τότε εφαρμόζεται το μέσο ενίσχυσης. Τέλος, αποτιμάται και η συμπεριφορά της ενισχυμένης, πλέον, δοκού στην εξέλιξη της διάβρωσης στη φάση του 35%. Οι επιλύσεις που απαιτούνται διενεργούνται με τη χρήση δύο αρκετά διαδεδομένων λογισμικών, του Abaqus για τη μικροπροσομοίωση και του OpenSees για την προσομοίωση με μακροστοιχεία.

1.3 Ερευνητικοί στόχοι

Από την παρούσα διπλωματική στοχεύονται οι διερευνήσεις κάποιων ζητημάτων, όπως:

- Πόσο αποδοτική είναι η χρήση μακροστοιχείων σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Πόσο αξιόπιστη είναι η μακροπροσομοίωση και αν μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια την απόκριση της δοκού σε διάφορες φάσεις της.
- Πόσο επηρεάζεται η φέρουσα ικανότητα της δοκού σε ένα μεγάλο εύρος ποσοστών διάβρωσης και τι επίδραση έχει στις ιδιότητες των υλικών.
- Πόσο αποδοτική είναι μία μέθοδος ενίσχυσης και αν επαρκεί ώστε η δοκός να είναι σε θέση να φέρει τα φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε.
- Αν οι σχέσεις της υφιστάμενης βιβλιογραφίας δύνανται να εκτιμήσουν με ακρίβεια τη συνεισφορά που παρέχουν τα διαφορετικά συστήματα ενίσχυσης στην ανάληψη της τέμνουσας.

1.4 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική για να διερευνήσει τα παραπάνω ζητήματα της ενότητας (1.3) διαρθρώνεται σε 7 κεφάλαια στα οποία περιέχονται τα εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται η εισαγωγή στα θέματα που καλείται να μελετήσει η παρούσα διπλωματική. Καταδεικνύεται η σημασία της διάβρωσης, η επίδρασή της στις ιδιότητες των υλικών και στη συνολική φέρουσα ικανότητα των κατασκευών και ο τρόπος αντιμετώπισής της μέσω διαφόρων τεχνικών ενίσχυσης.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται το πείραμα αναφοράς, το οποίο θα αποτελέσει τη βάση για τη βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων στις αριθμητικές αναλύσεις που θα ακολουθήσουν. Παρουσιάζεται όλη η διαδικασία του πειράματος μέχρι τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Στο **Κεφάλαιο 3** συμβαίνει η μικροπροσομοίωση με τη χρήση του Abaqus. Περιγράφεται όλη η διαδικασία προσομοίωσης με τις παραδοχές και τις παραμέτρους που χρειάζονται. Παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτής, ενώ γίνεται μία διερεύνηση της επίδρασης ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μακροπροσομοίωση. Πάλι αναλύονται όλα τα βήματα που απαιτούνται για την προσομοίωση και παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης.

Στο **Κεφάλαιο 5** εμπεριέχεται η μεθοδολογία προσομοίωσης της διάβρωσης με τη μέθοδο της μακροπροσομοίωσης. Αναλύονται τα αποτελέσματα της διάβρωσης των δύο σεναρίων διάβρωσης του οπλισμού με τα πέντε ποσοστά στο καθένα.

Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφεται η προσομοίωση της ενίσχυσης. Περιλαμβάνει δώδεκα σχέσεις της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για την εύρεση της συνεισφοράς των μέσων ενίσχυσης στη διατμητική αντοχή και αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενίσχυσης σε δύο φάσεις διάβρωσης της δοκού.

Στο **Κεφάλαιο 7** αναγράφονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο τέλος εκτείνεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για τη μελέτη της απόκρισης της δοκού σε όλες τις φάσεις της.

2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η περιγραφή της πειραματικής διερεύνησης της διατμητικής συμπεριφοράς πλακοδοκού, η οποία έχει ενισχυθεί είτε με το σύστημα του εξωτερικού μανδύα κατασκευασμένου από οπλισμένο πολυμερές ανθρακοϊών (Carbon Fiber-Reinforced Polymer ή CFRP) είτε από το σύστημα εσωτερικών ράβδων από το ίδιο υλικό. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η απόκριση της πλακοδοκού έναντι διάβρωσης του διατμητικού της οπλισμού και εξάγονται αποτελέσματα ως προς την αποτελεσματικότητα των δύο αυτών τεχνικών ενίσχυσης. Η διαδικασία διενεργήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του πανεπιστημίου του Birmingham και περιγράφεται εναργέστατα στο paper των (Qin, Dirar, Yang, Chan, & Elshafie, 2015).

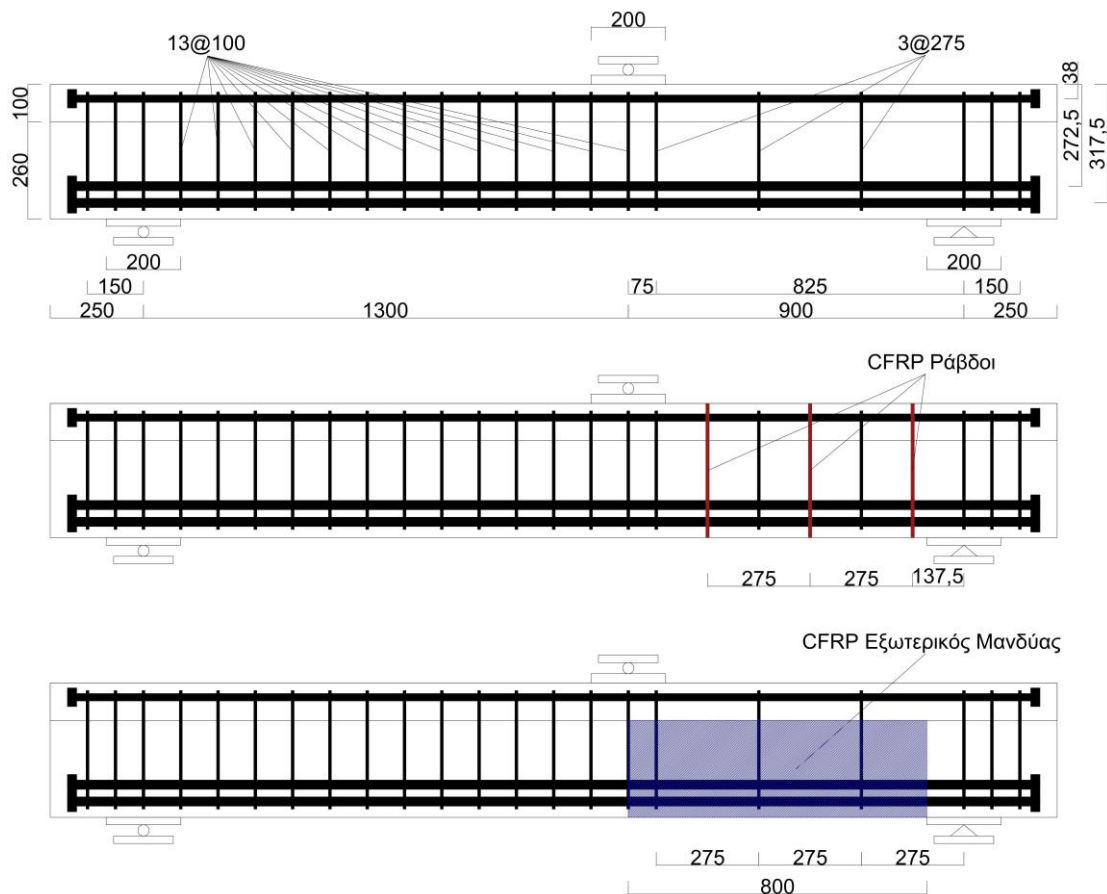
2.1 Δοκίμια

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε θεωρώντας δοκό μήκους 2,7 m και διατομής σχήματος T, ώστε να προσομοιωθεί και η αλληλεπίδραση της πλάκας, όπως θα υφίσταται σε μία κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος. Η διαμόρφωσή του έγινε θεωρώντας κάμψη τριών σημείων, ήτοι μία δοκό που εδράζεται σε δύο στηρίξεις-κύλιση και άρθρωση και φορτίζεται σε σημείο της εντός του ανοίγματός της. Η στήριξη της πλακοδοκού υλοποιείται μέσω μεταλλικών πλακών πάχους 20 mm και πλάτους, κατά τη διαμήκη διεύθυνση της δοκού, 200 mm. Η φόρτιση επιτυγχάνεται από ιδίου πλάτους μεταλλική πλάκα πάχους 25 mm. Οι πλάκες εξασφαλίζουν ομαλότερη κατανομή τάσεων στις περιοχές επιβολής φορτίων. Οι πλάκες έδρασης τοποθετούνται κεντροβαρικά σε απόσταση 250 mm από τα άκρα της δοκού, ενώ η πλάκα φόρτισης σε απόσταση 900 mm από τη μία στήριξη.

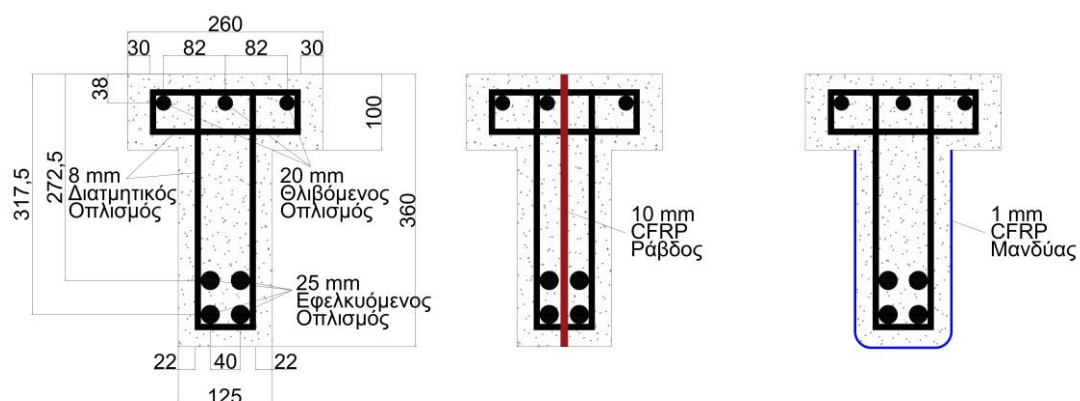
Η διατομή τύπου T έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά ως προς το πέλμα, πλάτος 260 mm και πάχος 100 mm, ενώ ως προς τον κορμό οι αντίστοιχες διαστάσεις είναι πλάτος 125 mm και ύψος 260 mm. Έχει τοποθετηθεί θλιβόμενος διαμήκης οπλισμός, εντός του πέλματος, τριών ράβδων διαμέτρου 20 mm έχοντας στατικό ύψος ως προς την άνω ακραία ίνα της διατομής 38 mm. Ο εφελκύμενος οπλισμός έχει τοποθετηθεί σε δύο στρώσεις των δύο ράβδων η καθεμία, δημιουργώντας ισοδύναμο στατικό ύψος των 295 mm. Επελέγη διάμετρος 25 mm. Άρα, προκύπτει ο λόγος του διατμητικού ανοίγματος ως προς το ισοδύναμο στατικό ύψος ως 3,05. Όλες οι διαμήκεις ράβδοι αγκυρώθηκαν με μεταλλικές πλάκες, ώστε να διασφαλιστεί ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος δε θα προκύψει αστοχία λόγω συνάφειας οπλισμού και σκυροδέματος, δηλαδή να μην υπάρξει σχετική ολίσθηση.

Η δοκός μπορεί να διακριθεί σε δύο ανοίγματα ως προς τις στηρίξεις και τη φόρτιση. Στο πρώτο άνοιγμα τίθεται συνδετήριος οπλισμός διαμέτρου 8 mm ανά απόσταση 100 mm, ενώ στο δεύτερο άνοιγμα, που είναι και το υπό εξέταση, τίθεται διατμητικός οπλισμός ίδιας διαμέτρου αλλά ανά απόσταση 275 mm. Παρατηρείται, επομένως, ότι ολόκληρος ο οπλισμός έχει διαταχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επέλθει διατμητική αστοχία, καθώς υπάρχει μεγάλη διαφορά στην ικανότητα παραλαβής τέμνουσας δύναμης και ροπής. Αυτό γίνεται διότι απαιτείται να υπάρχει ένα μεγάλο εύρος εντός του οποίου να επιτυγχάνεται η μέτρηση της βελτίωσης που παρέχει η ενίσχυση στην ολική διατμητική ικανότητα της πλακοδοκού.

Στα ενισχυμένα δοκίμια με ράβδους CFRP, τοποθετήθηκαν ράβδοι διαμέτρου 10 mm σε διάταξη ενός σκέλους ανά 275 mm. Στα δοκίμια που ενισχύθηκαν με μανδύα, ο τελευταίος ήταν μορφής U, δηλαδή αποτελείται από τρία σκέλη και εναγκαλιάζει τον κορμό της διατομής. Για την εγκατάστασή του διαμορφώθηκαν στρογγυλά λαξευμένες άκρες στον κορμό για αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στις γωνίες. Και τα δύο μέσα ενίσχυσης αναπτύσσονται στο άνοιγμα με τον αραιό διατμητικό οπλισμό. Λεπτομέρειες των διαφόρων διατάξεων και διατομών της πλακοδοκού διαφαίνονται στα σχήματα (2.1) και (2.2) παρακάτω.



Σχήμα 2.1 Διατάξεις δοκών ως προς τους οπλισμούς και τα μέσα ενίσχυσης (όλες οι διαστάσεις σε mm)



Σχήμα 2.2 Μη ενισχυμένο δοκίμιο και διατομές ενισχυμένης πλακοδοκού (όλες οι διαστάσεις σε mm)

Για τη διεξαγωγή του πειράματος διαμορφώθηκαν εννέα περιπτώσεις πλακοδοκών, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες των τριών δοκών η καθεμία. Η πρώτη κατηγορία άπτεται της πλακοδοκού που δεν έχει ενσωματώσει κάποια μέθοδο ενίσχυσης και συμβολίζεται με το γράμμα N, η δεύτερη, της περίπτωσης των ενσωματωμένων ράβδων και διακρίνεται με το γράμμα R και η τελευταία αποτελεί τη δοκό με τον εξωτερικό μανδύα που περιγράφεται από το S. Σε κάθε ομάδα, που εμπεριέχονται τρεις περιπτώσεις, περιγράφεται το πραγματικό επίπεδο διάβρωσης που έχει υποστεί ο συνδετήριος οπλισμός. Το ποσοστό αυτό εκφράζεται από τα νούμερα 00, 07 και 12 που συνοδεύουν τα γράμματα των παραπάνω συμβολισμών. Έτσι, η περίπτωση R07 αναφέρεται στην πλακοδοκό που εμπεριέχει τις εσωτερικές ράβδους ως ενισχυτικό μέσο και ο διατμητικός της οπλισμός έχει διαβρωθεί κατά 7%.

2.2 Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Ως προς τα υλικά, όλες οι δοκοί κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα με το ίδιο μείγμα σκυροδέματος αναλογίας νερού προς τσιμέντου 0,65:1 και μέγιστης διαμέτρου αδρανών 10mm. Η στοχευόμενη κατηγορία σκυροδέματος είναι η C25/30 καθώς επιδιωκόταν τα κυβικά δοκίμια να αναπτύξουν θλιπτική αντοχή 30 MPa κατά τις δοκιμές θραύσης τους. Ωστόσο, λόγω θεμάτων που παρουσιάστηκαν στον έλεγχο ποιότητας των δοκιμών, η πραγματική τιμή της αντοχής εμφανίζει διαφορές ως προς τη θεωρητική με αποτέλεσμα κάθε δοκίμιο ανά περίπτωση δοκού να έχει τη δική του τιμή θλιπτικής, εφελκυστικής και καμπτικής αντοχής. Αντίστοιχα, για τους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς πραγματοποιήθηκαν εφελκυστικές δοκιμές για την εύρεση των τιμών των ιδιοτήτων τους. Τέλος, για τις ιδιότητες των συστημάτων ενίσχυσης του μανδύα και των ράβδων λαμβάνονται οι τιμές που παρέχονται από τους αντίστοιχους κατασκευαστές. Αναλυτικότερα οι τιμές των ιδιοτήτων των παραπάνω υλικών παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες σκυροδέματος

Δοκίμιο	Μέση Θλιπτική Αντοχή Κύβου	Μέση Εφελκυστική Αντοχή Κυλίνδρου	Μέση Καμπτική Αντοχή
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
N00	26,3	2,3	4,1
N07	35,1	2,6	5,4
N12	41,8	2,2	6,1
R00	21,7	1,5	3,1
R07	37,0	2,0	5,1
R12	37,0	1,9	5,3
S00	37,0	2,4	4,2
S07	36,8	2,5	5,4
S12	42,9	2,1	6,1

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες χάλυβα

Διάμετρος Ράβδου	Τάση Διαρροής	Παραμόρφωση Διαρροής	Μέγιστη Τάση	Μέτρο Ελαστικότητας
[mm]	[MPa]	[-]	[MPa]	[GPa]
8 (μη- εξεταζόμενο άνοιγμα)	542	0,003	664	186
8 (εξεταζόμενο άνοιγμα)	573	0,003	655	183
20	576	0,003	707	179
25	537	0,003	669	180

Πίνακας 2.3 Ιδιότητες CFRP εξωτερικού μανδύα

Πάχος Μανδύα	Μέγιστη Εφελκυστική Τάση	Απόλυτη Παραμόρφωση	Μέτρο Ελαστικότητας
[mm]	[MPa]	[-]	[GPa]
1	986	0,01	95,8

Πίνακας 2.4 Ιδιότητες CFRP ράβδων

Διάμετρος Ράβδου	Μέγιστη Εφελκυστική Τάση	Απόλυτη Παραμόρφωση	Μέτρο Ελαστικότητας
[mm]	[MPa]	[-]	[GPa]
10	2172	0,0175	124

2.3 Προετοιμασία δοκιμίων

Η διάβρωση επετεύχθη απομονώνοντας το τμήμα της δοκού με τον αραιό συνδετήριο οπλισμό και περικλείοντάς το από ατσάλινες πλάκες μέσα σε μία πλαστική δεξαμενή περιεκτικότητας 3% σε χλωριούχο νάτριο. Κατόπιν, οι πλάκες συνδέθηκαν με το καθόδιο πηγής συνεχούς ρεύματος. Αντίστοιχα, οι συνδετήρες ενώθηκαν και αυτοί με τους θετικούς πόλους της πηγής. Διάφορες τιμές στην πυκνότητα του ρεύματος

χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους σύμφωνα με το νόμο του Faraday, που περιλαμβάνεται στη δουλειά των (Dong, et al., 2017). Τα επιθυμητά επίπεδα διάβρωσης προέκυψαν μετρώντας την απώλεια μάζας στον οπλισμό.

Ως προς την εγκατάσταση του μανδύα, αρχικά πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα η επιφάνεια του κορμού της διατομής. Έπειτα, απλώνεται στο ύψος του κορμού και από την εσωτερική παρειά της μεταλλικής πλάκας έδρασης ως τη μέση της πλάκας φόρτισης (σε μήκος 800mm σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα) ένα ενιαίο στρώμα εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών. Μετά, τοποθετείται ο μανδύας ανθρακονημάτων μίας στρώσης και τελικά προστίθεται και ένα τελικό στρώμα ρητίνης για την προστασία του. Το συνολικό αυτό σύστημα έχει πάχος 1mm. Για τη δημιουργία των ράβδων CFRP, κατά την έγχυση του σκυροδέματος προϋπήρχαν ακρυλικές ράβδοι στα μέσα των αποστάσεων του αραιού διατμητικού οπλισμού και ύστερα από δύο μέρες απομακρύνθηκαν. Προετοιμάζοντας πάλι τις επιφάνειες των κενών που άφησαν οι ράβδοι τοποθετήθηκαν οι ράβδοι CFRP μέσα σε υψηλού ιξώδους εποξειδικό κολλητικό μέσο.

2.4 Ενοργάνωση

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετατοπίσεων μέχρι να επέλθει η διατμητική αστοχία. Ο ρυθμός επιβολής της μετακίνησης ήταν 0,1 mm/λεπτό, εξασφαλίζοντας την στατική επιβολή του φορτίου. Συνολικά αξιοποιήθηκαν αισθητήρες φορτίου (load cells), επιμηκυνσίόμετρα και παραμορφωσίόμετρα σε χαρακτηριστικές θέσεις ώστε να καταμετρηθούν η τέμνουσα δύναμη στη στήριξη, η μετατόπιση του σημείου στο οποίο διενεργείται η φόρτιση και οι παραμορφώσεις των οπλισμών και των μέσων ενίσχυσης κατά τη διάρκεια του πειράματος μέχρι και την αστοχία.

2.5 Αποτελέσματα

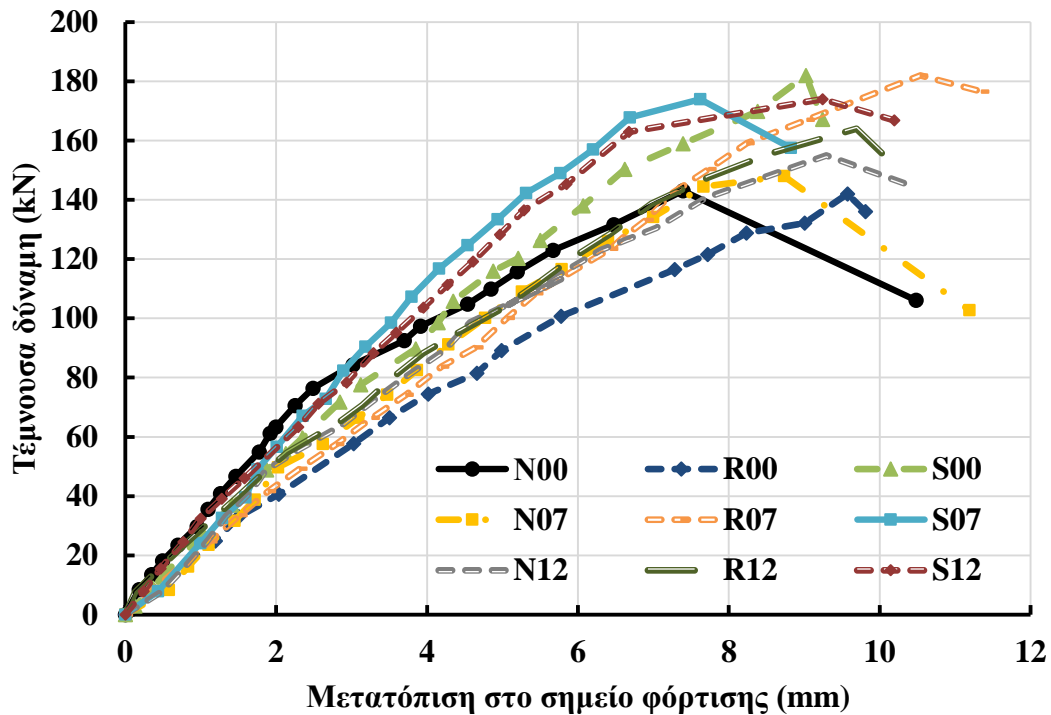
Κατά την εκτέλεση του πειράματος καταγράφηκε η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που μπορούσε να παραλάβει κάθε πλακοδοκός. Ωστόσο, επειδή η αντοχή σκυροδέματος διαφέρει ανά περίπτωση, θα ήταν άστοχο να συγκριθούν απευθείας οι δυνάμεις μεταξύ τους. Αντί αυτού, υπολογίζεται η κανονικοποιημένη διατμητική τάση στη φάση αστοχίας σε κάθε κατηγορία δοκού και αυτή διαιρείται από τη ρίζα της θλιπτικής αντοχής του κυβικού δοκιμίου ως $V_{max}/(b_w d \sqrt{f_{cu}})$. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι διατμητικές ικανότητες των δοκών είναι πλέον συγκρίσιμες μεταξύ τους. Ακόμη, αυτές οι ποσότητες ανάγονται στην κατηγορία της N00 δοκού (δηλαδή όλες οι υπόλοιπες κανονικοποιημένες τάσεις διαιρούνται με αυτή της N00 περίπτωσης). Έτσι, προκύπτουν οι ποσοστιαίες μεταβολές της διατμητικής ικανότητας της κάθε δοκού που επιφέρει η διάβρωση και το εκάστοτε σύστημα ενίσχυσης σε κάθε περίπτωση. Τέλος, έχει αποτυπωθεί και η μετατόπιση του σημείου φόρτισης της δοκού στην αστοχία. Τα αποτελέσματα του πειράματος εμπεριέχονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.5 Αποτελέσματα πειράματος

Δοκίμιο	Μέση Θλιπτική Αντοχή Κυβικού Δοκιμίου	Τέμνουσα Δύναμη Αστοχίας	Κανονικοποιημένη Διατμητική Τάση Αστοχίας	Κανονικοποιημένη Ανηγγμένη Διατμητική Τάση Αστοχίας	Μετατόπιση Σημείου Φόρτισης
[-]	[MPa]	[kN]	[-]	[-]	[mm]
N00	26,3	143	0,76	1,00	7,39
N07	35,1	148	0,68	0,89	8,73
N12	41,8	155	0,65	0,86	9,29
R00	21,7	142	0,83	1,09	9,57
R07	37,0	182	0,81	1,07	10,54
R12	37,0	164	0,73	0,96	9,69
S00	37,0	182	0,81	1,07	9,02
S07	36,8	174	0,78	1,03	7,62
S12	42,9	174	0,72	0,95	9,24

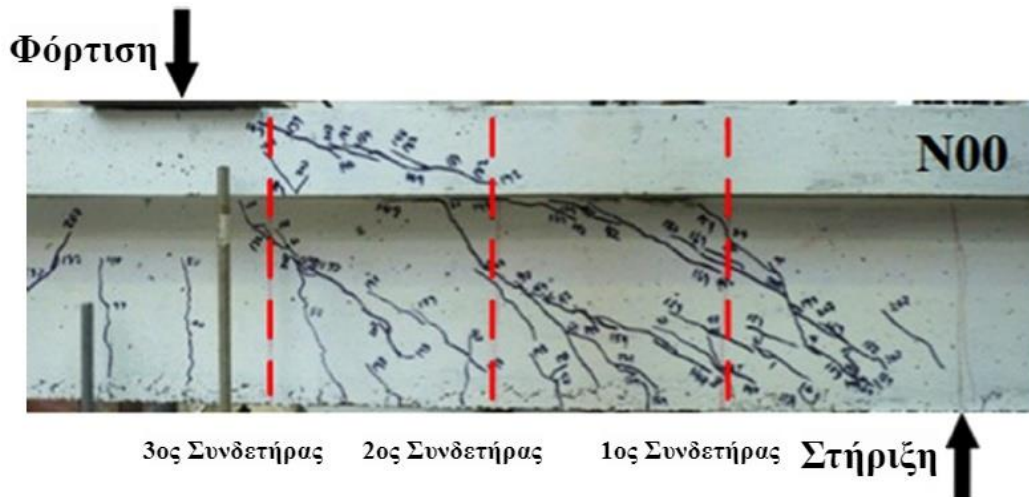
Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορεί να διακριθεί εύκολα ότι η διάβρωση των επιπέδων 7% και 12% οδήγησε σε απώλεια αντοχής της δοκού κατά 11% και 14%, αντίστοιχα, στη Ν περίπτωση. Τα συστήματα ενίσχυσης αύξησαν την αντοχή των δοκών, τόσο στην περίπτωση του αδιάβρωτου οπλισμού, όσο και στις δύο κατηγορίες διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι R00 και S00 ανέπτυξαν μεγαλύτερη αντοχή κατά 9% και 7% σε σχέση με τη N00, ενώ οι R07 και S07 κατά 18% και 14% από τη N07 και οι R12 και S12 κατά 10% και 9% από τη N12. Άμεσα προκύπτει ότι οι ενισχύσεις ήταν αποτελεσματικές ως προς τη διάβρωση του 7%, καθώς η αντοχή των πλακοδοκών R07 και S07 σημείωσε αύξηση κατά 7% και 3%, αντίστοιχα, σχετικά με τη μη ενισχυμένη περίπτωση N00, ενώ κατά τη διάβρωση του 12% οι περιπτώσεις των R12 και S12 δεν κατόρθωσαν να καλύψουν την απώλεια αντοχής που προξενεί η διάβρωση, αφού παρουσιάστηκε πτώση 4% και 5% της διατμητικής ικανότητας ως προς τη N00.

Παράλληλα, μορφώθηκαν και οι καμπύλες διατμητικής δύναμης-μετατόπιση σε κάθε περίπτωση. Κοινό γνώρισμα όλων των δοκών είναι η παρουσίαση μίας αρχικής οιονεί γραμμικής κλίσης μέχρι την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής. Έπειτα, εμφανίζεται έντονος πτωτικός κλάδος που υποδηλώνει την ύπαρξη ψαθυρής συμπεριφοράς, ίδιον της διατμητικής αστοχίας. Όπως προαναφέρθηκε, επειδή κάθε δοκιμή έχει τη δική της θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, δε θα συγκριθούν οι καμπύλες μεταξύ τους, παρά μόνο θα παρατεθούν παρακάτω. Μόνο στην περίπτωση της διάβρωσης κατά 7%, όπου οι αντοχές κυμαίνονται από 35,1 MPa έως 37 MPa, δύναται να γίνει μία σύγκριση, όπου εκεί οι κατηγορίες N07 και R07 έχουν ομοιοειδή συμπεριφορά μέχρι την αστοχία, ενώ η S07 παρουσιάζει πιο στιβαρή απόκριση καθώς, κατά (Mofidi & Chaallal, Shear Strengthening of RC Beams with Externally Bonded FRP Composites: Effect of Strip-Width-to-Strip-Spacing Ratio, 2011) το συνεχές φύλλο CFRP στο μανδύα παραλαμβάνει φορτίο και στην κάθετη διεύθυνση ως προς τον προσανατολισμό των τινών.



Σχήμα 2.3 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για όλες τις κατηγορίες πλακοδοκών

Η αστοχία της πλακοδοκού σε κάθε περίπτωση επήλθε εξαιτίας του σχηματισμού και διάδοσης κεκλιμένων ρωγμών, που είναι αποτέλεσμα της διατμητικής αστοχίας. Πιο ειδικά, αυτές οι ρωγμές διατρέχουν το άνοιγμα της δοκού με τον αραιό εγκάρσιο οπλισμό από τη στήριξη μέχρι το σημείο φόρτισης, στην περίπτωση των δοκών χωρίς ενίσχυση και σε αυτών με τις ενισχυτικές ράβδους, ενώ η αστοχία στις δοκούς με τον εξωτερικό μανδύα προέκυψε λόγω ρωγμών που διείσδυσαν στο πέλμα και διαδόθηκαν στο σημείο φόρτισης. Αυτή η διάδοση συνοδεύτηκε από πρόωρη αποκόλληση του μανδύα κοντά στη στήριξη που ενδεχομένως να αποφευγόταν από την εφαρμογή καταλλήλων συστημάτων αγκύρωσης. Στις περιπτώσεις N και R οι ρηγματώσεις είχαν τη μορφή έντονης κλίσης στον κορμό που τρεπόταν σε πιο ήπια στο πέλμα. Στην κατηγορία N00 οι ρωγμές είχαν κλίση 32° στον κορμό και 20° στο πέλμα. Ωστόσο, στην ομάδα R των δοκών οι ρωγμές ήταν πιο κατανεμημένες και στενότερες ως προς αυτές των περιπτώσεων N, γεγονός που δικαιολογείται από την ύπαρξη του πρόσθετου οπλισμού των CFRP ράβδων.



Σχήμα 2.4 Μορφή αστοχίας πλακοδοκού N00

Τα παραμορφωσιόμετρα υπέδειξαν ότι οι συνδετήρες στη Ν περίπτωση εκδήλωσαν διττή απόκριση στο πείραμα. Αρχικά, ήταν ανενεργοί και δε μετείχαν στην παραλαβή της τέμνουσας μέχρι την τιμή των 50-75 kN, ενώ στη συνέχεια άρχισαν να παραμορφώνονται καθώς εμφανίζονταν ρωγμές ολοένα με την αύξηση του φορτίου μέχρι την αστοχία. Όμοια συμπεριφορά εκδήλωσαν και οι περιπτώσεις R και S, με τη διαφορά ότι οι ράβδοι, που δε σημείωσαν ίχνη αποκόλλησης, ανέπτυξαν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το μανδύα που αστόχησε σχετικά νωρίς.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία, όπως η γεωμετρία, η διάταξη, τα υλικά και τα αποτελέσματα μπορούν να αποτελέσουν τα σημεία αναφοράς για τις αριθμητικές προσομοιώσεις που ακολουθούν, ώστε να γίνει η κατάλληλη βαθμονόμησή τους.

3 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Πολλά φαινόμενα στη φύση, όπως η ανάλυση φορέων στη στατική, απαιτούν τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου και την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος. Η διατύπωση του φαινομένου στηρίζεται στη μόρφωση εξισώσεων, που διέπουν τη λειτουργία του, υιοθετώντας παραδοχές. Η αριθμητική ανάλυση μετέρχεται αριθμητικές μεθόδους και, πλέον με την αρωγή υπολογιστικών συστημάτων, επιδιώκεται η λύση του μαθηματικού προβλήματος. Ο προσδιορισμός μίας ακριβούς λύσης πολλές φορές καθίσταται υπολογιστικά δυσχερές και χρονοβόρα ή και αδύνατη. Έτσι, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα πιο αποδοτικά, δύναται να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης. Μία τέτοια μέθοδος είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την οποία ένα γεωμετρικά σύνθετο πεδίο του προβλήματος διαιρείται σε ένα σύνολο απλών υποπεδίων. Πιο συγκεκριμένα, μέλη και σύνδεσμοι μιας κατασκευής διακριτοποιούνται σε ένα σύνολο πεπερασμένων στοιχείων τα οποία καταλήγουν να συνθέτουν ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, τόσες όσες και οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος. Αυτό επιλύεται και προσδιορίζεται το τελικό διάνυσμα της λύσης που ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

Πρόκειται για μία μέθοδο που έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα προβλημάτων μηχανικής και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Έχει επαληθευτεί σε απλά προβλήματα των οποίων είναι γνωστή η ακριβής-θεωρητική λύση, ενώ χρησιμοποιείται και σε άλλα πιο σύνθετα ή άγνωστα στα οποία παράγει λύση που είναι συμβατή και με πειραματικά αποτελέσματα. Έχει επίσης τη δυνατότητα να εκτελεί γραμμικές ή μη γραμμικές αναλύσεις σε προβλήματα ανάλογα με το αν ενδιαφέρει μία εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής ή απαιτείται η εύρεση της πραγματικής της απόκρισης. Δηλαδή, είναι μία πρόσφορη μέθοδος αν αναζητείται η συμπεριφορά μιας κατασκευής μέχρι και τη στιγμή της κατάρρευσής της, η εύρεση μηχανισμών ανακατανομής έντασης ή μελέτης τοπικών φαινομένων όπως η εξέλιξη ρηγματώσεων σε ένα φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα (Παπαδρακάκης, 1998).

Το λογισμικό Abaqus αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων πολιτικού μηχανικού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς εμπεριέχει ένα διαδραστικό περιβάλλον εντός του οποίου διαμορφώνονται τα προσομοιώματα. Αυτά έπειτα υποβάλλονται για ανάλυση, εποπτεύονται, επιλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Όπως κάθε πρόγραμμα, έτσι και το Abaqus, ακολουθεί τη συνήθη διαδικασία ανάλυσης ενός προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων, ήτοι την προεπεξεργασία (preprocessing), την επίλυση (solution) και τη μετεπεξεργασία (postprocessing). Το πρώτο βήμα είναι η εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα, η επιλογή του τύπου στοιχείων και γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, η συνδεσιμότητα αυτών, η κατάλληλη επιλογή υλικών, ο προσδιορισμός των φυσικών περιορισμών όπως οι συνοριακές συνθήκες και η επιβολή της φόρτισης. Στο δεύτερο βήμα επιλύονται και προσδιορίζονται τιμές των αγνώστων κύριων μεταβλητών, όπως η εύρεση των επικόμβιων μετακινήσεων, καθώς και οι προκύπτουσες μεταβλητές όπως οι αντιδράσεις, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις.

Τέλος, στο τρίτο βήμα αξιοποιώντας πολύπλοκες ρουτίνες ταξινομούνται, εκτυπώνονται ή σχεδιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση.

Σκοπός αυτής της υποενότητας είναι η αριθμητική επίλυση του φορέα του πειράματος, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τη χρήση του λογισμικού Abaqus. Θα εξεταστεί η προσομοίωση της N00 περίπτωσης εκτελώντας μη γραμμική ανάλυση, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα αυτής και θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του φορέα για διάφορες τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων που τον προσδιορίζουν.

Οποιαδήποτε πληροφορία που θα παρατεθεί παρακάτω και σχετίζεται με το λογισμικό, εξήχθη από το εγχειρίδιο του Abaqus, δηλαδή κατά (Smith, 2009).

3.2 Προσομοίωση φορέα

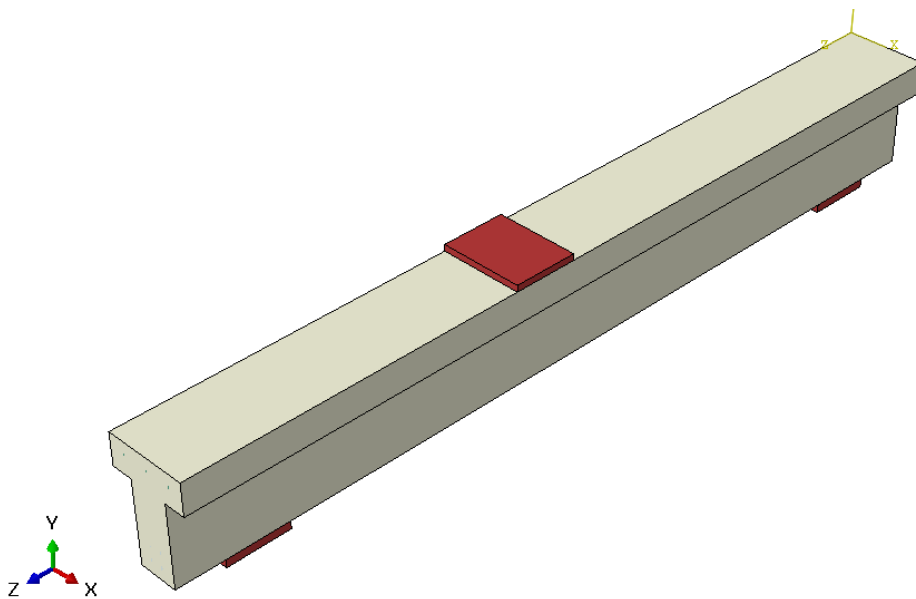
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι η μορφοποίηση του προσομοιώματος. Αρχικά, το Abaqus απαιτεί τη δημιουργία των τμημάτων (parts) που είναι τα στοιχεία που απαρτίζουν το φορέα που μελετάται. Αυτά είναι η πλακοδοκός σκυροδέματος, ξεχωριστά οι διαμήκεις οπλισμοί εφελκυσμού και θλίψης, πάλι ξεχωριστά οι διατμητικοί οπλισμοί κορμού και πέλματος, οι πλάκες έδρασης και η πλάκα φόρτισης. Δηλαδή κάθε οντότητα που έχει διαφορετικές διαστάσεις από την άλλη. Η εισαγωγή των μεταλλικών πλακών επιτρέπει την πιο ρεαλιστική προσομοίωση του πειράματος και απαιτείται η παρεμβολή ενός σκληρότερου υλικού στις περιοχές αντιδράσεων και επιβολής φορτίου για ομαλότερη διάχυση των τάσεων. Όλα αυτά τα στοιχεία δηλώνονται ως τρισδιάστατα αφού και το πρόβλημα είναι τρισδιάστατο. Επίσης, αναφέρονται ως παραμορφώσιμα, δηλαδή ότι έχουν την ικανότητα να παραμορφώνονται υπό την επίδραση κάποιου φορτίου. Ωστόσο, η πλακοδοκός και οι πλάκες έδρασης και φόρτισης αποτελούν συνεχή στερεά (solids) και για να σχηματιστούν τρισδιάστατα, πρέπει πρώτα να σχεδιαστεί στο δισδιάστατο επίπεδο η διατομή τους και έπειτα να λάβουν χωρική υπόσταση εισάγοντας τη διαμήκη διάστασή τους μέσω της επιλογής εξώθησης (extrude). Αντίστοιχα, όλοι οι οπλισμοί αναφέρονται ως καλωδιωτά τμήματα (wire) και όχι ως στερεά, καθώς αποτελούν στοιχεία με διαστάσεις διατομής αμελητέες ως προς τη διαμήκη τους διάσταση. Έτσι, σχεδιάζεται το μήκος τους και εμφανίζονται εξιδανικευμένα ως γραμμές, ακριβώς για το λόγο αυτό. Για το σχεδιασμό όλων αυτών των στοιχείων χρησιμοποιούνται οι διαστάσεις που έχουν ειπωθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Μετά την ολοκλήρωση των parts, έπεται η δημιουργία των διατομών (sections) που άπτονται σε κάθε τμήμα. Αυτές περιέχουν πληροφορίες για κάθε τμήμα και πρέπει να τεθούν σαν ιδιότητα αυτών. Στα τμήματα solids τίθενται διατομές της ίδιας κατηγορίας (solid) και ομογενούς τύπου (homogeneous) ώστε να υπάρχουν οι ίδιες ιδιότητες ενιαία σε κάθε τμήμα. Στους οπλισμούς τίθενται διατομές κατηγορίας δοκού (beam section) και συγκεκριμένα τύπου δικτυώματος (truss), καθώς αποτελούν στοιχεία που φέρουν μόνο αξονική ένταση και καμία άλλη σε διεύθυνση εκτός του κεντροβαρικού άξονά τους, ούτε μετέχουν σε καμπτική ένταση. Σε αντιδιαστολή με τα solid τμήματα που οι τρεις διαστάσεις τους έχουν οριστεί αυτομάτως από πριν, στις διατομές δικτυώματος πρέπει να οριστεί και η επιφάνεια της διατομής.

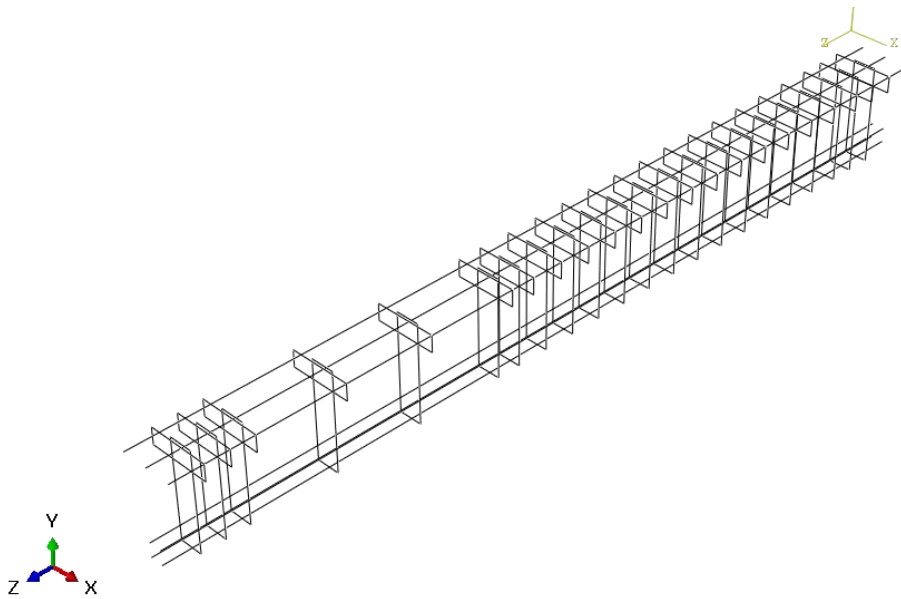
Όμως, κάθε διατομή επιβάλλει και τον ορισμό ενός υλικού. Σε επόμενη υποενότητα θα γίνει εκτενής αναφορά για τα υλικά. Ωστόσο, ορίζονται τρία υλικά, αυτά του

σκυροδέματος για την πλακοδοκό, του χάλυβα οπλισμού και του δομικού χάλυβα για τις μεταλλικές πλάκες έδρασης και φόρτισης. Ορίζονται αρχικά μόνο οι ελαστικές ιδιότητες των παραπάνω υλικών. Το γιατί συμβαίνει αυτό πάλι θα εξηγηθεί σε λίγο. Από πριν είναι γνωστό ότι χρησιμοποιείται σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30. Άρα, για να οριστεί επιλέγεται η ελαστική (elastic) ιδιότητα όπου εκεί πρέπει να συμπληρωθεί το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος poisson ν . Συμπληρώνονται 31 GPa και 0,2 αντίστοιχα. Όμοια και για τα άλλα δύο υλικά στις ελαστικές τους ιδιότητες τίθενται 200 GPa και 210GPa τα μέτρα ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού και του δομικού χάλυβα αντίστοιχα, ενώ κοινός είναι ο λόγος poisson $\nu=0,3$. Όλα αυτά τοποθετούνται στις διατομές των αντίστοιχων τμημάτων.

Επόμενο βήμα είναι η συναρμολόγηση (assembly). Εδώ λαμβάνει χώρα η μόρφωση του φυσικού μοντέλου καθώς συντίθεται από τα τμήματα που ορίστηκαν προηγουμένως. Ακολουθώντας ακριβώς τις γεωμετρικές διατάξεις από πριν και τοποθετώντας όλα τα μέλη στις αποστάσεις που πρέπει προκύπτει το μοντέλο.

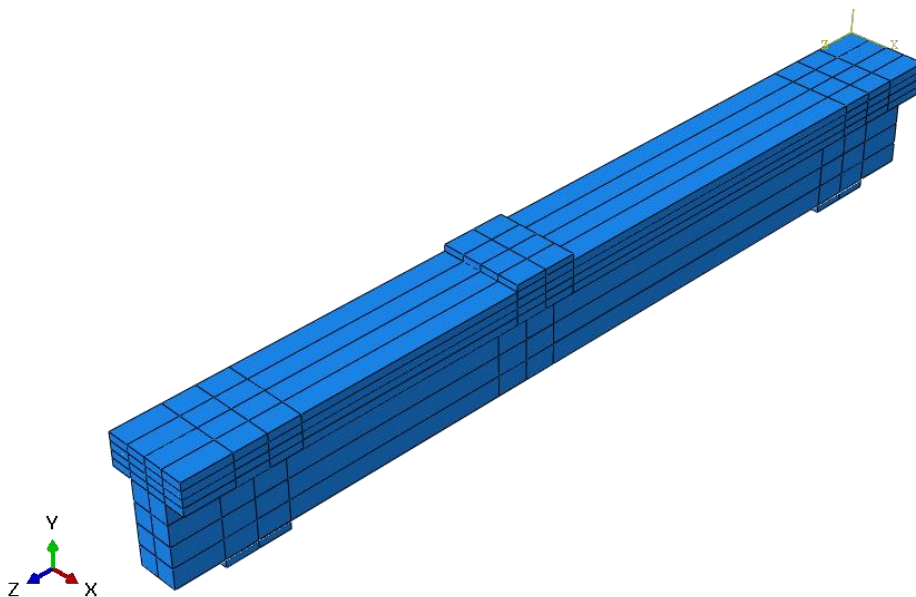


Σχήμα 3.1 Διάταξη πλακοδοκού και μεταλλικών πλακών έδρασης και φόρτισης



Σχήμα 3.2 Διάταξη διαμήκου και εγκάρσιου οπλισμού

Έπειτα σχηματίζονται κάποιες διχοτομήσεις των τμημάτων μέσω εφαρμογής επιπέδων διαχωρισμού (partition planes). Τα τμήματα των πλακών και της δοκού χωρίζονται σε περιοχές λόγω διέλευσης των επιπέδων αυτών σε χαρακτηριστικές θέσεις, όπως στα μέσα και στις παρειές των μεταλλικών πλακών εγκαρσώς της δοκού παράλληλα με τη διατομή της, στο μέσο και στις παρειές του κορμού της και σε εσωτερικές θέσεις εντός του πέλματός της κατά τη διαμήκη τώρα έννοιά της παράλληλα με τον κορμό και το πέλμα αντίστοιχα. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει τον έλεγχο στη διακριτοποίηση του φορέα, μιας και αφενός δημιουργούνται πρόσθετες συνοριακές άκρες εντός των οποίων πρέπει να συνορεύουν τα πεπερασμένα στοιχεία και αφετέρου απλοποιούνται σύνθετες περιοχές διευκολύνοντας την αυτόματη διακριτοποίηση να λάβει ένα πιο ομοιόμορφο μοτίβο που ενδεχομένως να χρειάζεται για διάφορους τύπους στοιχείων.



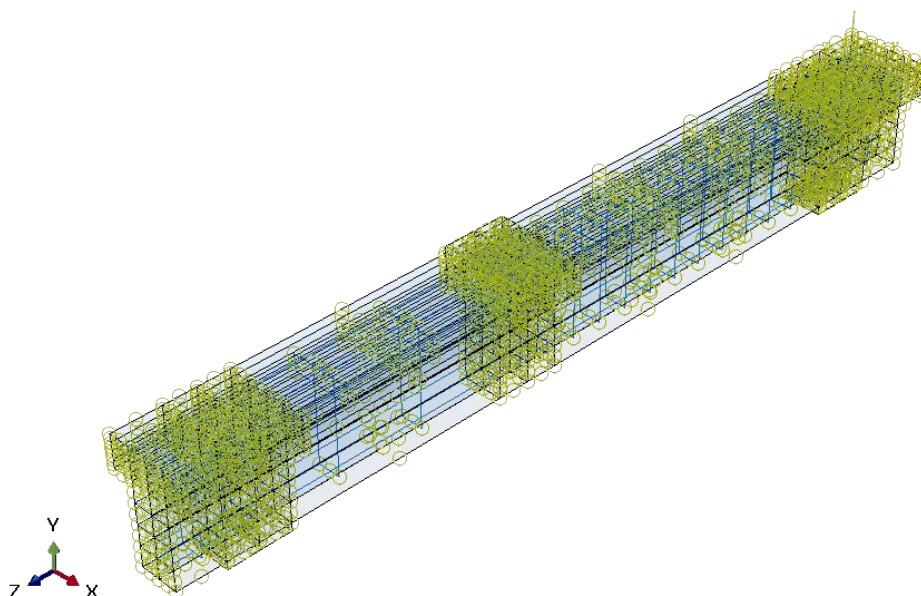
Σχήμα 3.3 Διαχωρισμός δοκού σε περιοχές

Επελέγη να πυκνωθεί η περιοχή εντός του πέλματος, επειδή εκεί υπάρχει αλλαγή της γεωμετρίας στη διατομή και θα υποχρεωθεί να εισαχθούν περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία που θα συμβάλλουν σε ομαλότερη μεταβολή των μεγεθών που υπολογίζονται. Αυτά σε συνδυασμό ότι στο πέλμα γίνεται και η εισαγωγή του φορτίου.

3.3 Συνοριακές συνθήκες και περιορισμοί

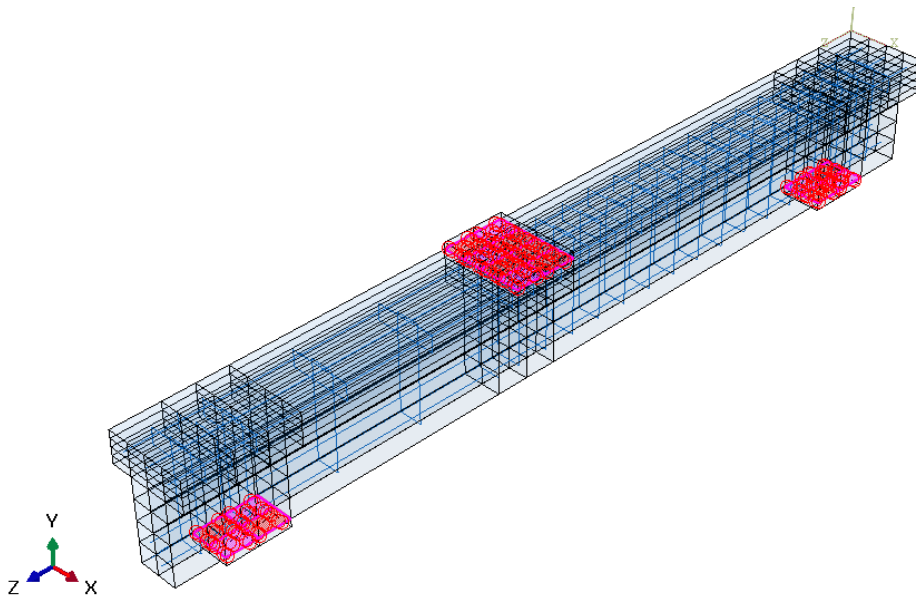
Επόμενο βήμα είναι η χρήση περιορισμών σχετικά με την αλληλεπίδραση στοιχείων μεταξύ τους. Όπως είναι δομημένο το πρόβλημα και ειδικά, όπως αποτελείται η δοκός από το τμήμα σκυροδέματος με τον οπλισμό της και τις πλάκες έδρασης και φόρτισης, πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο περιορισμοί, αυτοί του περιορισμού ενσωμάτωσης (embedded constraint) και του περιορισμού σύνδεσης (tie constraint).

Η δέσμευση της ενσωμάτωσης άπτεται του οπλισμού, γιατί ακριβώς ο οπλισμός εμπεριέχεται πλήρως εντός της πλακοδοκού. Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται σε στοιχεία (embedded elements) που ενσωματώνονται σε άλλα στοιχεία που τα φιλοξενούν-δέκτες (host elements). Η απόκριση των host στοιχείων αξιοποιείται ώστε να δεσμευτούν οι μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας των ενσωματωμένων στοιχείων. Το Abaqus αναζητά τη γεωμετρική σχέση μεταξύ των κόμβων των στοιχείων, ώστε αν κάποιος κόμβος του ενσωματωμένου στοιχείου κείται στο στοιχείο host, τότε να του δεσμεύονται οι βαθμοί ελευθερίας του βάσει των τιμών, μέσω παρεμβολής, των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας του host στοιχείου. Το πόσο μακριά μπορεί να βρίσκεται ο κόμβος του ενσωματωμένου στοιχείου από την περιοχή του στοιχείου host ρυθμίζεται από μία ανοχή, που προκαθορισμένα επιλέγεται μία απόσταση ίση με το 5% του μέσου μεγέθους των μη ενσωματωμένων στοιχείων.



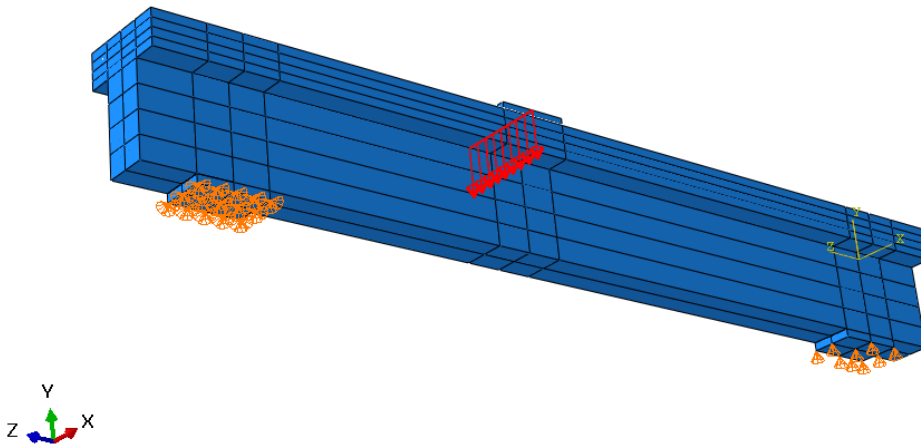
Σχήμα 3.4 Δέσμευση ενσωματωμένου οπλισμού

Ο περιορισμός σύνδεσης χρησιμοποιείται για να συνδέσει τις επιφάνειες δύο στοιχείων που αλληλοεπιδρούν. Πρόκειται για τη δέσμευση των επιφανειών των μεταλλικών πλακών που εφάπτονται στις αντίστοιχες επιφάνειες της πλακοδοκού. Οι επιφάνειες των πλακών καλούνται δευτερεύουσες (slave surfaces) καθώς επιβάλλονται οι κόμβοι, εντός αυτών, να ακολουθούν την κίνηση των αντίστοιχων επιφανειών της δοκού, που είναι οι κύριες επιφάνειες (master surfaces). Όμοια και εδώ δεσμεύονται οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας των κόμβων των δευτερευουσών επιφανειών. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να ισχύει και για διαφορετικές διακριτοποιήσεις. Υφίσταται ανοχή θέσης που να εξασφαλίζει τη δέσμευση κόμβων μέχρι μία προκαθορισμένη απόσταση των επιφανειών ώστε να ρυθμιστεί από το Abaqus αυτόματα ο περιορισμός.



Σχήμα 3.5 Δέσμευση επιφανειών δοκού και μεταλλικών πλακών

Οι συνοριακές συνθήκες της πλακοδοκού είναι όπως αυτές του πειράματος, ήτοι μία κύλιση και μία άρθρωση. Στο Abaqus προσομοιώνονται θέτοντας τις στηρίξεις σε ολόκληρη την επιφάνεια των πλακών έδρασης δεσμεύοντας τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Η φόρτιση θα αναλυθεί παρακάτω, ωστόσο η μορφή της τίθεται ως επιβαλλόμενη μετακίνηση γραμμική κατά βάθος στο πέλαμα της δοκού στη μέση της πλάκας φόρτισης.



Σχήμα 3.6 Συνοριακές συνθήκες πλακοδοκού και φόρτιση

3.4 Τύπος στοιχείου και διακριτοποίηση φορέα

Επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση του φορέα με την έννοια να προσδιοριστεί ο κατάλληλος τύπος στοιχείου και το απαραίτητο πλήθος αυτών. Το Abaqus εμπεριέχει στη βιβλιοθήκη του μία πληθώρα στοιχείων ανάλογα με την οικογένεια στην οποία ανήκουν, τους βαθμούς ελευθερίας τους και τους κόμβους τους, το σχηματισμό τους και την τάξη ολοκλήρωσης.

Αρχικά, ως προς την οικογένεια στοιχείων, λόγω της φύσης του προβλήματος που μελετάται, επιλέγονται τα συνεχή στοιχεία (continuum elements-C) για την προσομοίωση της δοκού από σκυρόδεμα με ομογενείς ιδιότητες και των μεταλλικών πλακών, καθώς πρόκειται για τυπική προσομοίωση τάσεων και μετατοπίσεων. Για τον οπλισμό επιλέγονται τα στοιχεία δικτύωματος (truss elements-T), επειδή οι ράβδοι φέρουν μόνο αξονική ένταση και θα βοηθήσουν στη μείωση του χρόνου υπολογισμού. Όλα τα στοιχεία χαρακτηρίζονται ως 3D, καθώς το πρόβλημα είναι τρισδιάστατο. Οι βαθμοί ελευθερίας των παραπάνω στοιχείων είναι αμιγώς μεταφορικοί χωρίς στροφές. Από τους κόμβους καθορίζεται η τάξη του πολυωνύμου παρεμβολής βάσει του οποίου υπολογίζονται ποσότητες εντός του στοιχείου. Ως προς το σχηματισμό νοείται το μαθηματικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων. Στην πλειοψηφία αφήνεται ο προκαθορισμένος σχηματισμός, διότι αλλαγές χρειάζονται σε ειδικής φύσεως θέματα που δεν αφορούν το παρόν πρόβλημα, παρά μόνο μία συγκεκριμένη περίπτωση που θα αναλυθεί παρακάτω. Τέλος, ως προς την ολοκλήρωση υπάρχει η δυνατότητα επιλογής τάξης ολοκλήρωσης, δηλαδή επιλογής πλήθους σημείων που χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση διαφόρων ποσοτήτων στον όγκο του στοιχείου.

Με βάση όλα τα παραπάνω, θα εξεταστούν τα στοιχεία C3D20, C3D20R, C3D8, C3D8R και C3D8S για τη δοκό και τις μεταλλικές πλάκες, ενώ τα στοιχεία T3D3 και

T3D2 για τους οπλισμούς. Λόγω γεωμετρίας της δοκού τα συνεχή στοιχεία είναι εξαεδρικά.

Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι ισοπαραμετρικά. Η ισοπαραμετρική θεώρηση υφίσταται για την προσομοίωση φορέων οποιουδήποτε σχήματος και καμπύλων συνόρων. Βασίζεται στη χρήση ενός δευτέρου συστήματος συντεταγμένων που ορίζεται στο Καρτεσιανό μέσω μίας απεικόνισης. Τόσο οι συνιστώσες μετατόπισης όσο και οι καρτεσιανές συντεταγμένες αποτυπώνονται από τις αντίστοιχες επικόμβιες ποσότητες μέσω των ίδιων συναρτήσεων σχήματος. Ισχύουν δηλαδή οι εξισώσεις:

$$x = \sum_{i=1}^{n_e} N_i x_i \quad y = \sum_{i=1}^{n_e} N_i y_i \quad z = \sum_{i=1}^{n_e} N_i z_i \quad (3.1)$$

$$u = \sum_{i=1}^{n_e} N_i u_i \quad v = \sum_{i=1}^{n_e} N_i v_i \quad w = \sum_{i=1}^{n_e} N_i w_i \quad (3.2)$$

Όπου n_e το πλήθος κόμβων του στοιχείου, x, y, z οι καρτεσιανές συντεταγμένες και u, v, w οι συνιστώσες μετατόπισης. N_i οι συναρτήσεις σχήματος μέσω των οποίων γίνεται παρεμβολή των μεγεθών σε εσωτερικό σημείο του στοιχείου. Οι τρεις διευθύνσεις αφορούν τα συνεχή στοιχεία, ενώ τα στοιχεία δικτυώματος μορφώνονται από τη μία διεύθυνση, την αξονική.

Το στοιχείο C3D20 είναι τρισδιάστατο συνεχές. Το 20 δηλώνει τον αριθμό κόμβων. Πρόκειται για ένα στοιχείο τύπου serendipity, καθώς οι κόμβοι βρίσκονται στις γωνίες και στα μέσα των ακμών και δεν εμπεριέχει κάποιον κόμβο στο εσωτερικό του. Είναι στοιχείο δευτέρας τάξεως, καθώς, λόγω πλήθους κόμβων, τα πολυώνυμα παρεμβολής είναι και αυτά δευτέρας τάξεως μη γραμμικά. Οι συναρτήσεις σχήματος αυτού του στοιχείου είναι οι εξής, βάσει της παραπάνω εξίσωσης (3.2) με αντιστοιχία συντεταγμένων g, h, r με τις x, y, z :

$$\begin{aligned} u = & -\frac{1}{8}(1-g)(1-h)(1-r)(2+g+h+r)u_1 - \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1-r)(2-g+h+r)u_2 \\ & - \frac{1}{8}(1+g)(1+h)(1-r)(2-g-h+r)u_3 - \frac{1}{8}(1-g)(1+h)(1-r)(2+g-h+r)u_4 \\ & - \frac{1}{8}(1-g)(1-h)(1+r)(2+g+h-r)u_5 - \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1+r)(2-g+h-r)u_6 \\ & - \frac{1}{8}(1+g)(1+h)(1+r)(2-g-h-r)u_7 - \frac{1}{8}(1-g)(1+h)(1+r)(2+g-h-r)u_8 \\ & + \frac{1}{4}(1-g)(1+g)(1-h)(1-r)u_9 + \frac{1}{4}(1-h)(1+h)(1+g)(1-r)u_{10} \\ & + \frac{1}{4}(1-g)(1+g)(1+h)(1-r)u_{11} + \frac{1}{4}(1-h)(1+h)(1-g)(1-r)u_{12} \\ & + \frac{1}{4}(1-g)(1+g)(1-h)(1+r)u_{13} + \frac{1}{4}(1-h)(1+h)(1+g)(1+r)u_{14} \\ & + \frac{1}{4}(1-g)(1+g)(1+h)(1+r)u_{15} + \frac{1}{4}(1-h)(1+h)(1-g)(1+r)u_{16} \\ & + \frac{1}{4}(1-r)(1+r)(1-g)(1-h)u_{17} + \frac{1}{4}(1-r)(1+r)(1+g)(1-h)u_{18} \\ & + \frac{1}{4}(1-r)(1+r)(1+g)(1+h)u_{19} + \frac{1}{4}(1-r)(1+r)(1-g)(1+h)u_{20} = \\ & N_1^* + N_2^* + N_3^* + N_4^* + N_5^* + N_6^* + N_7^* + N_8^* + N_9^* + N_{10}^* + \\ & N_{11}^* + N_{12}^* + N_{13}^* + N_{14}^* + N_{15}^* + N_{16}^* + N_{17}^* + N_{18}^* + N_{19}^* + N_{20}^* \end{aligned} \quad (3.3)$$

Αντίστοιχα, το στοιχείο C3D8 είναι 8-κομβικό στοιχείο με τους κόμβους να κείνται μόνο στις γωνίες του στοιχείου. Πρόκειται για γραμμικό στοιχείο, αφού οι συναρτήσεις σχήματος είναι πολυώνυμα πρώτου βαθμού και είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
u &= \frac{1}{8}(1-g)(1-h)(1-r)u_1 + \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1-r)u_2 \\
&+ \frac{1}{8}(1+g)(1+h)(1-r)u_3 + \frac{1}{8}(1-g)(1+h)(1-r)u_4 \\
&+ \frac{1}{8}(1-g)(1-h)(1+r)u_5 + \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1+r)u_6 \\
&+ \frac{1}{8}(1+g)(1+h)(1+r)u_7 + \frac{1}{8}(1-g)(1+h)(1+r)u_8 &= \\
&N_1^* + N_2^* + N_3^* + N_4^* + N_5^* + N_6^* + N_7^* + N_8^* &(3.4)
\end{aligned}$$

Όμοια τα στοιχεία δικτυώματος T3D3 και T3D2 είναι στοιχεία σχήματος γραμμής, με δύο κόμβους στα άκρα και έναν στη μέση το πρώτο και δύο κόμβους στα άκρα το δεύτερο. Έτσι, το τρικομβικό στοιχείο έχει δευτέρου βαθμού πολυώνυμο στις συναρτήσεις παρεμβολής του, ενώ το γραμμικό δικομβικό στοιχείο έχει πρώτου βαθμού. Αυτές είναι για το T3D3 και το T3D2 αντίστοιχα:

$$u = \frac{1}{2}g(g-1)u_1 + (1-g^2)u_2 + \frac{1}{2}g(g+1)u_3 \quad (3.5)$$

$$u = \frac{1}{2}(1-g)u_1 + \frac{1}{2}(1+g)u_2 \quad (3.6)$$

Από τον τύπο του στοιχείου μορφώνεται και το μητρώο στιβαρότητας αυτού. Στην ισοπαραμετρική θεώρηση εφαρμόζοντας την αρχή δυνατών έργων προκύπτει το μητρώο στιβαρότητας των στοιχείων ως (Παπαδρακάκης, 2001):

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B(g, h, r)]^T [E] [B(g, h, r)] \det[J] \, dg dh dr \quad (3.7)$$

Όπου [B] το μητρώο παραμόρφωσης που συσχετίζει τις ανηγμένες παραμορφώσεις με τις επικόμβιες μετατοπίσεις, [E] το μητρώο ελαστικότητας που περιέχει όρους με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο poisson των υλικών και [J] το ιακωβιανό μητρώο για την απεικόνιση στο καρτεσιανό σύστημα. Για σταθερή διατομή του οπλισμού η παραπάνω σχέση ανάγεται σε μονό ολοκλήρωμα που αφορά την αξονική διεύθυνση.

Η σχέση (3.7) είναι υπολογιστικά δυσχερής ή και αδύνατη να επιλυθεί, ειδικά για στοιχεία ανώτερου βαθμού. Έτσι, αντί της αναλυτικής απευθείας μητρικής ολοκλήρωσης, μπορεί να αξιοποιηθεί η αριθμητική ολοκλήρωση. Με την αριθμητική ολοκλήρωση υπολογίζεται μία συνάρτηση f σε δειγματοληπτικά σημεία σε μη ισαπέχουσες θέσεις εντός του πεπερασμένου στοιχείου. Έτσι, με βάση το πλήθος των σημείων που επιλέγονται αλλά και ο προσδιορισμός της θέσης αυτών, δύναται να βελτιωθεί η ακρίβεια υπολογισμού. Θεωρώντας ως f την ολοκληρωτέα παράσταση της σχέσης (3.7), το μητρώο υπολογίζεται με την κατά Gauss ολοκλήρωση που αξιοποιεί βέλτιστες θέσεις σημείων και συντελεστών βάρους, ως:

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(g, h, r) \, dg dh dr = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \alpha_i \alpha_j \alpha_k f(g_k h_j r_i) \quad (3.8)$$

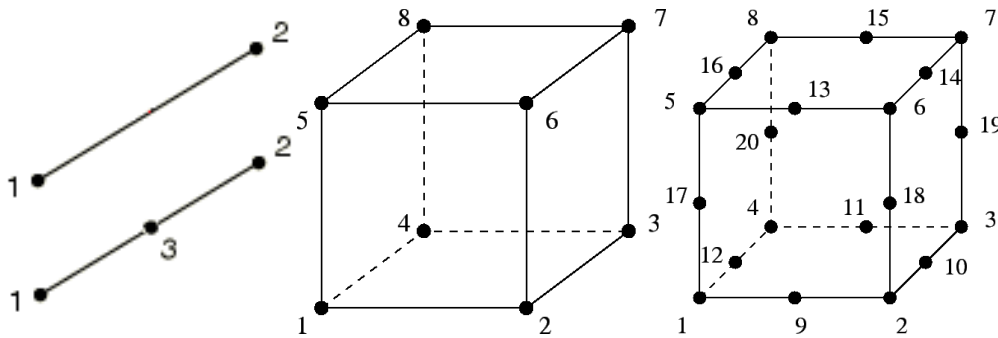
Όπου n η τάξη ολοκλήρωσης και $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$ οι συντελεστές βάρους.

Έτσι, στα στοιχεία C3D20R και C3D8R, το R συμβολίζει τη μειωμένη (R-reduced) τάξη ολοκλήρωσης. Αντίστοιχα, τα C3D20 και C3D8 που δε φέρουν σύμβολο στο τέλος, εννοείται ότι πρόκειται για στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης ή ουσιαστικά μίας τάξης ολοκλήρωσης παραπάνω από τα αντίστοιχα μειωμένης. Πιο συγκεκριμένα, το οχτακομβικό στοιχείο μειωμένης ολοκλήρωσης μορφώνεται για τάξη ολοκλήρωσης 1, δηλαδή έχει ένα σημείο Gauss, ενώ πλήρους ολοκλήρωσης (τάξης 2) περιέχει οχτώ

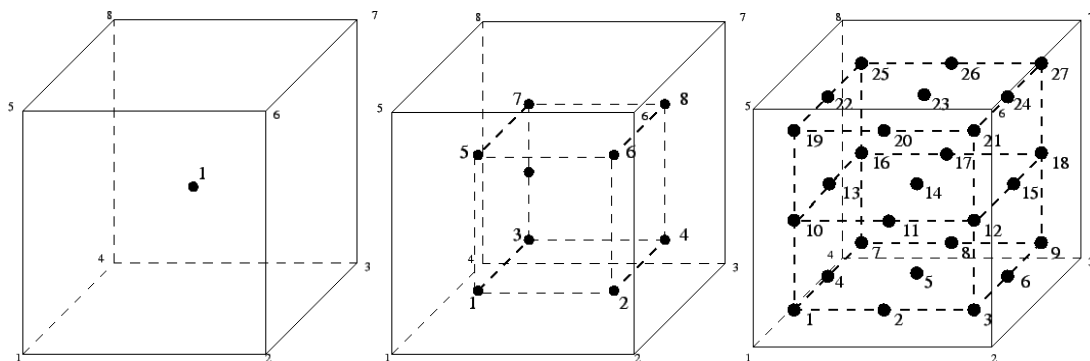
σημεία Gauss. Αντίστοιχα, το στοιχείο είκοσι κόμβων στη μειωμένη ολοκλήρωση ανήκει στην τάξη 2 και περιέχει οχτώ σημεία Gauss, ενώ το πλήρους ολοκλήρωσης που εντάσσεται στην τάξη 3 περιέχει 27 σημεία Gauss.

Πίνακας 3.1 Θέσεις σημείων Gauss και συντελεστές βάρους ανάλογα την τάξη ολοκλήρωσης

Τάξη ολοκλήρωσης n	Θέσεις g_i	Συντελεστές βάρους a_i
1	0,0	2,0
2	$\pm 0,57735$	1,0
3	$\pm 0,77459$	0,55555
	0,0	0,88888



Σχήμα 3.7 Από αριστερά προς δεξιά, τα στοιχεία δικτύωματος 2 και 3 κόμβων, το εξαεδρικό στοιχείο 8 κόμβων και το εξαεδρικό στοιχείο 20 κόμβων

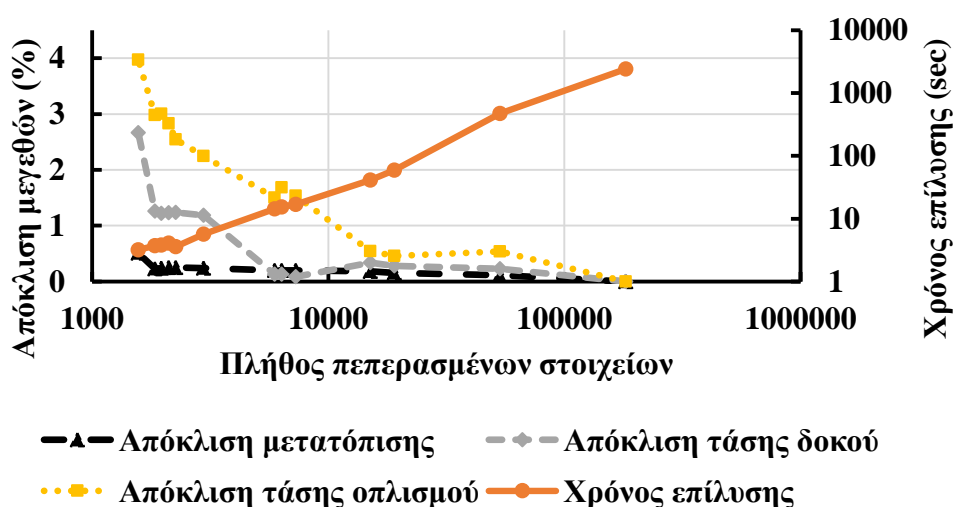


Σχήμα 3.8 Από αριστερά προς δεξιά, σημεία Gauss των εξαεδρικών στοιχείων για πρώτη, δεύτερη και τρίτη τάξη ολοκλήρωσης

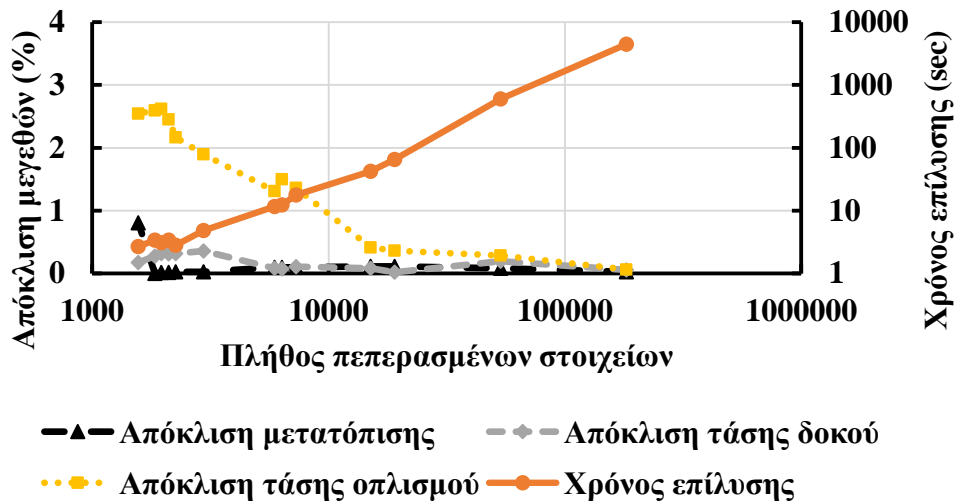
Τέλος, το στοιχείο C3D8S περιέχει την τεχνολογία καλύτερης οπτικοποίησης τάσεων στην επιφάνειά του. Έχει τις ίδιες συναρτήσεις σχήματος με το C3D8, αλλά αποτελείται από 27 σημεία ολοκλήρωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για να προσδιοριστεί η κατάλληλη διακριτοποίηση με το κατάλληλο στοιχείο διενεργείται μία ελαστική ανάλυση. Για αυτό ορίστηκαν αρχικά τα υλικά με μόνο τις ελαστικές ιδιότητές τους. Επιλέγεται να πραγματοποιηθεί αρχικά η ελαστική ανάλυση για να διαφανεί ότι δεν υπάρχουν χονδροειδή σφάλματα κατά την προσομοίωση του φορέα. Ωστόσο, ο σημαντικότερος λόγος που η διακριτοποίηση διαμορφώνεται σε αυτό το αρχικό στάδιο και όχι σε μετέπειτα, είναι το υπολογιστικό κόστος. Στις μη γραμμικές αναλύσεις που θα ακολουθήσουν, θα απαιτούσε μεγάλο χρονικό διάστημα να διενεργηθούν τόσο οι αναλύσεις με τις απαραίτητες παραμέτρους όσο και σε κάθε μία να γίνει διερεύνηση των στοιχείων.

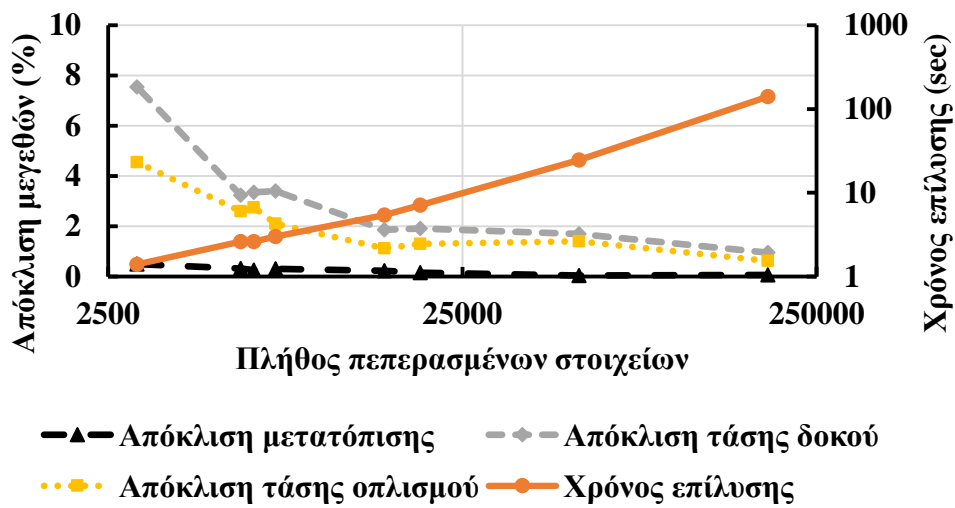
Για τις ελαστικές αναλύσεις που ακολουθούν, η διακριτοποίηση ξεκινά από μέγεθος στοιχείων 10mm και αδροποιείται ανά 5mm μέχρι να φτάσει σε ένα μη αποδεκτό μοτίβο. Πέντε διερευνήσεις θα πραγματοποιηθούν, μία για κάθε τύπο στοιχείου, όπου σε κάθε μία θα καταγράφεται το συνολικό πλήθος πεπερασμένων στοιχείων, η τάση και η μετατόπιση της δοκού στην ακραία εφελκυστική ίνα, όπως και η τάση του εφελκυσμένου οπλισμού. Οι καταγραφές αυτές γίνονται σε μία απομακρυσμένη περιοχή από τη φόρτιση ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Συγχρόνως, θα καταγράφεται και ο χρόνος στον οποίο εκτελέστηκε η κάθε ανάλυση. Γίνεται η παραδοχή ότι ο χρόνος που καταγράφεται είναι και αυτός που αντιστοιχεί στην κάθε ανάλυση, διότι στην πραγματικότητα αυτός εξαρτάται από τις διεργασίες που τρέχουν παράλληλα στον υπολογιστή. Τότε θα έπρεπε να εκτελεστεί η ίδια ανάλυση πολλές φορές και να προκύψει ένας μέσος όρος του χρόνου. Θεωρώντας την περίπτωση του στοιχείου C3D20 (που είναι δευτέρας τάξεως με τα περισσότερα σημεία ολοκλήρωσης) με την πιο πυκνή διακριτοποίηση (10mm μέγεθος στοιχείων) ως την αναλυτική λύση, θα συγκριθούν με βάση τα αποτελέσματα αυτής, τα αποτελέσματα όλων των υπολοίπων αναλύσεων και θα μορφωθούν τα διαγράμματα απόκλισης των παραπάνω υπολογισμένων μεγεθών συναρτήσει του πλήθους στοιχείων. Αυτά είναι τα κάτωθι:



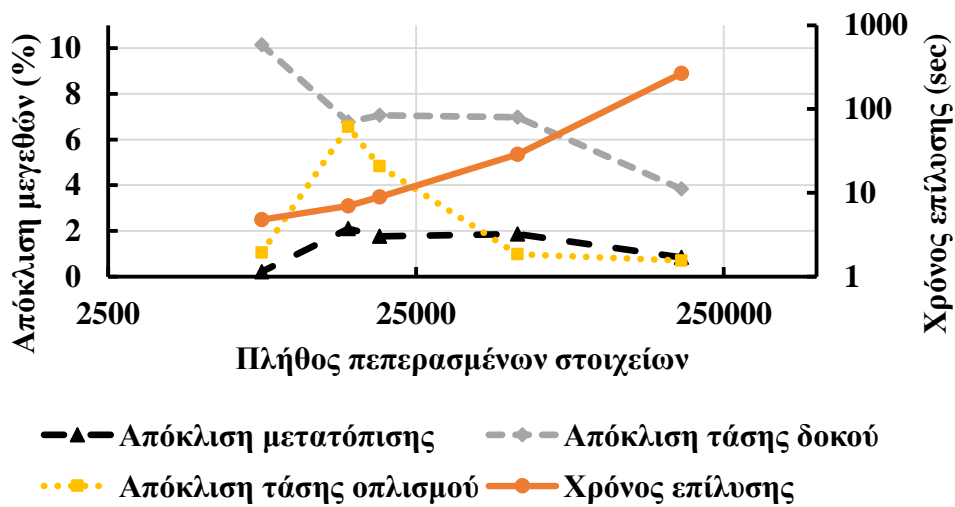
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για το στοιχείο C3D20



Σχήμα 3.10 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για το στοιχείο C3D20R



Σχήμα 3.11 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για τα στοιχεία C3D8 και C3D8S



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα απόκλισης μεγεθών για το στοιχείο C3D8R

Στις γραμμικές ελαστικές αναλύσεις η χαρακτηριστική εξίσωση φορέα που επιλύεται είναι η:

$$[K]\{U\}=\{R\} \quad (3.9)$$

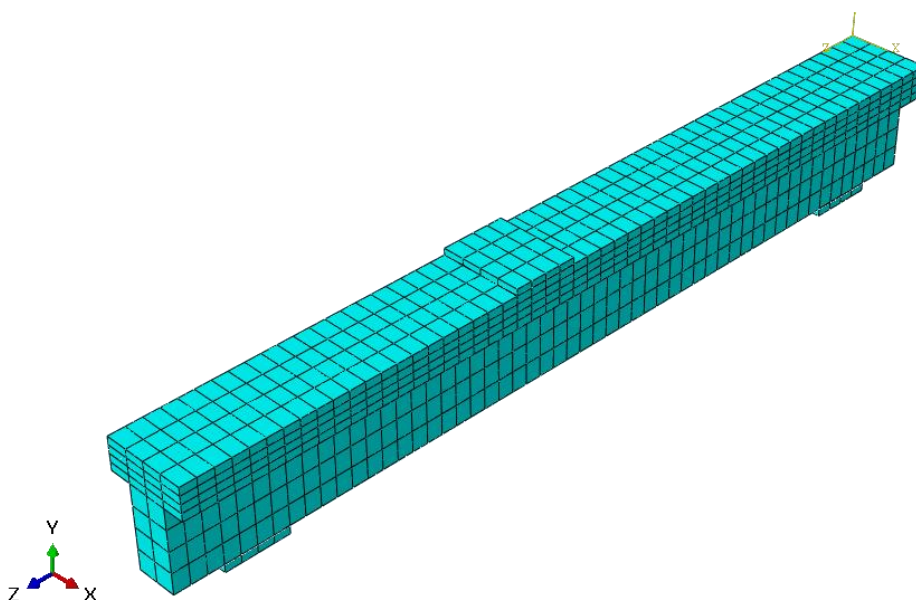
Όπου $[K]$ το μητρώο στιβαρότητας όλου του φορέα, όπως συντίθεται από τα επιμέρους μητρώα των πεπερασμένων στοιχείων, $\{U\}$ το διάνυσμα επικόμβιων μετατοπίσεων και $\{R\}$ το διάνυσμα εξωτερικών δράσεων.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι τα στοιχεία ανώτερης τάξης παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τα οχτακομβικά, αφού τα κατώτερης τάξης αρχίζουν να αποκλίνουν αρκετά περισσότερο με τη μείωση του πλήθους των στοιχείων στα διάφορα μεγέθη.

Πιο συγκεκριμένα, το στοιχείο C3D8R ξεκινά ήδη με μία αυξημένη απόκλιση ως προς τη μετρούμενη τάση στη δοκό, της τάξης του 4% σχεδόν, ακόμα και με την πιο πυκνή διακριτοποίηση. Αδροποιώντας το δίκτυο των στοιχείων ξεπερνά το 6% και καταλήγει στο 10% σε μία πιο αραιή διακριτοποίηση. Ως προς την απόκλιση των υπόλοιπων μεγεθών παρουσιάζει μία καλύτερη συμπεριφορά, καθώς ως προς τη μετατόπιση αποκλίνει μέχρι 2% και μέχρι 6% ως προς την τάση του οπλισμού. Ως προς τη συνολική συμπεριφορά του το στοιχείο αυτό αποκλίνει αρκετά σε σχέση με τα υπόλοιπα, οπότε απορρίπτεται η χρήση αυτού. Το ίδιο στοιχείο, πλήρους ολοκλήρωσης, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά, αλλά με μικρότερες αποκλίσεις. Αναλυτικότερα, ως προς τη μετατόπιση παρουσιάζει μία αρκετά καλή συμπεριφορά, αφού σε όλο το φάσμα της διακριτοποίησης δεν ξεπερνά το 0,5% απόκλιση. Ως προς τις τάσεις δοκού και οπλισμού, ξεκινάει με μία μικρή απόκλιση από την αναλυτική λύση, συνεχίζει κοντά στο 2% και για τα δύο μεγέθη και καταλήγει ξεπερνώντας το 7% και 4% αντίστοιχα. Σε μία σχετικά αραιή διακριτοποίηση (πλήθους 6000 με 7000 στοιχείων) θα ήταν δεκτό αυτό το στοιχείο, καθώς εκεί οι αποκλίσεις είναι μέχρι 3-3,5% και σε χρόνο επίλυσης μόλις κάτω από 3 δευτερόλεπτα, ωστόσο όπως συγκρίνεται με τα πρώτα διαγράμματα έχει μεγαλύτερες αποκλίσεις στο σύνολο. Οπότε θα απορριφθεί και αυτό. Το στοιχείο C3D8S παρουσίασε ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το C3D8.

Τα στοιχεία των 20 κόμβων έχουν όμοια συμπεριφορά, δηλαδή μικρές αποκλίσεις στη μετατόπιση και την τάση της δοκού, ενώ μεγαλύτερες ως προς την τάση οπλισμού. Ωστόσο, το C3D20R έχει καλύτερη απόκριση από το C3D20, καθώς σε όλες τις εξεταζόμενες διακριτοποιήσεις προέβαλε απόκλιση τάσης οπλισμού μέχρι 2,6%, είχε απόκλιση μετατόπισης σχεδόν 0,1% στο σύνολο, που το ξεπέρασε σε 0,8% στην πιο αραιή διακριτοποίηση και απόκλιση τάσης δοκού που δεν υπερέβη το 0,4% στο σύνολο. Τα αντίστοιχα μεγέθη στην περίπτωση του C3D20 αποκλίνουν πιο ομοιόμορφα και περισσότερο. Συγκεκριμένα, στις τάσεις οπλισμού και δοκού υφίσταται απόκλιση μέχρι 4% και 2,7% σχεδόν, ενώ η μετατόπιση ξεπερνά οριακά το 0,5%. Μπορεί να φαίνεται οξύμωρο το γεγονός ότι το C3D20R συμπεριφέρθηκε καλύτερα από το C3D20, καθώς περιέχει λιγότερα σημεία ολοκλήρωσης, αλλά δικαιολογείται από το φαινόμενο του shear locking. Ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείου σε ένα πρόβλημα κάμψης, όπως αυτό, δεν υπερεκτιμά τις διατμητικές τάσεις, όπως γίνεται στα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης, όπου εκεί τα περισσότερα σημεία Gauss εμφανίζουν αυξημένες διατμητικές παραμορφώσεις, που στην πραγματικότητα δεν υφίστανται.

Άρα, με βάση όλα τα παραπάνω, λαμβάνοντας υπόψη το μικρότερο χρόνο επίλυσης σε συνδυασμό με τις μικρότερες αποκλίσεις των μεγεθών, προκύπτει ότι η κατάλληλη διακριτοποίηση είναι αυτή με πλήθος στοιχείων 2258, που αντιστοιχεί σε μέγεθος 50mm σε όλα τα στοιχεία της δοκού, των μεταλλικών πλακών και του οπλισμού. Να σημειωθεί πως υπήρξε αντιστοιχία των στοιχείων πρώτης και δεύτερης τάξης για τα συνεχή στοιχεία και αυτά του δικτυώματος. Δηλαδή, όταν η δοκός και οι μεταλλικές πλάκες προσομοιώνονταν με το C3D20 ή το C3D20R, οι οπλισμοί διακριτοποιούνταν με το T3D3. Όμοια, στα στοιχεία C3D8, C3D8R και S αντιστοιχίζονταν το T3D2.



Σχήμα 3.13 Διακριτοποίηση πλακοδοκού

3.5 Υλικά προσομοίωσης

Σε προβλήματα συμπεριφοράς υλικών, όπου ο εφελκυσμός παίζει καταλυτικό ρόλο, καθώς έχει σαν επακόλουθο την εμφάνιση ρωγμών, όπως στην περίπτωση διατμητικής αστοχίας του οπλισμένου σκυροδέματος, συνηθίζεται να προσεγγίζεται η αντιμετώπισή τους εφαρμόζοντας τη θεωρία της πλαστικότητας στη θλιπτική ζώνη και τις αρχές της θραυστομηχανικής στις εφελκυστικές περιοχές της διατομής. Οι (Lubliner, Oliver, Oller, & Oñate, 1989) πρότειναν ένα ενιαίο καταστατικό μοντέλο σκυροδέματος, που να εμπεριέχει τις παραπάνω θεωρίες και αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους (Lee & Fenves, 1998). Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του δύο μορφές αστοχίας του σκυροδέματος, αυτή της σύνθλιψης κατά τη θλίψη και της ρηγμάτωσης κατά τον εφελκυσμό. Από τις παραπάνω εργασίες μορφώνεται το μοντέλο πλαστικής βλάβης σκυροδέματος ή CDP (εκ του Concrete Damage Plasticity) που χρησιμοποιεί το Abaqus για την περιγραφή της ανελαστικής απόκρισης του σκυροδέματος. Ενσωματώνει μία βαθμωτή μεταβλητή πλαστικής βλάβης d , που εκφράζει τη συσσώρευση βλάβης σε ένα σώμα και λαμβάνει ολοένα αυξανόμενη τιμή, όσο πραγματοποιούνται πλαστικές παραμορφώσεις, μέχρι ενός σημείου, στο οποίο έχει

επέλθει ο σχηματισμός ρωγμής σε μικροσκοπικό επίπεδο, που ισοδυναμεί στην απώλεια συνοχής υλικού. Ταυτόχρονα, εμπεριέχει μία άλλη μεταβλητή w που περιγράφει την ανάκτηση αντοχής του σκυροδέματος στη φάση φόρτισης-αποφόρτισης ή κατά τη μετάβαση από εφελκυσμό σε θλίψη και το αντίστροφο. Ωστόσο, αυτές οι μεταβλητές αφορούν πειράματα σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Το παρόν πείραμα άπτεται μονοτονικής φόρτισης. Το μοντέλο CDP απαιτεί την εισαγωγή παραμέτρων που σχετίζονται με την πλαστική συμπεριφορά, τη θλίψη και τον εφελκυσμό εν γένει του σκυροδέματος.

3.5.1 Πλαστική συμπεριφορά σκυροδέματος

Η ανελαστική ανάλυση με τη θεωρία της πλαστικότητας απαιτεί ένα κριτήριο διαρροής, ένα νόμο κράτυνσης-χαλάρωσης, που περιγράφει την επιφάνεια διαρροής κατά την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων και ένα νόμο πλαστικής ροής που να συσχετίζει πλαστικές παραμορφώσεις με τάσεις. Σύμφωνα με τις παραπάνω θεωρίες, ορίζεται η συνάρτηση διαρροής, που συντελεί στην εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής του υλικού κατά την αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων, ως:

$$F = \frac{1}{1-a} (\bar{q} - 3a\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl}) \langle \hat{\sigma}_{max} \rangle - \gamma \langle -\hat{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (3.10)$$

Με:

$$a = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1} , \quad (3.11)$$

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

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

Όπου στην παράμετρο a της (3.11), η ποσότητα σ_{b0}/σ_{c0} είναι ο λόγος της διαξονικής αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος προς τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη. Υιοθετείται για την παρούσα μελέτη η προκαθορισμένη τιμή του Abaqus, η 1,16. Στην εξίσωση (3.10) το \bar{q} εκφράζει την ισοδύναμη δρώσα τάση Mises και το \bar{p} την υδροστατική τάση. Η συνιστώσα όγκου (που είναι η υδροστατική ή σφαιρική) αποτελεί μία άλλη μορφή έκφρασης της εντατικής κατάστασης σημείου. Στην (3.12), η παράμετρος $\beta(\bar{\varepsilon}^{pl})$ εμφανίζεται όταν η αλγεβρικά μέγιστη κύρια δρώσα τάση $\langle \hat{\sigma}_{max} \rangle$ είναι θετική. Οι ποσότητες $\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})$ και $\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})$ είναι οι δρώσες τάσης συνοχής για θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα. Η παράμετρος γ , μέσω της παραμέτρου K_c , υπαγορεύει το σχήμα της επιφάνειας διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο. Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται η τιμή 1, που αντιστοιχεί στο κριτήριο διαρροής Drucker-Prager.

Το εντατικό σημείο του υλικού μπορεί να βρίσκεται στο εσωτερικό της επιφάνειας διαρροής ή επί αυτής. Μία αλλαγή της φόρτισης μπορεί να προκαλέσει τη μεταβολή της θέσης του σημείου στην επιφάνεια διαρροής και να κινηθεί εντός, επιστρέφοντας στην ελαστική κατάσταση (αν υφίσταται αποφόρτιση), να παραμείνει σε ουδέτερη κατάσταση συνεχίζοντας να κινείται επί της επιφάνειας ή να μεταπέσει σε νέα επιφάνεια για αύξηση της φόρτισης λόγω νόμου κράτυνσης του υλικού. Τα έως τώρα

δεδομένα, που έχουν περιγράψει το κριτήριο διαρροής, καθορίζουν το πότε θα συμβεί η πλαστικοποίηση, αλλά όχι για το είδος αυτής και τον τρόπο με τον οποίο αυξάνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις. Αυτά τα περιγράφει ο νόμος πλαστικής ροής που είναι της μορφής:

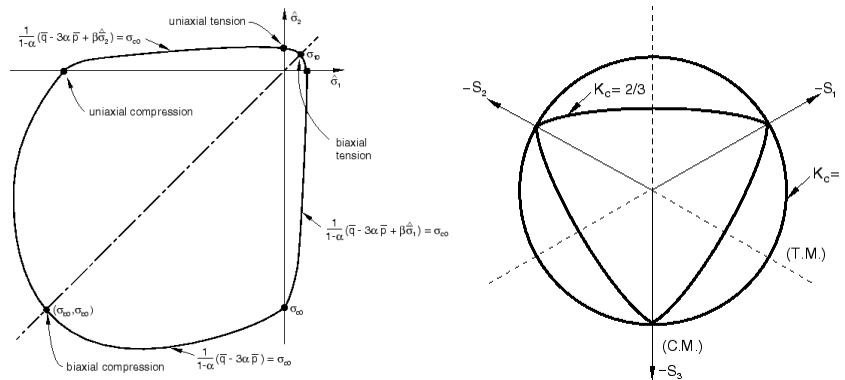
$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \mathbf{b} \quad (3.14)$$

Όπου $d\lambda$ είναι ένας συντελεστής αναλογίας, $\mathbf{b}^T = \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}}$ η διανυσματική κλίση του G και $G(\sigma)$ ορίζει την επιφάνεια του πλαστικού δυναμικού.

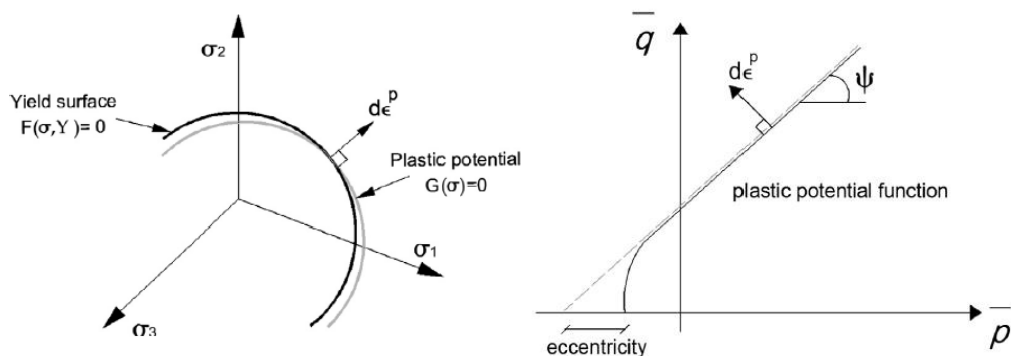
Η πλαστική παραμόρφωση πραγματοποιείται στη διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του πλαστικού δυναμικού. Αυτή η επιφάνεια ορίζεται όπως και η επιφάνεια διαρροής, ήτοι με έξι συνιστώσες στο χώρο των τάσεων και τρεις στο χώρο των κυρίων τάσεων. Οι δύο αυτές επιφάνειες δεν ταυτίζονται σε υλικά, που κατά την πλαστική παραμόρφωση, αναπτύσσεται τριβή. Το Abaqus χρησιμοποιεί την υπερβολική συνάρτηση Drucker-Prager για την περιγραφή του πλαστικού δυναμικού. Αυτή είναι:

$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (3.15)$$

Όπου ε είναι η εκκεντρότητα που υποδεικνύει το ρυθμό με τον οποίο η συνάρτηση του πλαστικού δυναμικού προσεγγίζει την ασύμπτωτη στο επίπεδο $\bar{q}-\bar{p}$, ψ είναι η γωνία διάδοσης (dilation angle), που δείχνει τη διεύθυνση του προσαυξητικού διανύσματος πλαστικών παραμορφώσεων και σ_{t0} η μονοαξονική εφελκυστική τάση.



Σχήμα 3.14 Επιφάνεια διαρροής στο χώρο επίπεδων τάσεων (αριστερά) και στο αποκλίνον επίπεδο (δεξιά)



Σχήμα 3.15 Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού στο αποκλίνον επίπεδο (αριστερά) και γωνία διάδοσης και εκκεντρότητα (δεξιά)

Με βάση τα παραπάνω λαμβάνονται οι τιμές των $\psi=35^\circ$ και $\varepsilon=0$ για τη γωνία διάδοσης και την εκκεντρότητα αντίστοιχα.

Τέλος, για την περιγραφή των ιδιοτήτων της πλαστικότητας του σκυροδέματος απαιτείται και η εισαγωγή της ιξώδους παραμέτρου. Η ιξωδοπλαστική διαμόρφωση είναι μία τεχνική που συντελεί στη διευκόλυνση σύγκλισης του μη γραμμικού μοντέλου με το να επιτρέπει τάσεις εκτός της επιφάνειας διαρροής. Χρησιμοποιείται μία γενίκευση της κανονικοποίησης Duvaut-Lions, όπου ορίζεται ο ρυθμός της παραμόρφωσης ως:

$$\dot{\varepsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu} (\varepsilon^{pl} - \varepsilon_v^{pl}) \quad (3.16)$$

Όπου μ είναι η ιξώδης παράμετρος. Αν δεν τεθεί 0, πολύ μικρές τιμές δύναται να τεθούν. Η ανάλυση εδώ γίνεται για $\mu=0,0001$.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, ο πίνακας που ακολουθεί εμπεριέχει τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο τμήμα πλαστικότητας του CDP μοντέλου.

Πίνακας 3.2 Τιμές παραμέτρων πλαστικότητας μοντέλου CDP

Γωνία διάδοσης ψ [°]	Εκκεντρότητα ε [-]	Λόγος σ_{b0}/σ_{c0} [-]	Συντελεστής K_c [-]	Παράμετρος ιξώδους μ [-]
35	0	1,16	1	0,0001

3.5.2 Θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος

Επόμενο βήμα είναι η περιγραφή της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος. Ως προς τη θλίψη, που όπως αναφέρθηκε, η μηχανισμός αστοχίας είναι η σύνθλιψη. Η εξέλιξη της διαρροής συνδέεται με τις πλαστικές παραμορφώσεις $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$. Απαιτείται η εισαγωγή μίας μονοαξονικής καμπύλης τάσης-ανελαστικής παραμόρφωσης που μετασχηματίζεται σε τάση-πλαστική παραμόρφωση. Η τάση τότε ορίζεται ως:

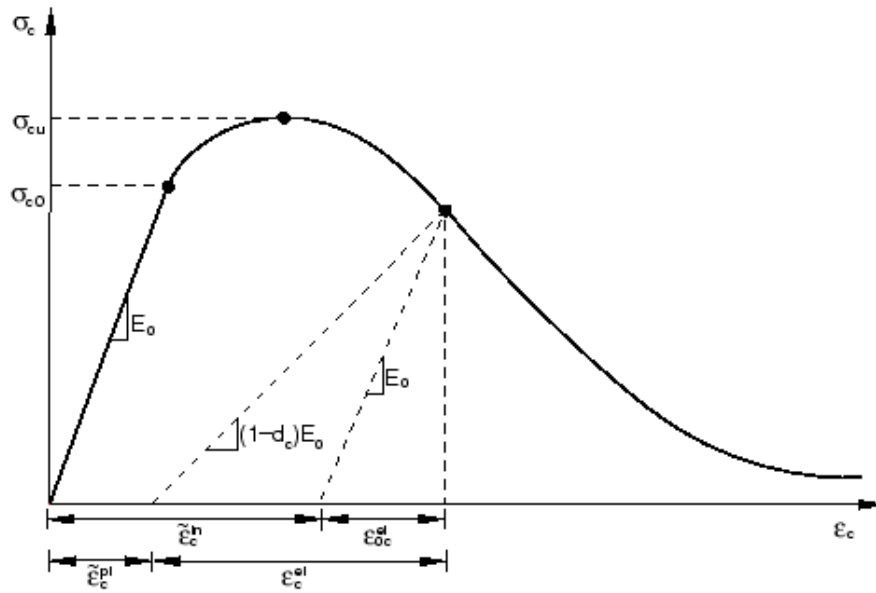
$$\sigma_c = (1 - d_c)\bar{\sigma}_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (3.17)$$

Όπου d_c η μεταβλητή βλάβης, που δεν εισάγεται σε αυτό το μοντέλο, άρα η τάση ισούται με τη δρώσα τάση συνοχής, που υπεισέρχεται στη (3.12) και E_0 το αρχικό μέτρο ελαστικότητας. Ο μετασχηματισμός της ανελαστικής παραμόρφωσης σε πλαστική γίνεται με βάση τη σχέση:

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.18)$$

Αλλά, λόγω απουσίας της μεταβλητής βλάβης, η πλαστική παραμόρφωση ισούται με την ανελαστική. Το σκυρόδεμα δρα ελαστικά μέχρι την τάση σ_{c0} , κρατύνεται μέχρι την απόλυτη τάση σ_{cu} και χαλαρώνει μέχρι την πλήρη αστοχία. Η ανελαστική παραμόρφωση προκύπτει αν από την συνολική παραμόρφωση αφαιρεθεί η αντίστοιχη ελαστική, που από νόμο Hooke ισούται με σ_c/E_0 . Δηλαδή ισχύει:

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \sigma_c/E_0 \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.16 Τυπική καμπύλη θλίψης σκυροδέματος που χρησιμοποιεί το Abaqus

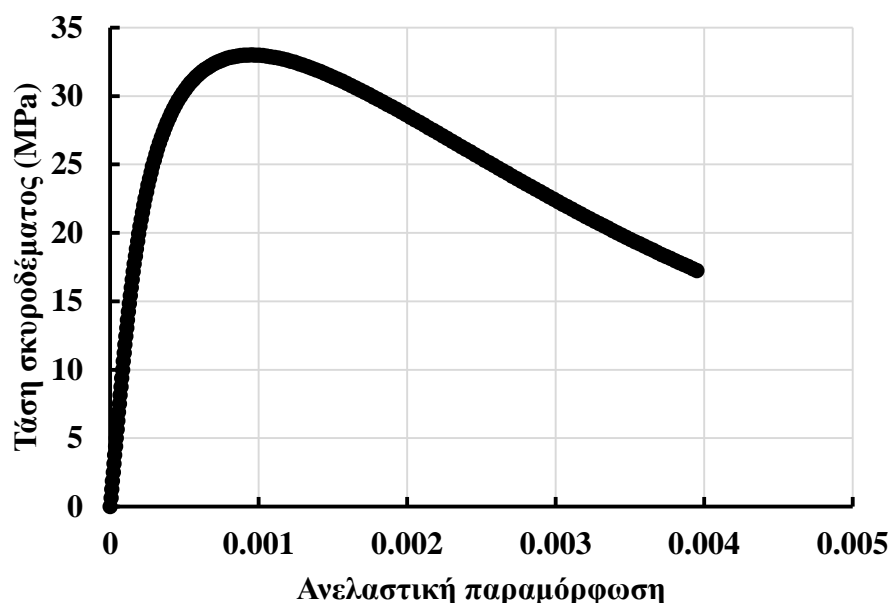
Η καμπύλη, η οποία θα εισαχθεί, θα προκύψει με βάση την παραβολή τάσεων-παραμορφώσεων που διαμόρφωσε ο (Popovics, 1973). Σύμφωνα με τη μελέτη του πρότεινε μία σχέση, που να εμπεριέχει εμμέσως τη μεταβλητότητα του λόγου E/E_0 , ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η σύνθεση του σκυροδέματος πέραν της αντοχής του. Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων είναι η εξής:

$$f = f_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^n} \quad (3.20)$$

Όπου f_0 η αντοχή σκυροδέματος, η οποία λαμβάνεται ως η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 25 + 8 = 33$ MPa για σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 κατά EN 1992-1-1 (European Committee, EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings, 2004), ε_0 η παραμόρφωση στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη αντοχή και λαμβάνεται ίση με 0,002 και η παράμετρος n , που ισοδυναμεί με μία προσεγγιστική συνάρτηση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος κανονικού βάρους, ισούται με $n_{concrete} = 0,0004f_0 + 1$. Οι μονάδες στις παραπάνω σχέσεις είναι σε psi. Η (3.20) εφαρμόζεται μέχρι παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_{cu} = 0,0045$. Χωρίζοντας την παραμόρφωση αστοχίας σε 180 ενδιάμεσα σημεία ε_i , μετασχηματίζοντας τις μονάδες από MPa σε psi και εφαρμόζοντας τη σχέση (3.20) προκύπτει η καμπύλη τάσης συνολικής παραμόρφωσης. Έπειτα για αρχικό μέτρο ελαστικότητας κατά EN 1992-1-1 (European Committee, EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings, 2004)

$E_0 = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 31475,81$ MPa, για κάθε σημείο συνολικής παραμόρφωσης και τάσης Popovics, εφαρμόζοντας τη σχέση (3.19) προκύπτουν οι ανελαστικές παραμορφώσεις. Στο διδακτορικό του (Vieira, 2020) και στη δουλειά των (Genikomsou & Polak, 2015) θεωρείται ότι το σκυρόδεμα δρα ελαστικά μέχρι την τιμή $0,4f_{cm}$. Ωστόσο, εδώ δεν υιοθετήθηκε αυτό και υπολογίστηκαν ανελαστικές παραμορφώσεις σε όλο το φάσμα των τάσεων. Άλλωστε μέχρι αυτό το όριο οι τιμές

αυτές είναι μικρές και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η επίδρασή τους. Παρακάτω τίθεται η καμπύλη τάσης-ανελαστικής παραμόρφωσης που εισήχθη στο Abaqus για την περιγραφή της θλιπτικής συμπεριφοράς του μοντέλου CDP.



Σχήμα 3.17 Καμπύλη τάσης-ανελαστικής παραμόρφωσης για τη θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος στο CDP μοντέλο

3.5.3 Εφελκυστική συμπεριφορά σκυροδέματος

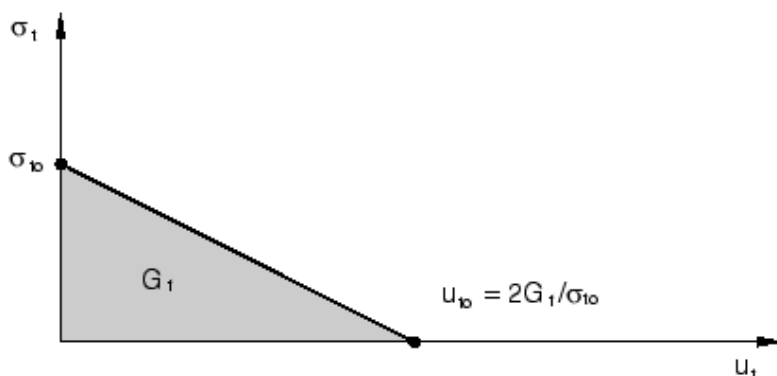
Τελευταίο βήμα για την πλήρη περιγραφή του μοντέλου CDP είναι η μόρφωση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος. Θα μπορούσε και σε αυτήν την περίπτωση να χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία της τάσης και ανελαστικής παραμόρφωσης, όπως στη θλίψη, αλλά επιλέγεται αυτή της ενέργειας θραύσης (fracture energy). Το κριτήριο αυτό επιλέγεται καθώς δεν υπάρχει εξάρτηση στη διακριτοποίηση. Θα εμφανιστεί συσσώρευση βλάβης σε μία επιφάνεια και δε θα γίνει περιορισμός σε συγκεκριμένα στοιχεία.

Το Abaqus υιοθετεί την προσέγγιση των (Hillerborg, Modéer, & Petersson, 1976), οι οποίοι με την ενεργειακή μέθοδο προτείνουν ότι δεν υπάρχει στιγμιαία απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος με το άνοιγμα μιας ρωγμής. Συγκεκριμένα, υποστηρίζουν ότι η διάδοση της ρωγμής επέρχεται μόλις το σκυρόδεμα αναπτύξει την εφελκυστική αντοχή του, κατόπιν υφίσταται μία σταδιακή μείωση της αντοχής του όσο αυξάνεται το εύρος της ρωγμής και ύστερα από ένα συγκεκριμένο άνοιγμα της ρωγμής έχει απωλέσει πλήρως την αντοχή του. Αυτό συμβαίνει, διότι μέχρι ενός συγκεκριμένου εύρους που αντιστοιχεί σε μικροκρυσταλλική ζώνη, υπάρχουν κάποιοι εναπομείναντες σύνδεσμοι για μεταφορά τάσεων. Η ενέργεια που απαιτείται για το άνοιγμα μίας μοναδιαίας επιφάνειας ρωγμής είναι η ενέργεια θραύσης και ισούται με το εμβαδόν της καμπύλης τάσης και εύρους ρωγμής, ήτοι:

$$G_f = \int_0^{u_{t0}} \sigma du_t \quad (3.21)$$

Όπου u_{10} είναι το εύρος στο οποίο υπάρχει πλήρης απώλεια της εφελκυστικής αντοχής. Το Abaqus υποθέτει γραμμική απώλεια αντοχής μέχρι αυτό το εύρος.

Έτσι, για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο μοντέλο CDP, απαιτείται η εισαγωγή δύο παραμέτρων. Αυτή της εφελκυστικής αντοχής σ_{10} και της απαιτούμενης ενέργειας θραύσης G_f .



Σχήμα 3.18 Γραμμική απώλεια εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος συναρτήσει του εύρους ρωγμής

Για την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να ληφθεί η μέση εφελκυστική αντοχή για σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30, η οποία κατά EN 1992-1-1 (European Committee, EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General

rules and rules for buildings, 2004), είναι $f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 25^{\frac{2}{3}} = 2,565$ MPa. Για την ενέργεια θραύσης υπάρχουν σχέσεις που υπολογίζουν την τιμή της σε εφαρμογές άοπλου σκυροδέματος. Ενδεικτικά, κατά (fib, 2010) η ενέργεια θραύσης, απουσία πειραματικών δεδομένων, είναι $G_f = 73f_{cm}^{0,18} = 73 * 33^{0,18} = 0,137$ N/mm. Ωστόσο, στη δουλειά των (Mercan, Schultz, & Stolarski, 2010) αναφέρεται ότι η παρουσία του οπλισμού αυξάνει σημαντικά την ενέργεια θραύσης. Δεν υπάρχει κάποια αποδεκτή τιμή της και δεδομένου ότι στο παρόν πείραμα υπάρχει μεγάλη ποσότητα εφελκυστικού οπλισμού υιοθετείται η τιμή της $G_f=2$ N/mm. Τότε, βάσει της σχέσης (3.21) η μετακίνηση στην οποία χάνεται πλήρως η εφελκυστική αντοχή είναι η $u_{10}=2*2/2,565=1,56$ mm. Ύστερα, το Abaqus μετασχηματίζει τις μετακινήσεις εντός των ευρών ρωγμής σε πλαστικές. Ωστόσο, αυτές οι δύο ταυτίζονται διότι δεν έχει εισαχθεί η μεταβλητή βλάβης. Περαιτέρω διερεύνηση στο θέμα της ενέργειας θραύσης θα μπορούσε να γίνει με την εκτέλεση explicit ανάλυσης στο Abaqus. Ωστόσο, αυτό ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής.

Επίσης, απαιτείται μία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας στο ελαστικό τμήμα του υλικού σκυροδέματος. Στο ελαστικό φάσμα το Abaqus θεωρεί ίδια τιμή του μέτρου ελαστικότητας, τόσο για τη θλίψη όσο και για τον εφελκυσμό, όπως συμβαίνει σε ισότροπα υλικά. Ωστόσο, όντας ανισότροπο υλικό και για να μη χρειαστεί να οριστούν πρόσθετες ιδιότητες σε αυτή του τη μορφή, επιλέγεται να μειωθεί το μέτρο ελαστικότητας, που είναι κοινό, ώστε να υπαγορευτεί την εφελκυστική συμπεριφορά στην ελαστική περίπτωση. Ουσιαστικά, η θλιπτική συμπεριφορά θα υπαγορευτεί από την παραβολή Poronics, στην οποία εμπεριέχεται το αρχικό μέτρο ελαστικότητας. Μία ενδεικτική τιμή του μέτρου ελαστικότητας στο ελαστικό τμήμα θα ήταν τα 6000 MPa, λίγο κάτω από το 20% της αρχικής τιμής του.

3.5.4 Χάλυβας οπλισμού

Ως προς τον οπλισμό, προστίθεται το πλαστικό μέρος στις ιδιότητές του. Η μεταελαστική συμπεριφορά του μπορεί να περιγραφεί από έναν κρατυνόμενο κλάδο κλίσης $b=0,001$ και παραμόρφωσης αστοχίας $0,06$. Άρα, για να οριστεί η ευθεία αυτή στο Abaqus, απαιτούνται δύο σημεία. Αυτό στο οποίο ξεκινάει η διαρροή του χάλυβα, ήτοι το σημείο για τάση 500 MPa και 0 πλαστική παραμόρφωση και ένα σημείο με τάση $500,5 \text{ MPa}$ (που εμπεριέχει την κλίση κράτυνσης) και πλαστική παραμόρφωση $0,0575$, που ισούται με την ολική αφαιρώντας την αντίστοιχη ελαστική, με τις ιδιότητες όπως ορίστηκαν στην υποενότητα (3.1.2).

Οι μεταλλικές πλάκες έδρασης και φόρτισης είναι επιθυμητό να συμπεριφερθούν ελαστικά καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης. Έτσι, διατηρείται το ελαστικό μέρος των ιδιοτήτων του υλικού του δομικού χάλυβα, όπως ορίστηκε και αυτό στην υποενότητα (3.1.2).

3.6 Φόρτιση

Η εκτέλεση της μη γραμμικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετατοπίσεων. Σαν μέγεθος επεβλήθη μετακίνηση 15 mm , ένα μέγεθος μεγαλύτερο από τη μέγιστη μετακίνηση των $10,5 \text{ mm}$, περίπου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Με αυτόν τον τρόπο, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, κατέστη δυνατό να μορφωθεί η καμπύλη φορτίου τέμνουσας-μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, που να προσεγγίζει αυτή του πειράματος. Ο αλγόριθμος επίλυσης είναι αυτός της Newton-Raphson με έλεγχο μετατοπίσεων, για τη δημιουργία καθοδικού κλάδου, μετά την απόκτηση του μέγιστου φορτίου. Εδώ στο μη γραμμικό πρόβλημα, σε αντιδιαστολή με τη γραμμική ελαστική περίπτωση, επιλύεται μία προσαυξητική διαδικασία, όπου η συνολική επιβαλλόμενη μετατόπιση u_{max}^m διαιρείται, με βάση έναν αριθμό προσαυξητικών βημάτων N_{incr} , σε $\Delta u^m = u_{max}^m / N_{incr}$, ώστε σε κάθε επαυξητικό βήμα να απαιτείται ένας κόμβος σε συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας να λαμβάνει αυτή τη μετατόπιση. Έπειτα, απαιτείται από τη λύση να προσδιοριστεί η τιμή του φορτίου που πρέπει να επιβληθεί στην κατασκευή, ώστε η μετατόπιση στον κόμβο ελέγχου να λάβει την επιθυμητή τιμή. Πρέπει, επομένως, να επιλυθεί η ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας με τη μέθοδο Newton-Raphson, λαμβάνοντας υπόψη έναν φορτιστικό συντελεστή λ που αντιστοιχεί σε μία γνωστή κατανομή φορτίου P_0 :

$${}^{t+\Delta t}K {}^{t+\Delta t}U = {}^{t+\Delta t}\lambda P_0 \quad (3.22)$$

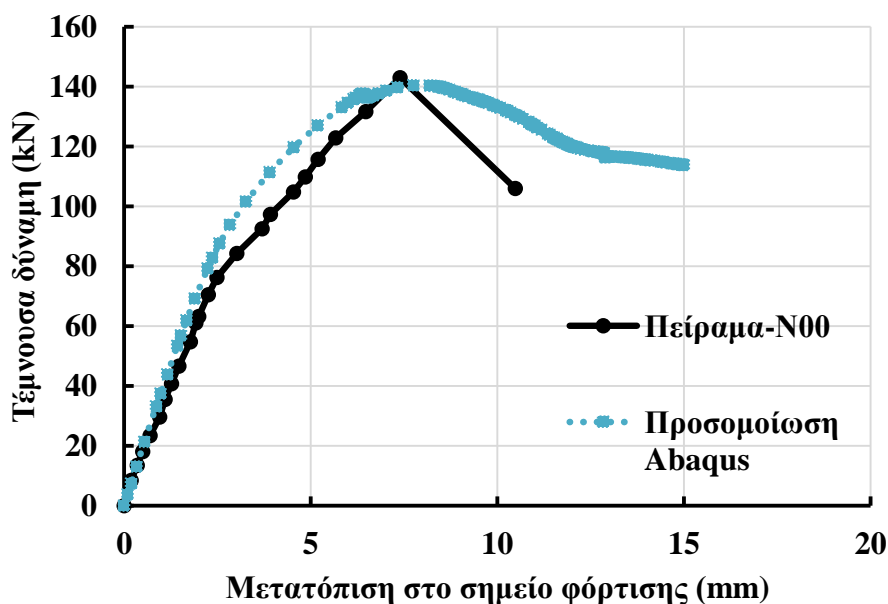
με τον περιορισμό ο κόμβος ελέγχου να λαμβάνει τη συγκεκριμένη μετατόπιση σε κάθε βήμα. Το Abaqus έχει τη δυνατότητα, αυτόματα, να αυξομειώνει τη βηματική μετατόπιση ανάλογα με το πόσο επιτυχημένη ήταν η σύγκλιση στο προηγούμενο βήμα. Έτσι, βελτιστοποιείται η διαδικασία επίλυσης.

Υπάρχουν δύο στρατηγικές επίλυσης της Newton-Raphson, αυτή της Full και της Quasi. Στην πρώτη, που είναι και αυτή που επελέγη, σε κάθε εσωτερική επανάληψη του βήματος υπολογίζεται ουσιαστικά το μητρώο στιβαρότητας του φορέα μέχρι να επέλθει η σύγκλιση, ενώ στη δεύτερη υπολογίζεται μία φορά ανά συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Η Quasi ενδεχομένως να είναι κατάλληλη για φορείς με μεγάλο πλήθος

στοιχείων σε ειδικές περιπτώσεις. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η Full κατόρθωσε να συγκλίνει σε συνολικό χρόνο CPU ίσο με 1488 δευτερόλεπτα.

3.7 Αποτελέσματα ανάλυσης

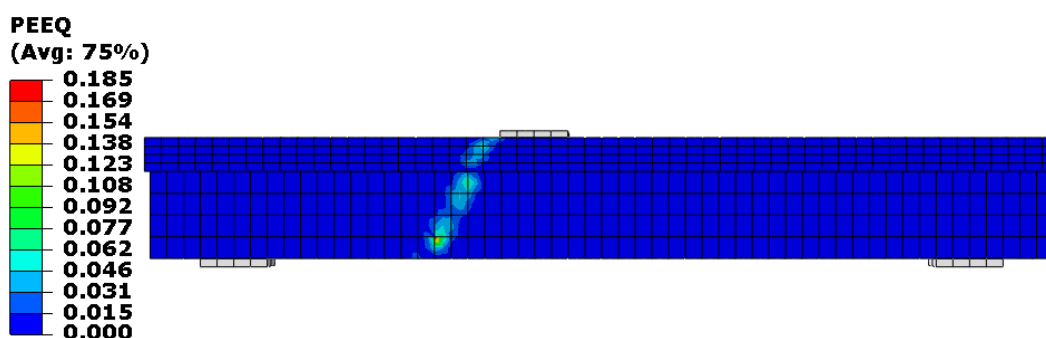
Στο σχήμα (3.19) που έπεται, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ανάλυσης σε όρους τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης. Όπως εύκολα διακρίνεται, η καμπύλη που μορφώθηκε από την προσομοίωση του Abaqus προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αυτή του πειράματος. Συγκεκριμένα, το φορτίο αστοχίας στην αριθμητική προσομοίωση προέκυψε ίσο με 140,51 kN, που στο πείραμα καταγράφηκε 143 kN, άρα απόκλιση μόλις 1,74%, σε μετατόπιση στο σημείο φόρτισης 7,75mm, ενώ στο πείραμα ήταν 7,39mm, δηλαδή μία απόκλιση της τάξης του 4,87%. Είναι αποδεκτές αποκλίσεις, που σημαίνει ότι οι παραπάνω παραδοχές και τιμές που ελήφθησαν για την προσομοίωση ήταν οι κατάλληλες για την αποτύπωση του πειράματος με αριθμητική ανάλυση. Επίσης, πρόδηλο είναι ότι η καμπύλη του Abaqus σε όρους κλίσης αγγίζει με καλή ακρίβεια αυτή του πειράματος μέχρι τα 80kN, περίπου, αλλά δεν εκλαμβάνει τις ρηγματώσεις μέχρι το ανώτερο φορτίο, επιδεικνύοντας μία πιο ελαφρώς στιβαρή απόκριση. Τέλος, η μετελαστική συμπεριφορά δεν ταυτίζεται με αυτή του πειράματος, καθώς έχει πιο ήπια κλίση. Άλλωστε η πραγματική μορφή αστοχίας είναι ψαθυρή, οπότε μπορεί να αμεληθεί μέχρι ενός σημείου ο καθοδικός κλάδος.



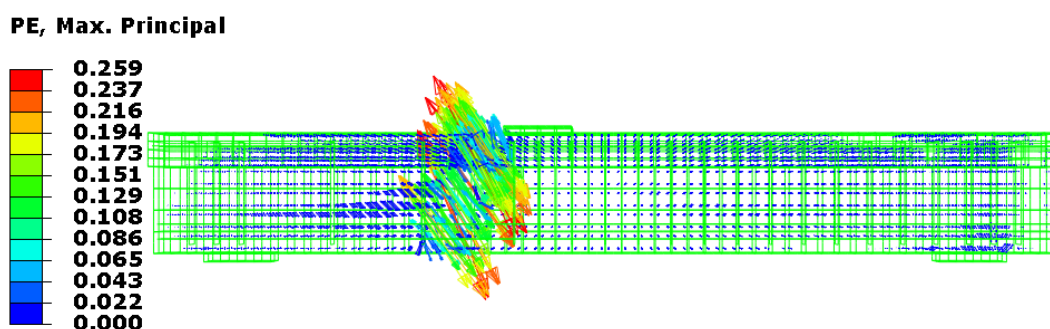
Σχήμα 3.19 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης με το Abaqus

Στα δύο επόμενα σχήματα παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά μεγέθη απεικόνισης της βλάβης. Στο πρώτο, πλοτάρεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση. Πρόκειται για μία βαθμωτή μεταβλητή που εκφράζει την ανελαστική παραμόρφωση του υλικού. Αν είναι μεγαλύτερη του 0 έπεται ότι το υλικό έχει διαρρεύσει. Παρατηρείται ότι

υπάρχει πλαστική παραμόρφωση σε μία κεκλιμένη ζώνη, που εκτείνεται από την παρειά της μεταλλικής πλάκας φόρτισης μέχρι το μέσο, περίπου, του ανοίγματος με τον αραιό εγκάρσιο οπλισμό. Αυτή είναι και μία ένδειξη της ρωγμής που σχηματίζεται στην πλακοδοκό. Κοντά στην ακραία εφελκυστική ίνα υπάρχει πλαστικοποίηση σε ποσοστό 8-8,5% περίπου, σύμφωνα με τις διαβαθμίσεις. Στο δεύτερο σχήμα, απεικονίζονται οι διευθύνσεις των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων. Στην κάθετη διεύθυνση αυτών διαφαίνεται το σχήμα διάδοσης της ρωγμής, που είναι ταυτόσημο με το σχήμα των πλαστικών ισοδύναμων παραμορφώσεων. Ουσιαστικά έχει διαφανεί ο λοξός εφελκυσμός στην περιοχή αυτή, κάθετα στην οποία πραγματοποιείται η διάνοιξη ρωγμής.



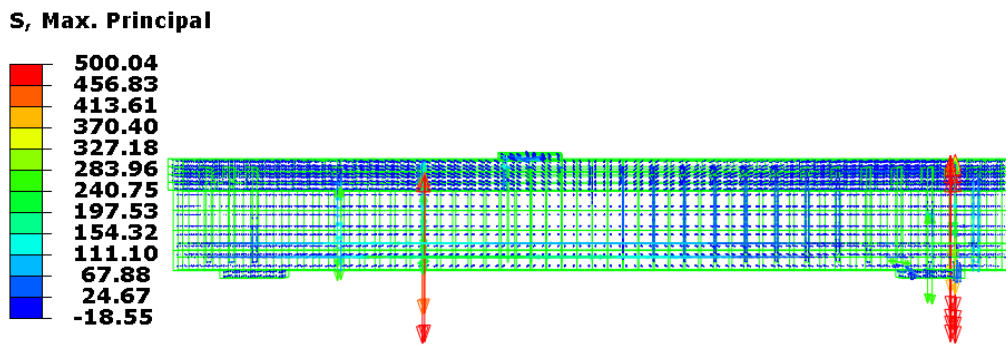
Σχήμα 3.20 Διαβάθμιση ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης



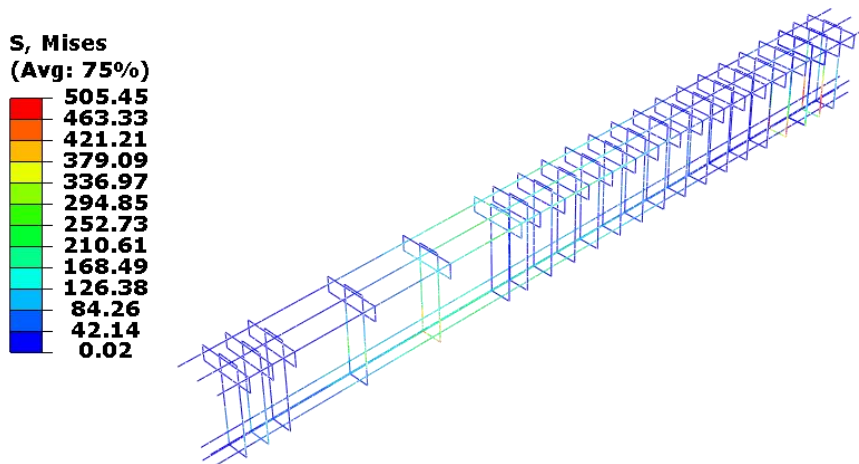
Σχήμα 3.21 Απεικόνιση των κύριων πλαστικών παραμορφώσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Παρακάτω απεικονίζονται οι μέγιστες κύριες τάσεις στη δοκό και οι τάσεις Von Mises στον οπλισμό. Αφενός οι τροχιές αυτών και ο προσανατολισμός τους έχει καταδείξει την κυριαρχία του διατμητικού φαινομένου, καθώς διακρίνεται ότι επικρατεί ο εφελκυσμός των εγκάρσιων οπλισμών αφού ενεργοποιούνται κατά την ύπαρξη του λοξού εφελκυσμού και, αφετέρου διαφαίνεται η ένταση των εγκάρσιων σκελών του διατμητικού οπλισμού που εφελκύνονται κατά τη φόρτιση. Μάλιστα είναι καθαρή η

διαρροή του οπλισμού, αφού σε ορισμένα σημεία έχει ξεπεραστεί η αντοχή των 500MPa και κρατούνται πλέον.

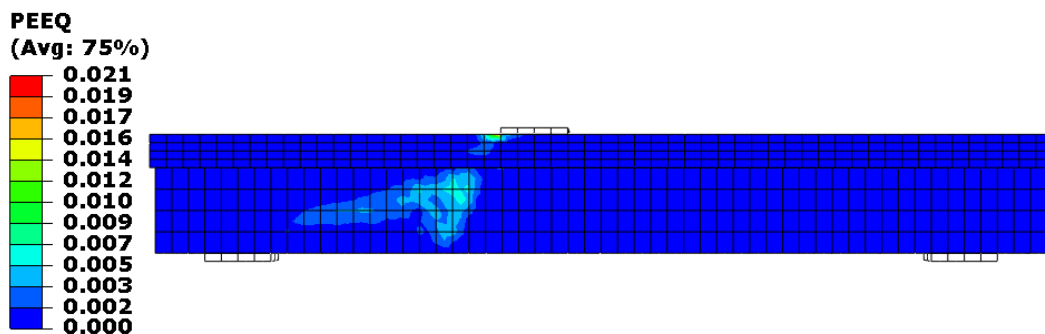


Σχήμα 3.22 Απεικόνιση των μέγιστων κύριων τάσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης



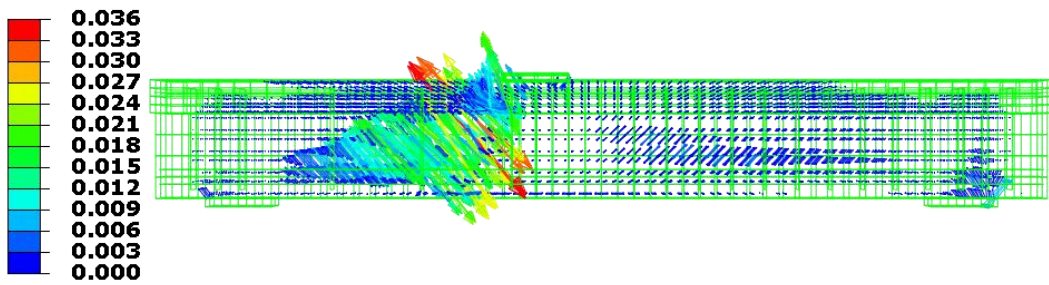
Σχήμα 3.23 Τάσεις Mises του οπλισμού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούσαν την κατάσταση της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης, δηλαδή στην ολοκλήρωση του φαινομένου. Για συγκριτικούς λόγους, μπορούν να παρουσιαστούν τα ίδια αποτελέσματα και στο βήμα στο οποίο η καμπύλη λαμβάνει το μέγιστο φορτίο. Είναι τα κάτωθι:



Σχήμα 3.24 Διαβάθμιση ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων σε ενδιάμεσο βήμα της ανάλυσης

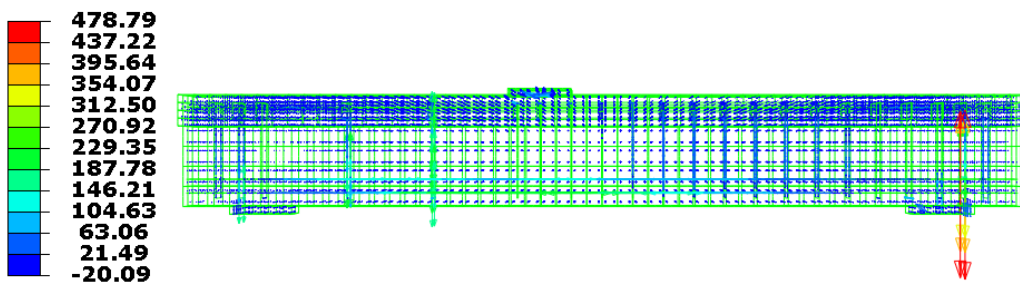
PE, Max. Principal



Σχήμα 3.25 Απεικόνιση των κύριων πλαστικών παραμορφώσεων σε ενδιάμεσο βήμα της ανάλυσης

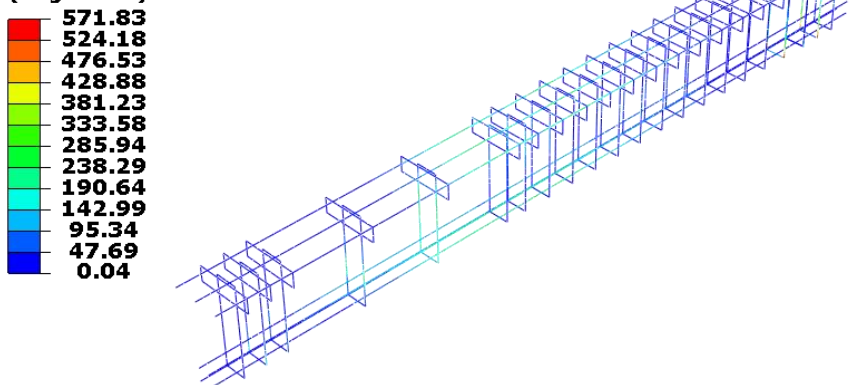
Ως προς τα μεγέθη των πλαστικών παραμορφώσεων, είναι μικρότερου μεγέθους, της τάξης του 0,55-0,65% για τις ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις. Και στις δύο απεικονίσεις η πλαστικοποιημένη ζώνη είναι ευρύτερη και ηπιότερης κλίσης, καλύπτοντας ουσιαστικά την περιοχή με τον αραιό διατμητικό οπλισμό μεταξύ πλάκας φόρτισης και πλάκας έδρασης. Ως προς τις τάσεις, ισχύουν τα ίδια, χωρίς ο διατμητικός οπλισμός να έχει φτάσει στα όρια του.

S, Max. Principal



Σχήμα 3.26 Απεικόνιση των μέγιστων κύριων τάσεων σε ενδιάμεσο βήμα της ανάλυσης

S, Mises
(Avg: 75%)



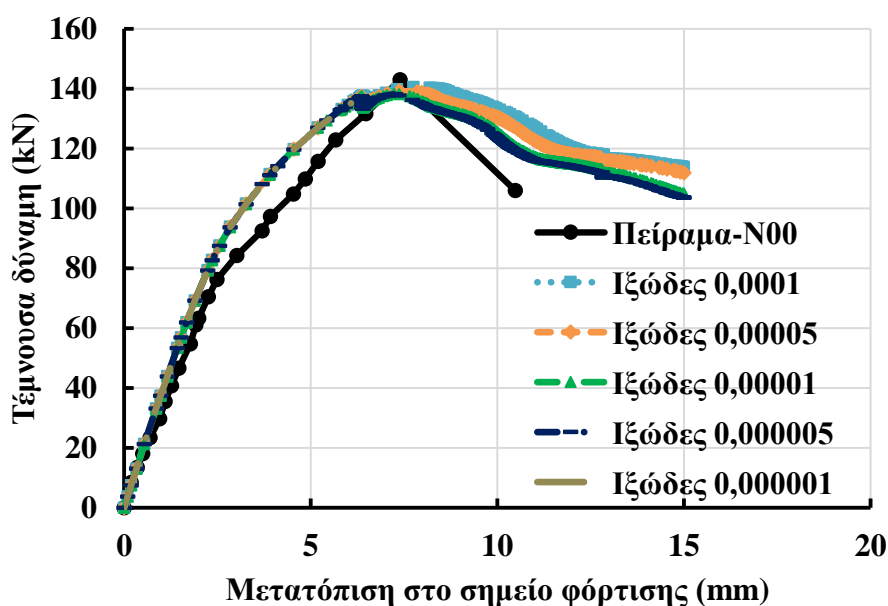
Σχήμα 3.27 Τάσεις Mises του οπλισμού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Μπορεί τα παραπάνω σχήματα να φαίνονται ότι παράγουν εξωπραγματικά αποτελέσματα με την έννοια ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις έχουν απότομη κλίση, ότι οι τάσεις ενδεχομένως δεν έχουν σωστό μέγεθος και διεύθυνση, ότι εντείνεται εκτός του αραιού ανοίγματος και ο διατμητικός οπλισμός της στήριξης με την πυκνή διάταξη εγκάρσιου οπλισμού (που και αυτή η περίπτωση άπτεται του διατμητικού φαινομένου) ή ότι η διακριτοποίηση εν τέλει ήταν αδρή και δεν επέτρεψε την ακριβή περιγραφή φαινομένων σε μικροσκοπική κλίμακα, υπενθυμίζεται ότι σκοπός αυτής της ενότητας ήταν η περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία. Και συγκεκριμένα, επιδιώχθηκε η προσέγγιση του προβλήματος με τη μόρφωση καμπύλης φορτίου-μετατόπισης και εν γένει η συμπεριφορά του φαινομένου σε καθολική-μακροσκοπική προσέγγιση, κάτι που επετεύχθη σε μεγάλο βαθμό.

3.8 Παραμετρική διερεύνηση

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση, απομένει μία διερεύνηση της ευαισθησίας του προσομοιώματος απέναντι στη μεταβολή των τιμών κάποιων χαρακτηριστικών παραμέτρων που το προσδιορίζουν. Συγκεκριμένα, διατηρώντας τις παραμέτρους με τις οποίες έγινε η ανάλυση προηγουμένως και μεταβάλλοντας κάθε φορά τη μία παράμετρο, θα διαφανεί η απόκριση του μοντέλου για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων αυτών. Γίνεται, επομένως, μία διερεύνηση για το πώς ανταποκρίνεται η κατασκευή για διάφορες τιμές της παραμέτρου ιξώδους, της γωνίας διάδοσης, της ενέργειας θραύσης και της παραμέτρου K_c .

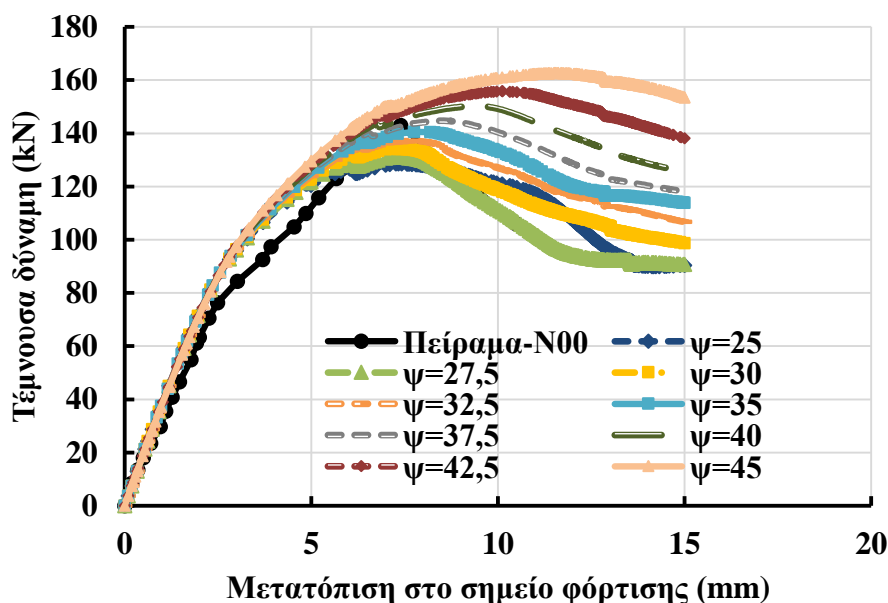
Αρχικά, η πρώτη διερεύνηση αφορά την παράμετρο ιξώδους, όπου με την τιμή 0,0001 πραγματοποιήθηκε η ανάλυση. Στο σχήμα (3.28) που ακολουθεί, δοκιμάζονται μικρότερες τιμές, καθώς είναι επιθυμητό να εξεταστεί πόσο δύναται να μικρύνει το περιθώριο στο οποίο επιτρέπεται να αφεθούν τάσεις εκτός επιφάνειας διαρροής.



Σχήμα 3.28 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της παραμέτρου ιξώδους

Εύκολα παρατηρείται ότι αυτή η παράμετρος επηρεάζει την καμπύλη από τη διαρροή και μετά, καθώς οι ελαστικοί κλάδοι ταυτίζονται. Προκύπτει ότι όσο μικραίνει η παράμετρος, ελαφρώς μειώνεται και το φορτίο αστοχίας. Επίσης, η μετελαστική κλίση του καθοδικού κλάδου, όλο και φθίνει πλησιάζοντας αυτή του πειράματος. Τέλος, μόνο για την τιμή 0,000001 δεν υπήρχε σύγκλιση του μοντέλου.

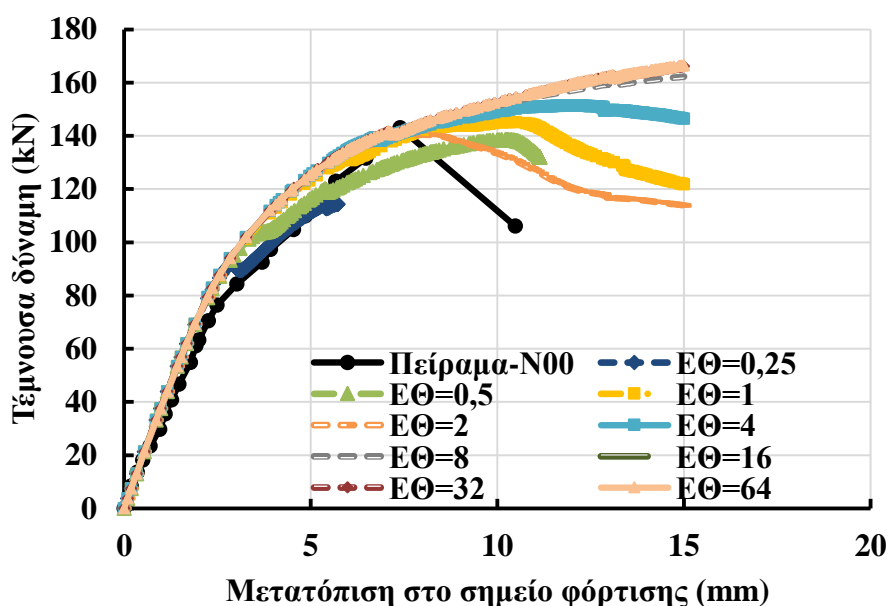
Επόμενη διερεύνηση είναι αυτή της γωνίας διάδοσης. Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για γωνία διάδοσης $\psi=35^\circ$. Εξετάστηκε η ευαισθησία της δοκού για γωνίες διάδοσης από 25° έως 45° , ανά $2,5^\circ$. Αυτή η παράμετρος ουσιαστικά προσδιορίζει την ανελαστική ογκομετρική μεταβολή σε κοκκώδη υλικά (Mercan, Schultz, & Stolarski, 2010), όπως και το σκυροδέμα. Επηρεάζει την πίεση περίσφιγξης με αποτέλεσμα η τάση-παραμόρφωση κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού να εξαρτάται από αυτή. Συγχρόνως, συνδέεται και με τη διαστρέβλωση της πλαστικότητας του σκυροδέματος. Όλα αυτά επιβεβαιώνονται από το σχήμα που έπεται, καθώς αύξηση της γωνίας διάδοσης οδηγεί σε μεγαλύτερη περίσφιγξη, οπότε πιο στιβαρή συμπεριφορά. Μάλιστα, οι καμπύλες επηρεάζονται από το πέρας της οιονεί σταθερής κλίσης μέχρι τα 80kN και έπειτα, επιδεικνύοντας όντως αυξανόμενη κλίση, όπως και στον καθοδικό κλάδο αντίστοιχα, ενώ με την πλαστιμότητα υφίσταται αύξηση του οριακού φορτίου σε μεγαλύτερη συνοδευόμενη μετακίνηση.



Σχήμα 3.29 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της γωνίας διάδοσης

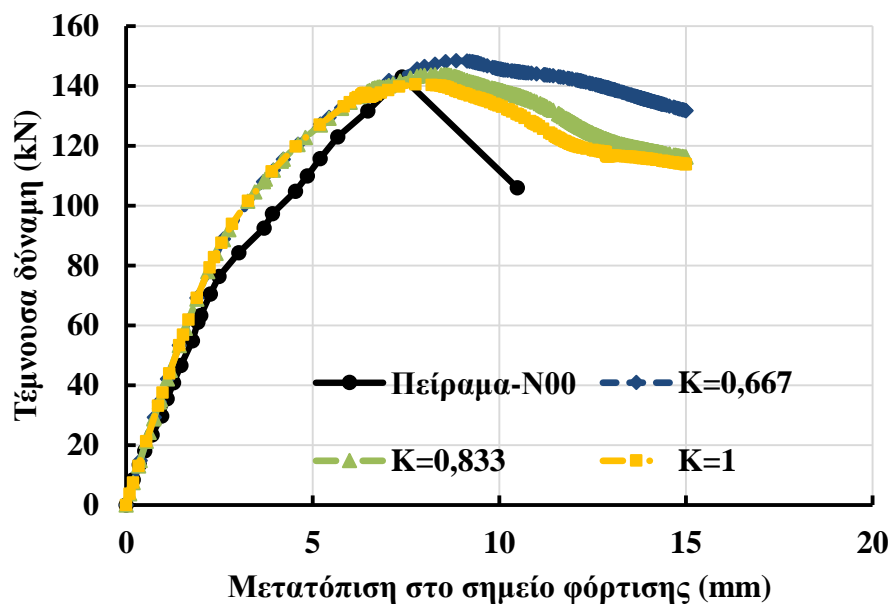
Παρακάτω ακολουθεί η διερεύνηση ευαισθησίας του προσομοιώματος στις αλλαγές της ενέργειας θραύσης. Αυτή υπαγορεύει την εφελκυστική συμπεριφορά του σκυροδέματος, αφού, όπως προαναφέρθηκε, αντιστοιχεί στην ενέργεια που απαιτείται για τη διάνοιξη μίας μοναδιαίας επιφάνειας ρωγμής. Συνεπώς, μικρότερες τιμές της ενέργειας θραύσης οδηγούν σε πρόωρη έναρξη ρηγματώσεως. Αυτή με τη σειρά της καταλήγει στην εμφάνιση μικρότερης στιβαρότητας του φορέα, ήτοι μικρότερη κλίση, μετά το πέρας της οιονεί γραμμικής-ελαστικής απόκρισης της δοκού, και κατ'

επέκταση μικρότερο οριακό φορτίο. Αντίθετα, μεγαλύτερες τιμές της ενέργειας θραύσης καθιστούν τη δοκό πιο στιβαρή, με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη κλίση μετά την ελαστική συμπεριφορά και μεγαλύτερο φορτίο αντοχής. Αυτά επιβεβαιώνονται στο διάγραμμα που έπεται, όπου έγιναν δοκιμές για τιμές ενέργειας θραύσης από 0,25 N/mm έως 64 N/mm. Σε όλες τις περιπτώσεις υπήρχε σύγκλιση στο φαινόμενο, εκτός της τιμής των 0,25 N/mm. Άρα, και σε θεωρητικές σχέσεις, όπως υποδείχθηκε και μία στην υποενότητα της προσομοίωσης των υλικών που αφορούσαν άοπλο σκυρόδεμα, δε θα υπήρχε σύγκλιση για τιμές μικρότερες των 0,25 N/mm. Αρκετά μεγάλες τιμές, όπως αυτές των 8 N/mm και άνω, δεν πρόλαβαν καν να αναπτύξουν οριακό φορτίο μέχρι την ολοκλήρωση της αριθμητικής ανάλυσης, υποδεικνύοντας όλο και μεγαλύτερη αντοχή.



Σχήμα 3.30 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της ενέργειας θραύσης

Τέλος, πραγματοποιήθηκε και η απόκριση της δοκού ως προς την παράμετρο K_c , που υπαγορεύει το σχήμα της επιφάνειας διαρροής, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.31). Εκτός της τιμής 1 που υιοθετήθηκε για την παρούσα μελέτη, εξετάστηκε η τιμή 2/3 που αντιστοιχεί στο κριτήριο κατά Rankine και μία ενδιάμεση τιμή των 5/6. Προέκυψε ότι η παράμετρος αυτή έχει μικρή επίδραση μέχρι και το φορτίο αστοχίας, παρά επηρεάζει περισσότερο τη συμπεριφορά μετά από αυτό. Όσο μικραίνει η παράμετρος τόσο πιο πλάστιμα συμπεριφέρεται το μοντέλο.



Σχήμα 3.31 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορες τιμές της ενέργειας θραύσης

4 ΜΑΚΡΟΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Κατ' αντιστοιχία με το προηγούμενο κεφάλαιο, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του προβλήματος διακριτοποιώντας τη μελετώμενη δοκό σε ένα πεπερασμένο πλήθος μικροσκοπικών στοιχείων, εδώ επιχειρείται η προσομοίωση του φορέα με τη χρήση διακριτών πεπερασμένων στοιχείων. Η κατασκευή μοντελοποιείται από διασυνδεδεμένα στοιχεία που περιγράφουν τη συμπεριφορά των μελών, που την απαρτίζουν, σε μακροσκοπικό επίπεδο. Αυτά τα μακροστοιχεία συνιστούν την απλούστερη τάξη μοντέλου, που δύνανται να περιγράψουν με μεγάλη ακρίβεια και, συγχρόνως με απλότητα, τη μη γραμμική απόκριση ενός μέλους απέναντι σε διάφορες δράσεις. Δηλαδή, προσομοιώνοντας κάθε μέλος της κατασκευής με ένα στοιχείο συντίθεται η συνολική συμπεριφορά ολόκληρης της κατασκευής (Taucer, Spacone, & Filippou, 1991).

Το λογισμικό που θα αξιοποιηθεί για τη μακροπροσομοίωση της πλακοδοκού είναι το OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). Πρόκειται για ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε από το Pacific Earthquake Engineering Research Center με σκοπό την προχωρημένη προσομοίωση δομικών και γεωτεχνικών συστημάτων, εμπεριέχοντας μοντέλα που αντικατοπτρίζουν ρεαλιστικά τη μη γραμμική συμπεριφορά τους, υποκείμενα σε στατικές ή δυναμικές δράσεις. Είναι κυρίως γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++, ενώ μετέρχεται αρκετές υπορουτίνες σε C και Fortran. Έτσι, ακολουθώντας τη λογική και τις μεθοδολογίες του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, μεγιστοποιείται η ενοποίηση και η επεκτασιμότητα εφαρμογής μοντέλων συμπεριφοράς των κατασκευών, διαδικασιών επίλυσης και επεξεργασίας δεδομένων. Χρησιμοποιεί έναν διερμηνέα από τη γλώσσα Tcl, που παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με το πρόγραμμα και την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων.

Το OpenSees περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, όπως και το Abaqus. Διαθέτει προχωρημένες δυνατότητες για την ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών αξιοποιώντας ένα ευρύ φάσμα υλικών, στοιχείων και αλγορίθμων επίλυσης για την αντιμετώπιση μη γραμμικών προβλημάτων. Έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό τα ραβδωτά στοιχεία με τη θεώρηση κατανεμημένης πλαστικότητας, που δίνουν πληροφορίες για την πραγματική συμπεριφορά των διατομών σε χαρακτηριστικά σημεία καθ' ύψος της διατομής και κατά μήκος του στοιχείου ανάλογα με την τήρηση του κριτηρίου διαρροής.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι πάλι η αριθμητική προσομοίωση της πλακοδοκού του πειράματος αναφοράς και συγκεκριμένα της N00 περίπτωσης στο λογισμικό OpenSees. Ωστόσο, εδώ πραγματοποιείται με τη χρήση μακροστοιχείων για την αποτύπωση της συμπεριφοράς του φορέα σε καθολική και μακροσκοπική κλίμακα. Για την υλοποίηση αυτής της προσέγγισης αξιοποιήθηκε το παράδειγμα 2.c στατικής ανάλυσης pushover των (Mazzoni & McKenna, OpenSees Example 2c. Nonlinear Cantilever Column: Inelastic Uniaxial Materials in Fiber Section, 2006), το οποίο

τροποποιήθηκε πλήρως στις απαιτήσεις του προβλήματος, που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, διατηρώντας μόνο τον αλγόριθμο επίλυσης.

Οποιαδήποτε πληροφορία, που θα ακολουθήσει και άπτεται της διαδικασίας μορφοποίησης του εξεταζόμενου φορέα εξήχθη από το εγχειρίδιο χρήσης του ίδιου του λογισμικού Opensees, ήτοι κατά (Mazzoni, McKenna, Scott, Fenves, & et al, 2006)

4.2 Μοντελοποίηση φορέα

4.2.1 Χωρική διάσταση φορέα

Αρχικό βήμα για την αριθμητική προσομοίωση του φορέα είναι ο καθορισμός της χωρικής του διαμόρφωσης. Δηλαδή, πρέπει να οριστεί ο χώρος μέσα στον οποίο θα αναλυθεί το πρόβλημα. Αυτό πραγματοποιείται με τον προσδιορισμό των διαστάσεων, αν θα είναι μονοδιάστατης φύσης το πρόβλημα, δισδιάστατης-επίπεδης ή τρισδιάστατης-χωρικής και τον ορισμό των βαθμών ελευθερίας, δηλαδή το πλήθος μεταφορικών και στροφικών ελευθεριών των κόμβων. Η εντολή που επιτρέπει τη μόρφωση του περιβάλλοντος ανάλυσης του προβλήματος είναι η κάτωθι:

model BasicBuilder -ndm \$ndm <-ndf \$ndf>

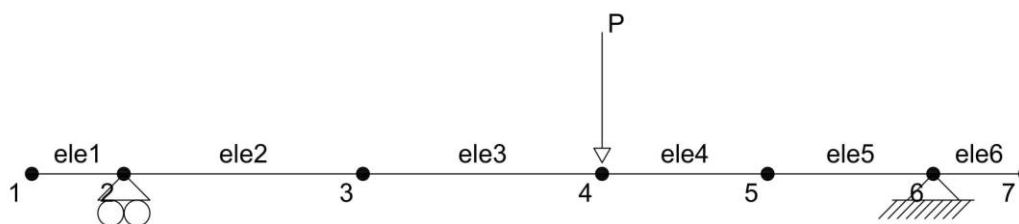
Όπου, \$ndm και \$ndf είναι ο αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος (1,2 ή 3) και ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας των κόμβων (1,3 ή 6 κατ' αντιστοιχία με τον αριθμό των διαστάσεων) αντίστοιχα. Λόγω της φύσης του πειράματος που η φόρτιση είναι στη μία διεύθυνση της πλακοδοκού (εντός επιπέδου), για απλοποίηση της διαδικασίας μοντελοποίησης του φορέα και για μείωση του υπολογιστικού κόστους επιλέγεται να αναλυθεί το πρόβλημα επίπεδα. Έτσι, σαν όρισμα τίθεται 2 στο \$ndm για την ύπαρξη δύο καθολικών αξόνων γεωμετρίας και 3 στο \$ndf, όπου για μία καμπτόμενη δοκό ενδιαφέρουν οι δύο μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας και ένας στροφικός, κάθετος στους δύο άξονές της.

Σαν παρατήρηση, που εξηγείται εδώ και αφορά όλες τις υπόλοιπες εντολές που έπονται, είναι ότι το \$ δίπλα από οποιαδήποτε μεταβλητή μεταφέρει την τιμή που έχει σαν όρισμα και οποιαδήποτε μεταβλητή περιέχεται εντός των < > είναι προαιρετική.

4.2.2 Συνδεσμολογία φορέα

Εν συνεχεία, ορίζονται οι κόμβοι του φορέα που κείνται σε χαρακτηριστικές θέσεις της δοκού. Η κομβική διάταξη είναι αυτή του σχήματος 4.1. Συνολικά τίθενται επτά κόμβοι. Δύο σε κάθε άκρο της δοκού, άλλοι δύο στις στηρίξεις της, ένας στο σημείο φόρτισης, που ουσιαστικά διαχωρίζει τη δοκό στα δύο ανοίγματα με τον πυκνό και τον αραιό διατμητικό οπλισμό και δύο ενδιάμεσους εντός αυτών των δύο ανοιγμάτων. Η σύνδεση αυτών πραγματοποιείται με την παρεμβολή έξι ραβδωτών στοιχείων. Θα μπορούσε να γίνει και μια πιο αδρή διακριτοποίηση υπό την έννοια να υφίστανται μόνο τρεις κόμβοι, οι δύο των στηρίξεων και ο ενδιάμεσος ο οποίος φορτίζεται. Ωστόσο, οι δύο παραπάνω στα άκρα βοηθούν στην πιστότερη απεικόνιση της δοκού, στις περιοχές πέραν των μεταλλικών πλακών έδρασης, ενώ οι άλλοι δύο εντός των δύο ανοιγμάτων εξυπηρετούν στην αντικειμενικότητα των στοιχείων. Δηλαδή, όπως επιδιώχθηκε μετά κατά την ανάλυση, έγινε μία πιο πυκνή διακριτοποίηση εντός της δοκού, για να διαπιστωθεί αν υπάρχει αλλαγή των αποτελεσμάτων κατά την προσθήκη δύο ακόμα

στοιχείων. Αποδείχτηκε ότι όντως τα στοιχεία δεν μετέβαλαν τα αποτελέσματα και έτσι αφέθηκε η τελική διαμόρφωσή της.



Σχήμα 4.1 Μοντελική διάταξη πλακοδοκού

Η κομβολογία πραγματοποιείται με την εντολή:

node \$nodeTag (ndm \$coords) <-mass (ndf \$massValues)>

Όπου το \$nodeTag είναι η ονοματολογία των κόμβων (επτά στο σύνολο) και \$coords οι συντεταγμένες τους, τόσες όσες και οι διαστάσεις του προβλήματος. Το \$massValues αφορά τις επικόμβιες μάζες στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, επειδή το πρόβλημα που επιλύεται είναι μορφής στατικής pushover και όχι δυναμικής ανάλυσης δε χρειάζεται ο ορισμός τους.

4.2.3 Συνοριακές συνθήκες φορέα

Έπειτα, ακολουθούν οι συνοριακές συνθήκες της δοκού. Αυτές προκύπτουν με το να δεσμεύονται οι βαθμοί ελευθερίας των ενδιαφερόμενων κόμβων. Υλοποιούνται με την εξής εντολή:

fix \$nodeTag (ndf \$constrValues)

Όπου δεσμεύονται οι κόμβοι 2 και 6, βάσει της παραπάνω διάταξης. Το \$constrValues είναι οι τιμές δέσμευσης. Λαμβάνει ο κάθε βαθμός ελευθερίας του κόμβου στον οποίο υπάρχει στήριξη την τιμή 0 ή 1, ανάλογα με το ποια κινηματική ελευθερία ή δέσμευση υπάρχει αντίστοιχα, στον κόμβο αυτό.

4.2.4 Παραμετροποίηση φορέα

Επόμενο βήμα είναι η καταχώρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προβλήματος σε μεταβλητές μέσω της εντολής **set**. Καταχωρούνται οι διαστάσεις της διατομής του φορέα, το μήκος της δοκού, οι κατακόρυφες και οριζόντιες κεντροβαρικές αποστάσεις των εκάστοτε στρώσεων του εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού, οι αποστάσεις συνδετήρων τόσο στο πυκνό όσο και στο αραιό άνοιγμα και διάμετροι ράβδων του διαμήκους και του διατμητικού οπλισμού. Αυτόματα υπολογίζονται τα εμβαδά διατομών και των οπλισμών καθώς και το κέντρο βάρους της διατομής και τα στατικά ύψη των οπλισμών.

Επιδιώκεται η προσέγγιση της καταχώρησης οποιουδήποτε χαρακτηριστικού του προβλήματος σε μεταβλητή, ώστε να είναι εφικτή η παραμετροποίησή του. Δηλαδή, μπορούν εύκολα να συσχετιστούν και να αλληλεπιδράσουν τα δεδομένα μεταξύ τους, ενώ ο χρήστης δύναται να τα απομονώσει ή να τροποποιήσει των κώδικα και ακόμα να τον προσαρμόσει αυτόματα στις ανάγκες κάποιου παρόμοιου προβλήματος με άλλες

ιδιότητες. Επίσης, μπορεί να τον επεκτείνει και στα πλαίσια άλλων μοντέλων. Επομένως, διευκολύνεται η παραμετροποίηση του προβλήματος με ταχεία μορφοποίηση του κώδικα, χωρίς ιδιαίτερο χρονικό κόστος.

4.3 Τεχνολογία στοιχείου

Η ελαστοπλαστική ανάλυση φορέων μπορεί να αποτυπωθεί μέσω δύο θεωρήσεων, αυτών της συγκεντρωμένης πλαστικότητας και της κατανεμημένης πλαστικότητας. Με την πρώτη θεώρηση επέρχεται η πλαστικοποίηση ολόκληρης της διατομής, μόλις τα εντατικά μεγέθη ικανοποιήσουν το κριτήριο διαρροής εκεί. Μοντελοποιείται μέσω της εισαγωγής μη γραμμικών στρωφικών ελατηρίων στις κρίσιμες θέσεις των μελών, τα οποία ορίζονται μέσα από σχέσεις ροπής-στροφής (Διαγράμματα Μ-φ). Οι κρίσιμες θέσεις των μελών είναι αυτές που αναμένεται να σχηματιστεί η πλαστική άρθρωση. Ωστόσο, παρόλο που έχει το πλεονέκτημα της γραμμικής συμπεριφοράς του φορέα μεταξύ δύο διαδοχικών πλαστικών κόμβων και ως εκ τούτου εφαρμόζονται γραμμικοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού για την καμπύλη ικανότητας μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος και επιτυγχάνοντας αριθμητική σύγκλιση εύκολα, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα (Taucer, Spacone, & Filippou, 1991), (Παπαδρακάκης, Μαθήματα Στατικής V Πλαστική ανάλυση ραβδωτών φορέων, 2013). Αφενός απαιτεί τον *a priori* καθορισμό των παραμέτρων που προσδιορίζουν τα στρωφικά ελατήρια, γεγονός που μπορεί να απλοποιεί ή και να αμελεί συγκεκριμένες πτυχές στην υστερητική συμπεριφορά των μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αφετέρου, αδυνατεί να περιγράψει και την κατανομή της πλαστικότητας καθ' ύψος της διατομής, αλλά και κατά μήκος του στοιχείου. Τους περιορισμούς αυτούς τους αντιμετωπίζει το στοιχείο διανεμημένης πλαστικότητας. Σε αυτό, σύμφωνα με τη δεύτερη θεώρηση, η πλαστικοποίηση πραγματοποιείται σταδιακά ικανοποιώντας το κριτήριο διαρροής σε συγκεκριμένα καθ' ύψος σημεία της διατομής του μέλους. Επίσης, μπορεί να περιγράψει και την πλαστικοποίηση κατά μήκος του μέλους. Κατά (Παπαδρακάκης, Μαθήματα Στατικής V Πλαστική ανάλυση ραβδωτών φορέων, 2013) παρόλο που είναι η δεύτερη θεώρηση πιο χρονοβόρα, είναι και η πιο αξιόπιστη. Οπότε αυτή είναι που υιοθετείται για την επιλογή των στοιχείων που προσομοιώνουν το φορέα.

4.3.1 Στοιχεία διανεμημένης πλαστικότητας με πολυστρωματική ανάλυση διατομής

Τα στοιχεία αυτά αξιοποιούν την πολυστρωματική θεώρηση της διατομής. Σύμφωνα με αυτή, η διατομή του μέλους υποδιαιρείται σε ένα πεπερασμένο πλήθος στρώσεων παράλληλο προς τον διαμήκη άξονά του. Όπως αναφέρθηκε, η πλαστικοποίηση συμβαίνει όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο διαρροής σε κάποια ίνα, το οποίο είναι συνάρτηση των συνιστωσών του τανυστή των τάσεων και όχι των εντατικών μεγεθών, όπως είναι στην περίπτωση της συγκεντρωμένης πλαστικότητας. Είναι η ενδεδειγμένη μέθοδος ανάλυσης σε επίπεδο διατομής οποιασδήποτε γεωμετρίας και εύρεσης της αντοχής της. Συγχρόνως, μπορεί να προσομοιώνει και διατομές με την παρεμβολή δύο ή και περισσότερων στοιχείων, όπως είναι η διατομή οπλισμένου σκυροδέματος ή μια σύμμικτη, όπου υπάρχει αλληλεπίδραση σκυροδέματος με χάλυβα οπλισμού ή δομικού αντίστοιχα.

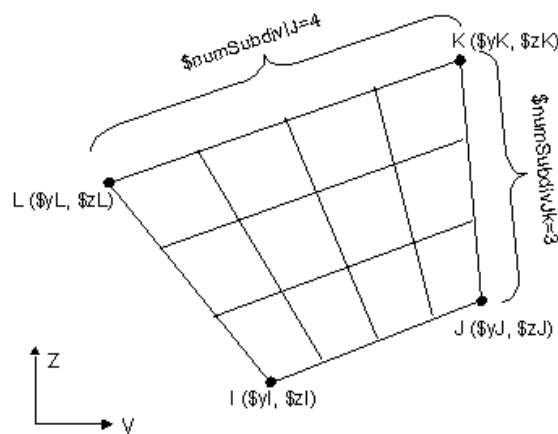
Με βάση αυτά, η διατομή της πλακοδοκού χωρίζεται σε ένα πλήθος στρώσεων, όπως επίσης και ο οπλισμός της. Κάθε ίνα και κάθε στρώση οπλισμού διέπεται από το δικό της νόμο υλικού, ή και πιο συγκεκριμένα από το δικό της διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σ-ε σε μονοαξονική ένταση. Η μη γραμμικότητα ανάλυσης προκύπτει από το μη γραμμικό νόμο υλικού που υφίσταται σε κάθε ίνα και στρώση. Στο OpenSees η διακριτοποίηση μίας σύνθετης διατομής οπλισμένου σκυροδέματος σε ίνες και στρώσεις οπλισμού υλοποιείται από την εξής εντολή:

```
section Fiber $secTag <-GJ $GJ> {
  fiber ...
  patch ...
  layer ...
}
```

Όπου, \$secTag είναι το όνομα της σύνθετης διατομής που πρόκειται να διαιρεθεί σε ίνες και περιλαμβάνει και τις στρώσεις χάλυβα οπλισμού. Η προαιρετική δήλωση \$GJ που εκφράζει τη στρεπτική δυσκαμψία της διατομής αμελείται. Το fiber είναι η δήλωση για την παραγωγή μίας μεμονωμένης ίνας. Εδώ επιχειρείται ο διαχωρισμός ολόκληρης της διατομής σε πλήθος πολλών ινών. Αυτό πραγματοποιείται με το patch. Το layer αποκρυσταλλώνει την παράθεση ινών σε γραμμική ή κυκλική διάταξη. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί για να τεθεί ο χάλυβας οπλισμού σε πλήθος στρώσεων. Έτσι, το patch ορίζεται κατ' επέκταση ως εξής:

```
patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL
```

Όπου, το quad δηλώνει τυχαίας τετράπλευρης μορφής patch. Το \$matTag είναι το όνομα του υλικού που κυβερνά το εκάστοτε patch με τις ίνες του. Τα \$numSubdivIJ και \$numSubdivJK είναι το πλήθος στρώσεων που διαιρείται το patch της διατομής κατά πλάτος και καθ' ύψος αντίστοιχα. Τα \$yI \$zI \$yJ \$zJ \$yK \$zK \$yL \$zL είναι οι συντεταγμένες y και z των τεσσάρων κορυφών του patch ως προς το τοπικό σύστημα αξόνων της διατομής, ορισμένα κατά την αντιωρολογιακή φορά.



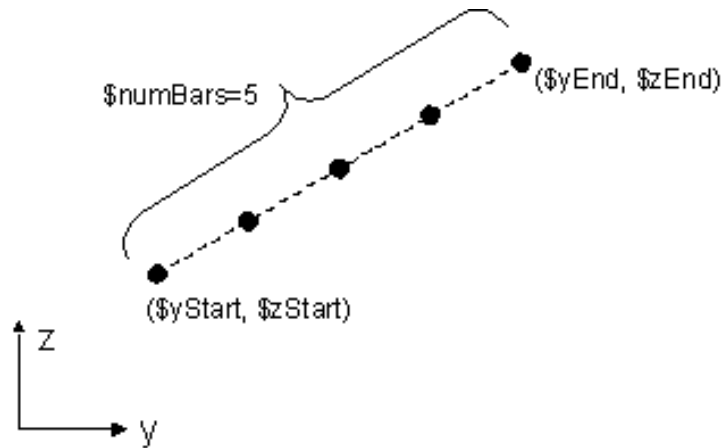
Σχήμα 4.2 Ορισμός quad patch στο OpenSees

Στην προκειμένη περίπτωση, όπου η διατομή της δοκού είναι σχήματος T, χωρίζεται σε δύο patches, ένα για τον καθαρό κορμό και άλλο ένα για το πέλμα. Επιλέγεται μία αρκετά πυκνή διακριτοποίηση των patches, τέτοια ώστε τα πάχη των ινών σε κάθε διεύθυνση να είναι 5 mm.

Αντίστοιχα, οι στρώσεις των οπλισμών της διατομής θα οριστούν από την εντολή του layer ως:

layer straight \$matTag \$numFiber \$areaFiber \$yStart \$zStart \$yEnd \$zEnd

Όπου, το layer straight αφορά ευθύγραμμης διάταξης οπλισμό, όπως είναι στην περίπτωση των καθ' ύψος στρώσεων των οπλισμών σε μία διατομή οπλισμένου σκυροδέματος. Το \$numFiber άπτεται του πλήθους των ράβδων ανά στρώση οπλισμού. Εδώ υφίστανται δύο ράβδοι ανά στρώση, στις δύο στρώσεις του εφελκυσμένου οπλισμού και τρεις ράβδοι στη στρώση του θλιβόμενου οπλισμού. Το \$areaFiber είναι το εμβαδόν της κάθε ράβδου ανά περίπτωση. Είναι τα εμβαδά για Ø25 στον εφελκυσμό και για Ø20 στη θλίψη. Τέλος, τα \$yStart \$zStart \$yEnd \$zEnd δηλώνουν τις συντεταγμένες y και z των ράβδων αρχής και πέρατος αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3 Ορισμός layer straight στο OpenSees

Εφόσον διαμορφώθηκε η διακριτοποίηση της διατομής, είναι εφικτός πλέον ο υπολογισμός του μητρώου στιβαρότητας σε επίπεδο διατομής. Αρχικά, αν αμεληθεί η επίδραση της τέμνουσας δύναμης, η αξονική παραμόρφωση της διατομής καθ' ύψος y σε μία τυχαία θέση x της δοκού, λόγω κάμψης, ορίζεται ως:

$$\varepsilon_x(x, y) = e - yk_z \quad (4.1)$$

Όπου e είναι η αξονική παραμόρφωση και k_z η καμπυλότητα της δοκού. Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί σε μητρική μορφή ως:

$$\varepsilon_x(x, y) = [1 \quad -y] \begin{bmatrix} e \\ k_z \end{bmatrix} = \mathbf{a}_s(y) \mathbf{d}_{sec}(x) \quad (4.2)$$

Όπου $\mathbf{d}_{sec}(x)$ το διάνυσμα των παραμορφώσεων της διατομής. Αντίστοιχα, μπορούν να οριστούν τα εντατικά μεγέθη της διατομής ως:

$$\mathbf{D}_{sec}(x) = \begin{bmatrix} N(x) \\ M_z(x) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Έχοντας ορίσει παραμορφώσεις και εντατικά μεγέθη, προκύπτει η διαμόρφωση του μητρώου στιβαρότητας της διατομής ως εξής, λαμβάνοντας υπόψη τον κανόνα της αλυσίδας:

$$\mathbf{k}_{sec} = \frac{\partial \mathbf{D}_{sec}}{\partial \mathbf{d}_{sec}} = \frac{\partial \mathbf{D}_{sec}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{d}_{sec}} = \int_A \mathbf{a}_s^T \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \mathbf{a}_s dA \quad (4.4)$$

Όπου σε προβλήματα δοκού το $\partial \sigma / \partial \varepsilon$ είναι η κλίση του διαγράμματος σ-ε σε μονοαξονικό νόμο. Στην (4.4), που έχει συμπεριλάβει την (4.2), με αρχή δυνατών έργων προκύπτει ότι ο λόγος $\partial \mathbf{D}_{sec} / \partial \sigma$ ισούται με \mathbf{a}_s^T . Η ολοκλήρωση συνεπάγεται ότι τα μεγέθη των τάσεων, παραμορφώσεων και της αντίστοιχης κλίσης δεν είναι σταθερά σε όλη τη διατομή. Έτσι, αφού έχει διακριτοποιηθεί η διατομή καθ' ύψος σε ένα πλήθος n_{fib} ινών, υπολογίζεται κάθε φορά η παραμόρφωση $\varepsilon_x(y_i)$ και ανανεώνεται η τάση $\sigma_x(y_i)$ και η κλίση που αντιστοιχεί στο διάγραμμα σ-ε, σύμφωνα με το νόμο του υλικού. Επειδή κάθε ίνα έχει τα χαρακτηριστικά της, όπως τη συντεταγμένη του κέντρου βάρους της και το εμβαδόν της, το μητρώο στιβαρότητας μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\mathbf{k}_{sec} = \int_A E(y) \mathbf{a}_s^T \mathbf{a}_s dA = \sum_{i=1}^{n_{fib}} E_i A_i \begin{bmatrix} 1 & -y_i \\ -y_i & y_i^2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Κατ' αναλογία, τα εντατικά μεγέθη της διατομής προκύπτουν, ουσιαστικά, από την ολοκλήρωση των τάσεων στη διατομή ως:

$$\mathbf{D}_{sec} = \int_A \mathbf{a}_s^T \sigma dA = \sum_{i=1}^{n_{fib}} \sigma_i A_i \begin{bmatrix} 1 \\ -y_i \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n_{fib}} a_{s,i}^T \sigma_i A_i \quad (4.6)$$

Τα παραπάνω αφορούσαν την περίπτωση δοκού με μονοαξονική κάμψη στην οποία ο άξονας x είναι ο διαμήκης της και ο y είναι ο καθ' ύψος της διατομής άξονας. Ο z προκύπτει δεξιόστροφα. Ανάλογος είναι ο σχηματισμός και στην περίπτωση της διαξονικής κάμψης. Για να ληφθεί υπόψη και η επιρροή της τέμνουσας δύναμης θα μπορούσαν να γίνουν ανάλογοι μετασχηματισμοί των παραπάνω μητρώων και διανυσμάτων. Ωστόσο, υφίσταται και μία υβριδική προσέγγιση του φαινομένου κατά την οποία διατηρούνται όλα όσα έχουν σχέση με την ορθή ένταση της διατομής και εισάγει σαν διατμητική συνιστώσα στο μοντέλο τη σχέση διατμητικής δύναμης και διατμητικής παραμόρφωσης. Αυτό υλοποιείται μέσα από τους μονοαξονικούς νόμους σ-ε των υλικών που χρησιμοποιούνται από τις ίνες της διατομής, ενώ η διάτμηση μέσα από διάγραμμα δύναμης-διατμητικής παραμόρφωσης (V-γ). Εδώ λαμβάνεται η κλίση του διαγράμματος V-γ. Έτσι, στην περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης το μητρώο στιβαρότητας της διατομής είναι:

$$\mathbf{k}_{sec} = \sum_{i=1}^{n_{fib}} \begin{bmatrix} E_i A_i & -y_i E_i A_i & 0 \\ -y_i E_i A_i & y_i^2 E_i A_i & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dV_y}{d\gamma_{xy}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Ιδιαίτερη προσοχή θέλει η επιλογή κατάλληλου διατμητικού νόμου υλικού για την προσθήκη του στην ανάλυση. Υπάρχουν μοντέλα με σταθερή στιβαρότητα ως προς τη διάτμηση ή μοντέλα με διγραμμική συμπεριφορά που περιλαμβάνουν απομείωση της διατμητικής αντοχής ή τριγραμμικά ή και πολλών κλάδων για πιστότερη αναπαράσταση συμπεριφοράς.

4.3.2 Στοιχεία μεθόδου δυνάμεων

Σε αυτά τα στοιχεία γίνεται μόνιμη ποσοτήτων στο βασικό σύστημα, ένα σύστημα που ακολουθεί την παραμόρφωση της δοκού. Σε αυτό ορίζονται τα εντατικά μεγέθη στα άκρα της δοκού. Οι δράσεις διατομής προκύπτουν με βάση αυτά τα εντατικά μεγέθη μέσα από τη σχέση:

$$\mathbf{D}_{sec} = \mathbf{b}_s(x)\mathbf{S} \quad (4.8)$$

Όπου \mathbf{b}_s το μητρώο παρεμβολής δυνάμεων και \mathbf{S} οι δράσεις στο βασικό σύστημα. Από την αρχή των δυνατών έργων ορίζονται οι μετακινήσεις του στοιχείου συναρτήσει των παραμορφώσεων της διατομής ως:

$$\mathbf{v} = \int_L \mathbf{b}_s^T(x) \mathbf{d}_{sec} dx \quad (4.9)$$

Στα πλαίσια ελέγχου ισορροπίας για την ανάλυση, εδώ δεν είναι εφικτή η ολοκλήρωση των δράσεων διατομής για τον υπολογισμό των εσωτερικών δράσεων, καθώς στη μόνιμη αυτών των στοιχείων πρέπει να ολοκληρωθεί η παραπάνω σχέση. Για την αντιμετώπιση αυτού, στα στοιχεία αυτά εισάγεται μία πρόσθετη επαναληπτική διαδικασία. Ορίζεται η στιβαρότητα του στοιχείου ως το αντίστροφο της ευκαμψίας του, δηλαδή:

$$\mathbf{K}_N = \mathbf{F}_N^{-1} \quad (4.10)$$

Όπου αυτή με τη σειρά της ορίζεται ως:

$$\mathbf{F}_N = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{d}_{sec}} \frac{\partial \mathbf{d}_{sec}}{\partial \mathbf{S}} = \int_L \mathbf{b}_s^T \mathbf{f}_{sec} \mathbf{b}_s dx \quad (4.11)$$

Όπου $\mathbf{f}_{sec} = \mathbf{k}_{sec}^{-1}$ η ευκαμψία της διατομής και \mathbf{k}_{sec} η στιβαρότητα της διατομής όπως ορίστηκε προηγουμένως. Έτσι, η ολική δυσκαμψία του στοιχείου προκύπτει με ολοκλήρωση των επιμέρους δυσκαμψιών των διατομών κατά μήκος του στοιχείου. Η (4.11) μπορεί να υπολογιστεί με αριθμητική ολοκλήρωση επιλέγοντας ένα συγκεκριμένο πλήθος διατομών εντός του στοιχείου. Κατά (Scott, 2011), η Gauss-Lobatto είναι η ενδεδειγμένη μέθοδος ολοκλήρωσης για την απόκριση αυτών των στοιχείων, αφού τοποθετεί σημεία ολοκλήρωσης στα άκρα του στοιχείου όπου εκεί οι ροπές είναι μεγαλύτερες, απουσία εσωτερικών φορτίων. Η σχέση ολοκλήρωσης εδώ είναι η:

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = w_1 f(-1) + w_n f(1) + \sum_{i=2}^{n_{GP}-1} w_i f(x_i) \quad (4.12)$$

Η ακρίβεια είναι της τάξης $2n_{GP}-3$, όπου n_{GP} το πλήθος των σημείων.

Από τη διαδικασία μόνιμης του στοιχείου αυτού απορρέουν κάποια πλεονεκτήματα, που είναι η αδρή διακριτοποίηση των φορέων μέχρι και ένα μέλος να προσομοιώνεται από ένα τέτοιο στοιχείο. Η ακρίβεια έγκειται στο πλήθος σημείων που επιλέγονται. Η επιτυγχανόμενη εν γένει ακρίβεια σύγκλισης, δεδομένου της διαρκούς τήρησης της ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών και εξωτερικών δράσεων του στοιχείου. Αυτά είναι και τα στοιχεία που επιλέγονται για την προσομοίωση του φορέα στην παρούσα εργασία. Στο OpenSees υπάρχουν τρεις εναλλακτικές εντολές δήλωσης του στοιχείου. Αυτή που επιλέγεται είναι η κάτωθι:

element nonlinearBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$numIntgrPts \$secTag \$stransfTag <-mass \$massDens> <-iter \$maxIters \$tol> <-integration \$intType>

Όπου \$eleTag είναι η ονομασία καθενός στοιχείου που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του φορέα, έξι στο σύνολο βάσει της διάταξης της δοκού στο σχήμα 4.1. Τα \$iNode και \$jNode είναι οι κόμβοι αρχής και πέρατος αντίστοιχα. Με το \$numIntgrPts δηλώνεται το πλήθος των διατομών ολοκλήρωσης κατά μήκος κάθε στοιχείου. Επιλέγονται 5 διατομές, οι οποίες είναι επαρκείς για επίτευξη μεγάλης ακρίβειας και ευστάθειας. Ενδεχομένως, αυξημένες διατομές να προκαλέσουν προβλήματα αστάθειας. Το πλήθος διατομών είναι ουσιαστικά τα σημεία ολοκλήρωσης Gauss που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (4.12). Τα 5 σημεία ολοκλήρωσης βρίσκονται στις θέσεις 0, ±0,655 και ±1 (δηλαδή στα άκρα του στοιχείου) και έχουν αντίστοιχα βάρη 0,711, 0,544 και 1. Το \$secTag είναι η ονομασία της διατομής η οποία ολοκληρώνεται κατά μήκος του στοιχείου. Το \$stransfTag, όπως θα εξηγηθεί σε λίγο, είναι ο γεωμετρικός μετασχηματισμός. Η επιλογή \$massDens, που εκφράζει την κατανεμημένη μάζα του στοιχείου που χρησιμοποιείται για τη μόρφωση μητρώου συγκεντρωμένων μαζών, παραλείπεται σε αυτή την ανάλυση. Τα \$maxIters και \$tol εκφράζουν το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων καθώς και την ανοχή απόκλισης που υφίστανται στην πρόσθετη επαναληπτική διαδικασία για τη μόρφωση του στοιχείου. Αφήνονται οι προκαθορισμένες τιμές 10 και 10^{-12} αντίστοιχα. Τέλος, το \$intType δηλώνει τον τύπο αριθμητικής ολοκλήρωσης. Επιλέγεται η προκαθορισμένη Gauss-Lobatto.

Ο γεωμετρικός μετασχηματισμός, που πρέπει να δηλωθεί στο στοιχείο δυνάμεων, εκφράζει το μετασχηματισμό του μητρώου στιβαρότητας και των δράσεων του στοιχείου από το βασικό σύστημα στο καθολικό. Υπάρχουν τρεις μετασχηματισμοί. Ο γραμμικός, που είναι και αυτός που χρησιμοποιείται, που μετασχηματίζει γραμμικά τις ποσότητες αυτές, ο PDelta που μετασχηματίζει γραμμικά τις ποσότητες αυτές λαμβάνοντας υπόψη τα δευτέρας τάξεως PDelta φαινόμενα και ο συστροφικός (corotational) που αξιοποιείται σε προβλήματα μεγάλων μετακινήσεων και μικρών παραμορφώσεων. Ο γεωμετρικός μετασχηματισμός σε διδιάστατο πρόβλημα δηλώνεται στο OpenSees ως:

geomTransf Linear \$stransfTag

Όπου, το \$stransfTag ορίστηκε πριν. Γενικά, η δοκός έχει προσανατολιστεί έτσι ώστε ο τοπικός άξονας x, που είναι ο διαμήκης του στοιχείου, να ταυτίζεται με τον καθολικό θετικό X. Αντίστοιχα, με δεξιόστροφο σύστημα ο τοπικός άξονας y (ο καθ' ύψος της διατομής) ταυτίζεται με τον καθολικό θετικό Y. Ο z τοπικός προκύπτει αυτόματα.

4.4 Υλικά διατομής

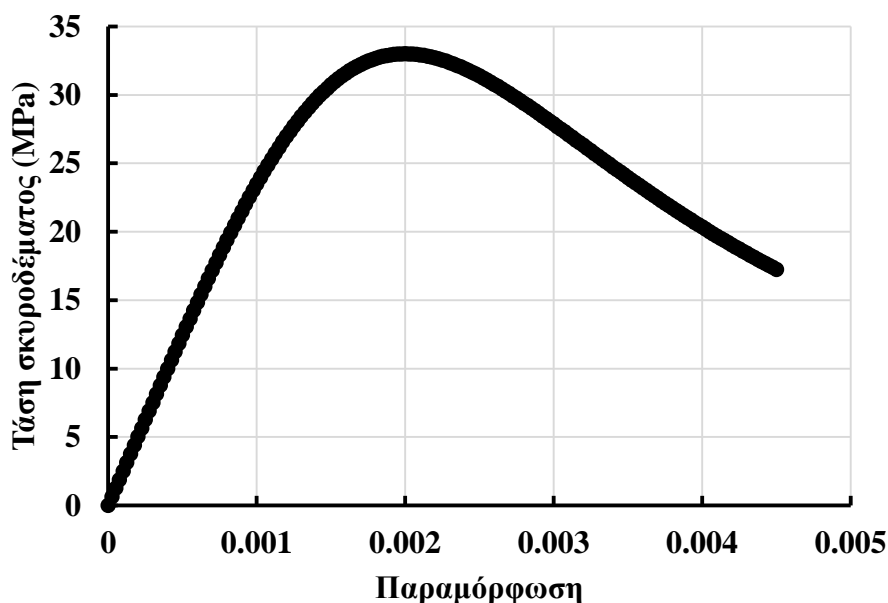
Εφόσον ορίστηκε και το στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε, απομένει ο ορισμός της διατομής η οποία τίθεται σαν όρισμα στο \$secTag του nonlinearBeamColumn στοιχείου. Αυτή θα προκύψει με το συνδυασμό της ανάλυσης της διατομής σε ίνες και την προσθήκη ενός διατμητικού νόμου. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, η ανάλυση σε επίπεδο ινών αδυνατεί να καλύψει τη διατμητική συμπεριφορά. Μάλιστα, η φύση του πειράματος που προσομοιώνεται είναι διατμητικής αστοχίας, οπότε απαιτείται να εισαχθεί αυτός ο συνδυασμός εντατικών μεγεθών.

4.4.1 Σκυρόδεμα

Σαν υλικό σκυροδέματος, οι ιδιότητες του οποίου υπεισέρχονται στα patches της διατομής ινών, επιλέγεται για τους ίδιους λόγους, όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο, το καταστατικό προσομοίωμα του Poronics. Πρόκειται για ένα μοντέλο με γραμμικώς απομειούμενη αντοχή στη θλίψη κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση. Έχει τη δυνατότητα να αποτυπώσει και εφελκυστική συμπεριφορά. Πρόκειται για το μοντέλο σκυροδέματος Concrete04 του OpenSees το οποίο προσδιορίζεται από την εντολή:

uniaxialMaterial Concrete04 \$matTag \$fc \$ec \$ecu \$Ec <\$fct \$et> <\$beta>

Όπου \$matTag είναι το όνομα του υλικού αυτού. Τα υποχρεωτικά ορίσματα είναι τα χαρακτηριστικά που ορίζουν τη μορφή της θλιπτικής καμπύλης του σκυροδέματος. Τα \$fc, \$ec, \$ecu και \$Ec εκφράζουν τη μέγιστη θλιπτική αντοχή (την αντοχή σκυροδέματος σε 28 μέρες), την παραμόρφωση στην οποία λαμβάνεται η μέγιστη αντοχή, τη μέγιστη παραμόρφωση στην οποία επέρχεται η σύνθλιψη του σκυροδέματος και το αρχικό μέτρο ελαστικότητας. Όπως και στην ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, έτσι και εδώ τίθενται τα ίδια χαρακτηριστικά, ήτοι στη μεταβλητή fc θα εισαχθεί η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος C25/30, -33MPa, οι παραμορφώσεις θα είναι ec και ecu -0,2% και -0,45% αντίστοιχα και Ec 31475,81 MPa, όπως προκύπτει από τη σχέση κατά EN 1992-1-1, που δείχτηκε στο κεφάλαιο 3. Οι θλιπτικές τιμές τίθενται με (-). Αξιοποιώντας την ίδια σχέση (3.20) μπορεί να μορφωθεί η καμπύλη θλίψης του σκυροδέματος, συναρτήσει της ολικής παραμόρφωσης τώρα, ως:



Σχήμα 4.4 Καμπύλη θλιπτικής συμπεριφοράς τάσης και παραμόρφωσης του σκυροδέματος

Ως προς την εφελκυστική συμπεριφορά του υλικού υπάρχουν τα ορίσματα, \$fct, \$et και \$beta. Στην πρώτη μεταβλητή, που εκφράζει τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή, εισάγεται η μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος C25/30, που όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ήταν 2,565 MPa κατά EN 1992-1-1 και στη δεύτερη, που εκφράζει την απόλυτη παραμόρφωση σε εφελκυσμό, θεωρήθηκε παραμόρφωση

$\epsilon_t = f_{ct}/E_c = 2,565/31475,81 = 8,15 \cdot 10^{-5}$. Εδώ λαμβάνεται γραμμική αύξηση αντοχής μέχρι και την ανάπτυξη της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής. Βάσει του μοντέλου αυτού, οι εφελκυστικές τάσεις ορίζονται από τη σχέση:

$$\sigma_i = f_t \beta^{\frac{\epsilon_i - f_t/E_c}{\epsilon_t - f_t/E_c}} \quad (4.13)$$

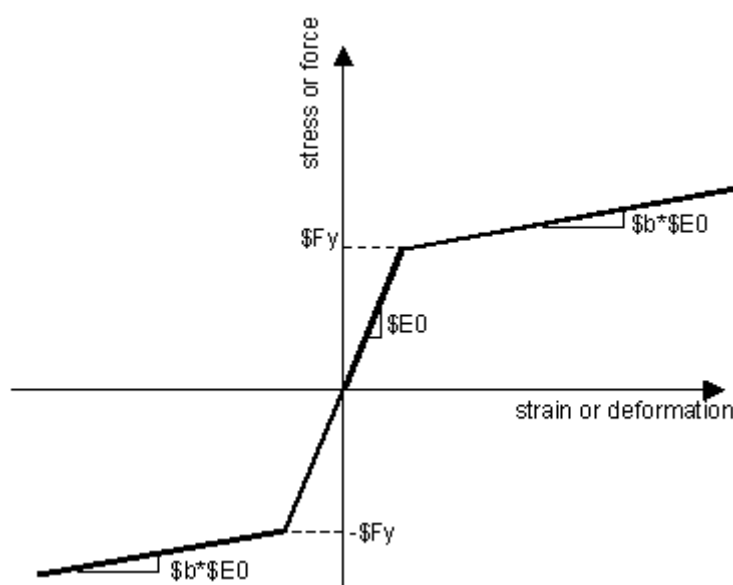
Από αυτή τη σχέση ορίζεται ο φθίνων κλάδος της εφελκυστικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Το β στη σχέση αυτή είναι η παράμετρος β , που προσδιορίζει το κάτω όριο της αντοχής μόλις αναπτυχθεί η μέγιστη παραμόρφωση. Καθορίζει ουσιαστικά τη μορφή εκθετικής μείωσης της αντοχής. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 0,1. Ωστόσο, έτσι όπως ορίστηκε η παραμόρφωση δε μετέχει αυτή η παράμετρος και πιο συγκεκριμένα, αμελείται ο καθοδικός κλάδος. Είναι μια εύλογη παραδοχή μιας και η εφελκυστική συνεισφορά είναι μικρή. Απλά υιοθετείται μόνο ο γραμμικός κλάδος μέχρι τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή.

4.4.2 Χάλυβας οπλισμού

Για την προσομοίωση του χάλυβα των οπλισμών της δοκού θα χρησιμοποιηθεί το μονοαξονικό διγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων. Στο OpenSees πρόκειται για το υλικό Steel01 και ορίζεται από την παρακάτω εντολή:

uniaxialMaterial Steel01 \$matTag \$Fy \$E0 \$b <\$a1 \$a2 \$a3 \$a4>

Όπου το \$matTag είναι η ονομασία αυτού του υλικού τώρα. Όπως εύκολα διακρίνεται απαιτεί μόνο τρεις υποχρεωτικές καταχωρήσεις, τις \$Fy, \$E0 και \$b που εκφράζουν την τάση διαρροής σε εφελκυσμό, το μέτρο ελαστικότητας του αρχικού κλάδου και την κράτυνση της μετελαστικής συμπεριφοράς, αντίστοιχα. Εισάγονται στις μεταβλητές αυτές αντίστοιχα τα μεγέθη 500 MPa, 200000 MPa και 0,001, δηλώνοντας μία μικρή κράτυνση-οιονεί σταθερή. Τέλος, οι μεταβλητές a1, a2, a3 και a4 αποτελούν παραμέτρους ισοτροπικής κράτυνσης που προσδιορίζουν το σχήμα και το μέγεθος του βρόγχου του υλικού σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Παραλείπονται εδώ.



Σχήμα 4.5 Διγραμμικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του χάλυβα οπλισμού στο OpenSees

4.4.3 Διατμητικά υλικά

Εφόσον μορφώθηκαν τα δύο υλικά που ορίζουν τη διατομή σε επίπεδο ινών, απαιτείται τώρα ο προσδιορισμός ενός τρίτου υλικού, που να εμπεριέχει τη διάτμηση που χαρακτηρίζει το πείραμα. Αρχικά, σε οποιοδήποτε υλικό πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη αντοχή της δοκού σε διάτμηση. Δηλαδή, να βρεθεί η δύναμη V των διαγραμμάτων που αξιοποιούνται για τη διατμητική συνιστώσα του μοντέλου.

Στην πλέον γενική περίπτωση, σε μία δοκό οπλισμένου σκυροδέματος η τέμνουσα μπορεί να θεωρηθεί ότι αναλαμβάνεται και μεταφέρεται από δύο μηχανισμούς. Ο ένας είναι ο εγκάρσιος συνδετήριος οπλισμός και ο άλλος είναι η συνεισφορά του ίδιου του σκυροδέματος μέσα από άλλους μηχανισμούς, όπως η κατακόρυφη συνιστώσα της κεκλιμένης θλιπτικής δύναμης της αρηγιάτωτης θλιβόμενης ζώνης, η αλληλεμπλοκή των αδρανών του σκυροδέματος κατά μήκος της ρωγμής και η δράση βλήτρου του διαμήκους οπλισμού που διαπερνά τις διατμητικές ρωγμές. Αριθμητικά η συνολική τέμνουσα από τη συνεισφορά οπλισμού και σκυροδέματος αποτυπώνεται από τη σχέση:

$$V_{sh} = V_c + V_s \quad (4.14)$$

Όπου V_c και V_s οι όροι του σκυροδέματος και του οπλισμού. Κατά EN 1992-1-1 (European Committee, EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings, 2004) μπορεί να υπολογιστούν οι παραπάνω επιμέρους σχέσεις ως:

$$V_c = \left[C_c k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \sigma_{cp} \right] b_w d_{eq} \quad (4.15)$$

Επειδή πρόκειται για αποτίμηση της πραγματικής συμπεριφοράς της δοκού και όχι για υπολογισμό μεγεθών βάσει σχεδιασμού, δύναται να γίνουν κάποιες εύλογες παραδοχές ή να μη ληφθούν υπόψη συντελεστές απομείωσης και ασφαλείας. Οπότε στην παραπάνω σχέση είναι:

$C_c = 0,18/\gamma_c$, όπου γ_c επιμέρους συντελεστής ασφαλείας του σκυροδέματος που δε λαμβάνεται υπόψη

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{eq}}}$, όπου d_{eq} το ισοδύναμο στατικό ύψος (σε mm) του εφελκόμενου οπλισμού. Βάσει της παραδοχής δε λαμβάνεται ο έλεγχος το $k \leq 2$.

$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b d_{eq}}$ το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού με A_{sl} το εμβαδόν των τεσσάρων ράβδων του διαμήκους οπλισμού διαμέτρου 25mm και b το πλάτος του κορμού της διατομής της πλακοδοκού. Πάλι λόγω της παραπάνω παραδοχής δε λαμβάνεται ο έλεγχος $\rho_l \leq 0,02$.

Αντί του f_{ck} τίθεται η ποσότητα f_{cm} ίση με 33 MPa.

$\sigma_{cp} = N_{ED}/A_c$, όπου N_{ED} η αξονική δύναμη της δοκού και A_c το εμβαδόν της διατομής της. Ωστόσο, απουσία αξονικής δύναμης, όπως είναι στο παρόν πείραμα, δεν υφίσταται αυτός ο όρος.

b_w το ελάχιστο πλάτος (σε mm) του στοιχείου μεταξύ εφελκόμενου οπλισμού και του θλιβόμενου πέλματος. Λαμβάνεται το πλάτος του κορμού της πλακοδοκού.

Λόγω της παραδοχής, ξανά, στον όρο της εξίσωσης (4.15) δεν γίνεται ο έλεγχος $V_c \geq (v_{min} + 0,15\sigma_{cp})b_w d_{eq}$, όπου $v_{min} = 0,035k^{\frac{3}{2}}f_{ck}^{\frac{1}{2}}$.

Αντίστοιχα, η συμβολή του εγκάρσιου διατμητικού οπλισμού προκύπτει από τη σχέση:

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{yw} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (4.16)$$

Όπου στην παραπάνω σχέση είναι:

A_{sw} το συνολικό εμβαδόν των σκελών (2) των συνδετήρων διαμέτρου 8mm

s_w η απόσταση των συνδετήρων, ανά 275 mm στο αραιό άνοιγμα και ανά 100 mm στο πυκνό

$$z = 0,9d_{eq}$$

f_{yw} το όριο διαρροής του οπλισμού διάτμησης, ίσο με 500 MPa

θ η γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού. Για ακρίβεια ανάλυσης του πειράματος μπορεί να ληφθεί η γωνία των 32° , όπως μετρήθηκε η γωνία της ρωγμής στην αστοχία της N00 περίπτωσης.

α η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτμησης με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού. Εδώ είναι 90° .

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει ότι η συνολική τέμνουσα στο αραιό άνοιγμα του διατμητικού οπλισμού είναι:

$$V_{sh} = 67,75 + 77,66 = 145,41 \text{ kN}$$

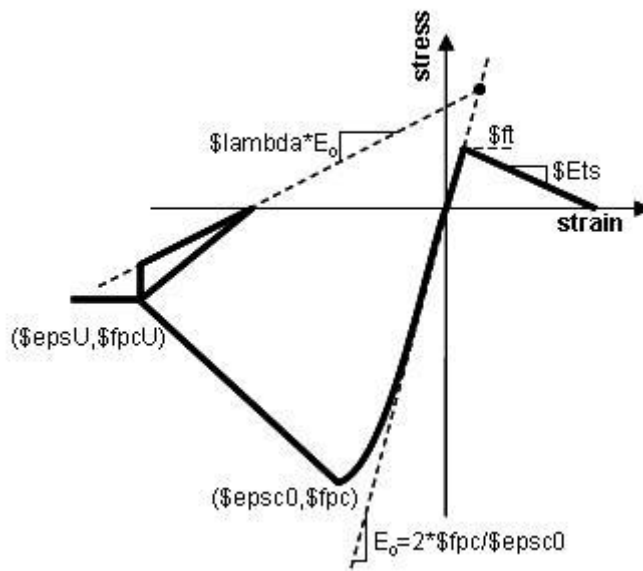
Παρατηρείται ότι η συμβολή του σκυροδέματος είναι αρκετά μεγάλη, ίση με 67,75 kN. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού. Αντίστοιχα, λόγω της μεγάλης απόστασης των συνδετήρων στο αραιό άνοιγμα η συνεισφορά του οπλισμού είναι σχετικά μικρή.

Εφόσον προσδιορίστηκε το όρισμα της μέγιστης διατμητικής δύναμης V_{sh} , επόμενο βήμα είναι η επιλογή κατάλληλου υλικού που να προσομοιώνει τη διατμητική συμπεριφορά της δοκού. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται να διερευνηθούν δύο υλικά που υφίστανται στη βιβλιοθήκη του OpenSees, αυτού του Concrete02 και του Hysteretic.

Στο πρώτο υλικό, το Concrete02, γίνεται πάλι μια υβριδική προσέγγιση του φαινομένου, καθώς στο μονοαξονικό διάγραμμα σ - ϵ οι ποσότητες των τάσεων και των παραμορφώσεων αντικαθίστανται από δυνάμεις και γενικευμένες μετατοπίσεις. Πρόκειται για ένα μοντέλο που στην περίπτωση του σκυροδέματος, πάλι, εμπεριέχει γραμμικώς απομειούμενη αντοχή στη θλίψη κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση. Το τέμνον μέτρο κατά την ανάπτυξη της μέγιστης θλιπτικής αντοχής έχει το μισό μέτρο του αρχικού μέτρου ελαστικότητάς του. Ύστερα από την ανάπτυξη της μέγιστης τάσης μειώνεται γραμμικά μέχρι μία παραμένουσα αντοχή. Η εφελκυστική συμπεριφορά από

την άλλη, αποτυπώνεται από κλάδο γραμμικής μορφής ίδιας κλίσης με αυτήν της αρχικής κατά τη θλίψη. Αφού αναπτυχθεί και η πλήρης αντοχή σε εφελκυσμό, υφίσταται μία απομείωση γραμμικής μορφής πάλι. Η εντολή στο OpenSees, που περιγράφει τη συμπεριφορά που μόλις αναπτύχθηκε προηγουμένως, είναι η κάτωθι:

uniaxialMaterial Concrete02 \$matTag \$fpc \$epsc0 \$fpcu \$epsU \$lambda \$ft \$Ets



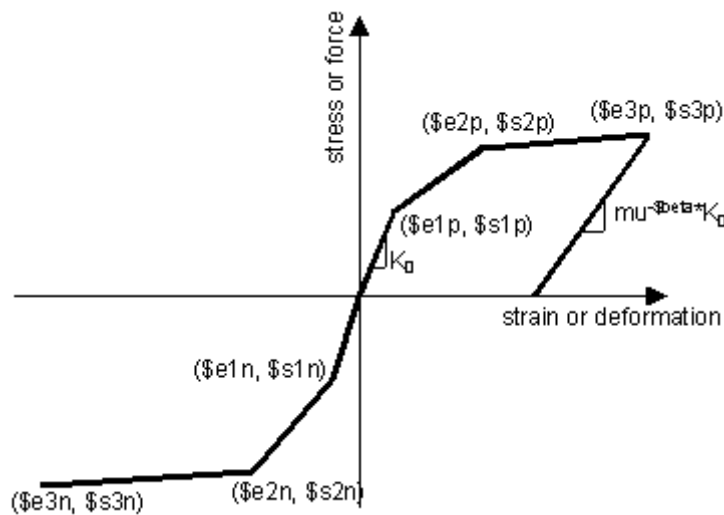
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του υλικού Concrete02 του OpenSees

Όπου, \$matTag η ονομασία του υλικού. Στη θέση \$fpc, που εκφράζει τη μέγιστη θλιπτική αντοχή, τίθεται η τιμή της αντοχής σε τέμνουσα της δοκού, όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Δηλαδή τίθεται $-V_{sh} = -145410 \text{ N}$. Με (-) όσες τιμές αφορούν τη θλίψη. Η κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει την τελική καμπύλη είναι η οιονεί παραμόρφωση \$epsc0, εκεί που αναπτύσσεται δηλαδή η μέγιστη τάση ή ισοδύναμα η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη διατμητική αντοχή της δοκού. Επειδή εκ των προτέρων δεν ήταν κάποια γνωστή τιμή, αυτή προσδιορίστηκε ύστερα από δοκιμές. Ωστόσο, η φιλοσοφία που υιοθετήθηκε ήταν ο προσδιορισμός μίας απομειωμένης τιμής ενός τέμνοντος μέτρου GA που καθορίζει τη μη γραμμική απόκριση σε ένα τυπικό διάγραμμα τέμνουσας και διατμητικής παραμόρφωσης. Τίθεται η τιμή $epsc0 = -4,93 \cdot 10^{-3}$, που αντιστοιχεί στο λόγο $-V_{sh} / (k_{sec} G A_{sh})$, όπου $G = \frac{E}{2(v+1)} = 13114,92 \text{ MPa}$ το μέτρο διάτμησης σκυροδέματος που αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας $E = 31475,81 \text{ MPa}$ και λόγο poisson $\nu = 0,2$. Ως διατμητικό εμβαδόν μπορεί να θεωρηθεί ο πλήρης κορμός της διατομής, ήτοι $A_{sh} = 125 \cdot 360 = 45000 \text{ mm}^2$. Ως k_{sec} εισήχθη η τιμή του 5%, που αντιστοιχεί σε ένα απομειωμένο τέμνον μέτρο. Αν ετίθετο σαν τιμή η θεωρητική διατμητική σταθερά ορθογωνικής διατομής των $6/7 = 0,857$ κατά (Stephen, 1980) από τη σχέση $k = \frac{5(v+1)}{6+5\nu}$, θα προέκυπτε μικρότερη παραμόρφωση αστοχίας, αφού αυτή θα προέκυπτε από το αρχικό ελαστικό μέτρο. Οι υπόλοιπες τιμές επελέγησαν με τέτοιον τρόπο ώστε όλο το μοντέλο να βαθμονομηθεί κατάλληλα για να προσεγγίσει το πραγματικό πείραμα. Έτσι, στα ορίσματα \$fpcu και \$epsU ετέθησαν το 20% του $-V_{sh} = -29082 \text{ N}$ και μία εύλογη τιμή παραμόρφωσης ίση με $-0,02$, αντίστοιχα. Το \$lambda είχε σαν τιμή το 0,1 και αφορά ανακυκλιζόμενη φόρτιση για

μετάβαση από θλίψη σε εφελκυσμό με κάποιο ποσοστό του αρχικού ελαστικού μέτρου. Στις μεταβλητές που ορίζουν την εφελκυστική συμπεριφορά του διαγράμματος επελέγησαν οι τιμές $V_{sh} = 145410 \text{ N}$ για το f_t και μία βαθμονομημένη τιμή του 1% του αρχικού μέτρου ελαστικότητας $E_0 (= 2 \text{ fpc} / \text{Sepsc}0)$ ίση με $590171,37 \text{ N}$ στο E_{ts} .

Στο δεύτερο υλικό, το Hysteretic, επιχειρείται μία όμοια διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου, ώστε η συνολική απόκριση του αριθμητικού προσομοιώματος να προσεγγίζει αυτή του πειράματος. Σε αυτό το υλικό μπορούν να εισαχθούν περισσότεροι του ενός κλάδου για την προσομοίωση της απόκρισης του μοντέλου, τόσο για εφελκυσμό όσο και για θλίψη. Επίσης, περιλαμβάνει και απομείωση των ιδιοτήτων λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης και λόγω εμφάνισης βλαβών, εξαιτίας της πλαστιμότητας και της απορρόφησης ενέργειας, κατά την επιβολή φορτίου. Στο OpenSees η προσομοίωση του υστερητικού υλικού υλοποιείται από την εξής εντολή:

uniaxialMaterial Hysteretic \$matTag \$s1p \$e1p \$s2p \$e2p <\$s3p \$e3p> \$s1n \$e1n \$s2n \$e2n <\$s3n \$e3n> \$pinchX \$pinchY \$damage1 \$damage2 <\$beta>



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του υλικού Hysteretic του OpenSees

Όπου με $matTag$ δηλώνεται η ονομασία του υλικού αυτού. Οι μεταβλητές $s1p$, $e1p$, $s2p$, $e2p$, $s3p$ και $e3p$ δηλώνουν τα τρία σημεία δυνάμεων και διατμητικών παραμορφώσεων του διαγράμματος που μπορούν να περιγράψουν την εφελκυστική απόκριση του μοντέλου, ενώ οι $s1n$, $e1n$, $s2n$, $e2n$, $s3n$ και $e3n$ είναι τα αντίστοιχα σημεία που ορίζουν τη θλιπτική απόκριση του μοντέλου. Στο πρώτο σημείο θα μπορούσε να γίνει η εύλογη παραδοχή ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται διατμητικώς ελαστικά, μέχρι την ανάπτυξη του 60% του μέγιστου φορτίου αστοχίας με αντίστοιχη κλίση τη θεωρητική $6/7GA_{sh}$. Αυτό αντιστοιχεί σε δύναμη $s1p = 0,6 \cdot 141410 = 87246 \text{ N}$ και παραμόρφωση $e1p = \frac{s1p}{\frac{6}{7GA_{sh}}} = 1,73 \cdot 10^{-4}$, διατηρώντας το ίδιο μέτρο

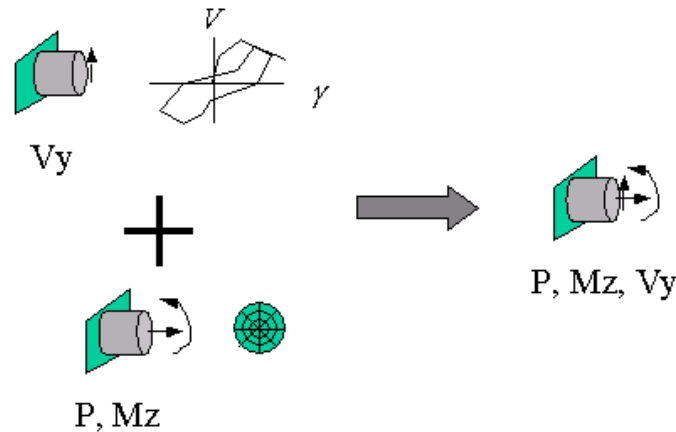
διάτμησης και διατμητικό εμβαδόν κορμού. Για το δεύτερο σημείο στο οποίο αντιστοιχεί η μέγιστη διατμητική αντοχή μπορούν να τεθούν $s2p = V_{sh} = 145410 \text{ N}$ σε αντίστοιχη παραμόρφωση με ένα απομειωμένο μέτρο της τάξης του $k_{sec} = 1/15 = 6,67\%$ (όμοιο με αυτό του 5% της προηγούμενης περίπτωσης) ίση με $e2p =$

$\frac{s2p}{\frac{1}{15} \cdot \frac{6}{7} G A_{sh}} = 4,31 \cdot 10^{-3}$. Τέλος, το τρίτο σημείο, που αποτελεί πρακτικά μία μοντελική προσέγγιση της απομειωμένης συμπεριφοράς, μπορεί να θεωρηθεί αυτό στο οποίο έχει απομειωθεί η αντοχή στο 20% της μέγιστης τιμής της. Έτσι, ορίζονται οι συντεταγμένες ως $s3p = 0,4 \cdot 145410 = 58164 N$ με αντίστοιχη παραμόρφωση από ένα ακόμη πιο μειωμένο μέτρο της τάξης του 1% λαμβάνοντας τη μέγιστη αντοχή, ήτοι $\varepsilon3p = \frac{s2p}{\frac{1}{100} \cdot \frac{6}{7} G A_{sh}} = 2,88 \cdot 10^{-2}$. Στα υπόλοιπα τρία σημεία της θλίψης, τίθενται οι ίδιες ακριβώς τιμές, αλλά με (-). Γενικά και στα δύο υλικά είναι επιθυμητό να υπάρχει συμμετρία και στις δύο αποκρίσεις, δηλαδή να τεθούν οι ίδιες τιμές τόσο σε εφελκυσμό όσο σε θλίψη, διότι αφενός προγραμματιστικά δεν είναι γνωστό το ποια περίπτωση λαμβάνει το OpenSees και αφετέρου πρέπει να υπάρχει ομοειδής συμπεριφορά σε κάποια ενδεχόμενη ανακυκλιζόμενη φόρτιση, που εδώ δεν εξετάζεται. Τέλος οι μεταβλητές `pinchX`, `pinchY`, `damage1`, `damage2` και `beta` έχουν σαν όρισμα όλες το 0, διότι αυτές εκφράζουν το σχήμα του υστερητικού βρόγχου βάσει εμφάνισης βλαβών από την απορρόφηση ενέργειας, την πλαστιμότητα και την απομείωση της αντοχής εξαιτίας ανακυκλιζόμενης φόρτισης που δεν αφορά την παρούσα προσομοίωση.

Εφόσον ορίστηκαν τα υλικά, που υπαγορεύουν την καμπτική και διατμητική συμπεριφορά του προσομοιώματος, ο συνδυασμός των δύο αυτών διαφορετικών αποκρίσεων, σε επίπεδο διατομής στο OpenSees, επιτυγχάνεται μέσα από την εντολή:

section Aggregator \$secTag \$matTag1 \$dof1 \$matTag2 \$dof2 <-section \$sectionTag>

section Aggregator \$secTag \$matTag1 \$dof1 \$matTag2 \$dof2 <-section \$sectionTag>



Σχήμα 4.8 Συνδυασμός αποκρίσεων σε διαφορετική διεύθυνση μέσα από την εντολή του `section Aggregator`

Όπου το `$secTag` είναι η ονομασία της τελικής διατομής που εμπεριέχει τα συνδυασμένα μεγέθη. Στο `$matTag1` τίθεται η ονομασία του διατμητικού υλικού, δηλαδή αυτή του `Concrete02` ή του `Hysteretic` και στο `$dof1` η διεύθυνση της ενδιαφερόμενης απόκρισης που πρόκειται να συνδυαστεί. Εδώ είναι η `Vy` που αφορά την τέμνουσα, παράλληλα με τον κορμό της διατομής του φορέα ή αντίστοιχα παράλληλα με τον τοπικό άξονα `y`. Στο `$sectionTag` τίθεται η ονομασία της διατομής ινών.

Το \$secTag είναι αυτό που τίθεται μετά σαν όρισμα διατομής των στοιχείων. Έτσι, για την πιστή αναπαράσταση του μοντέλου, στα δύο στοιχεία που υπάρχει ο αραιός συνδετήριος οπλισμός τίθεται η διατομή αυτή με όρισμα όλες τις παραπάνω ποσότητες που υπολογίστηκαν. Στα υπόλοιπα στοιχεία, που μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχουν οι πυκνοί συνδετήρες, ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία με τη διαφορά ότι η τέμνουσα αντοχής της σχέσης (4.14) υπολογίζεται για συνεισφορά οπλισμού σε απόσταση $s=100$ mm και όχι ανά 275 mm όπως είναι στην αραιή περιοχή.

Να σημειωθεί πως η προσομοίωση του σκυροδέματος στις ίνες της διατομής πραγματοποιήθηκε με νόμο απερίσφιχτου σκυροδέματος. Η περίσφιγξη δεν αφορά αυτή τη δοκό λόγω απουσίας αξονικής έντασης.

4.5 Φόρτιση και λοιπές παράμετροι επίλυσης

Εκτός της στατικής ανάλυσης pushover στο μοντέλο θα περιληφθούν εδώ και τα φορτία της βαρύτητας. Επελέγη να προσομοιωθούν με σημειακή μορφή και όχι κατανεμημένα. Το μέτρο τους προκύπτει από το ίδιο βάρος του σκυροδέματος επί τη διατομή του φορέα επί ένα συνολικό πλάτος επιρροής, που προκύπτει ως το άθροισμα των εκατέρωθεν των εκάστοτε κόμβων ημιμηκών των στοιχείων που ανήκουν. Η εντολή εισαγωγής φορτίων στο OpenSees είναι:

```
pattern Plain $patternTag $stsTag <-fact $cFactor> {  
load...  
eleLoad...  
sp...  
}
```

Το Pattern Plain αφορά τη δημιουργία μιας ομάδας φόρτισης αποτελούμενης από επικόμβια φορτία (load), κατανεμημένα φορτία (eleLoad) ή σημειακούς περιορισμούς (sp). Το \$patternTag άπτεται της ονομασίας της φορτικής αυτής ομάδας. Αυτές οι φορτίσεις συσχετίζονται με το χρόνο και ο τρόπος επιβολής τους καθορίζεται από το \$stsTag που επιλέγεται Linear, δηλαδή γραμμική επιβολή. Αφήνεται ο προκαθορισμένος συντελεστής πολλαπλασιασμού του φορτίου ίσος με 1 στο \$cFactor. Το **load** που επιλέγεται συντάσσεται ως:

load \$nodeTag (ndf \$LoadValues)

Όπου \$nodeTag είναι ο κόμβος στον οποίο θα επιβληθεί κάποιο επικόμβιο φορτίο και στο ndf \$LoadValues ορίζεται το μέτρο του φορτίου και σε ποια διεύθυνση στον κόμβο.

Με την εντολή **recorder recorderType? arg1? ...** γίνεται η καταγραφή των αποτελεσμάτων ανάλυσης. Σαν κόμβος ελέγχου επιλέγεται ο κόμβος επιβολής του φορτίου της στατικής pushover. Σαν αποτέλεσμα εξάγεται η κατακόρυφη μετατόπιση του κόμβου αυτού.

Ως προς την στατική ανάλυση pushover διατηρήθηκαν οι παράμετροι επίλυσης του επιλυτή του κώδικα. Συγκεκριμένα:

Με την εντολή **constraints constraintType? arg1? ...** όπου τίθεται η επιλογή **Plain**, καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες στην ανάλυση. Αφορά την επιβολή ομογενών δεσμεύσεων σε μοναδικά σημεία (fix).

Μέσω της εντολής **numberer numbererType? arg1? ...** όπου πάλι εισάγεται **Plain**, προσδιορίζεται η αρίθμηση των εξισώσεων και η αντιστοίχιση στους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος. Εδώ χρησιμοποιείται η αρίθμηση που παρέχεται από το χρήστη.

Από την εντολή **system systemType? arg1? ...** καθορίζεται ο τρόπος διαχείρισης, αποθήκευσης και επίλυσης του συστήματος εξισώσεων της ανάλυσης. Επιλέγεται το **BandGeneral** και αφορά την αναδιάταξη και αποθήκευση των στοιχείων ζωνικών ασύμμετρων μητρώων, δηλαδή μητρώων με μη-μηδενικά στοιχεία σε ένα εύρος της διαγωνίου.

Η εντολή **test testType? arg1? ...** χρησιμοποιείται για την επιβολή ενός κριτηρίου σύγκλισης, βάσει του οποίου γίνεται έλεγχος σύγκλισης κάθε βήματος. Έχει επιλεγθεί το ενεργειακό κριτήριο, που τσεκάρει το εσωτερικό γινόμενο των φορτίων και προσαυξητικών μετατοπίσεων και ορίζεται μέσω της εντολής:

test EnergyIncr \$tol \$iter <\$pFlag>

Όπου το \$tol εκφράζει την ανοχή του ελέγχου σύγκλισης. Τίθεται ένα αυστηρό μέτρο, για επίτευξη ακρίβειας, μεγέθους 10^{-8} . Το \$iter άπτεται του μέγιστου πλήθους επαναλήψεων εκτέλεσης πριν την εκτύπωση αποτυχίας σύγκλισης. Το προαιρετικό \$pFlag έχει την τιμή 0 που σημαίνει δεν εκτυπώνονται πληροφορίες σχετικά με τη σύγκλιση.

Με την εντολή **algorithm algorithmType? arg1? ...** καθορίζονται τα βήματα του αλγορίθμου επίλυσης των μη γραμμικών εξισώσεων. Επιλέγεται η μέθοδος **Newton** που άπτεται της μεθόδου Newton-Raphson με ανανέωση του εφαπτομενικού μητρώου σε κάθε επανάληψη.

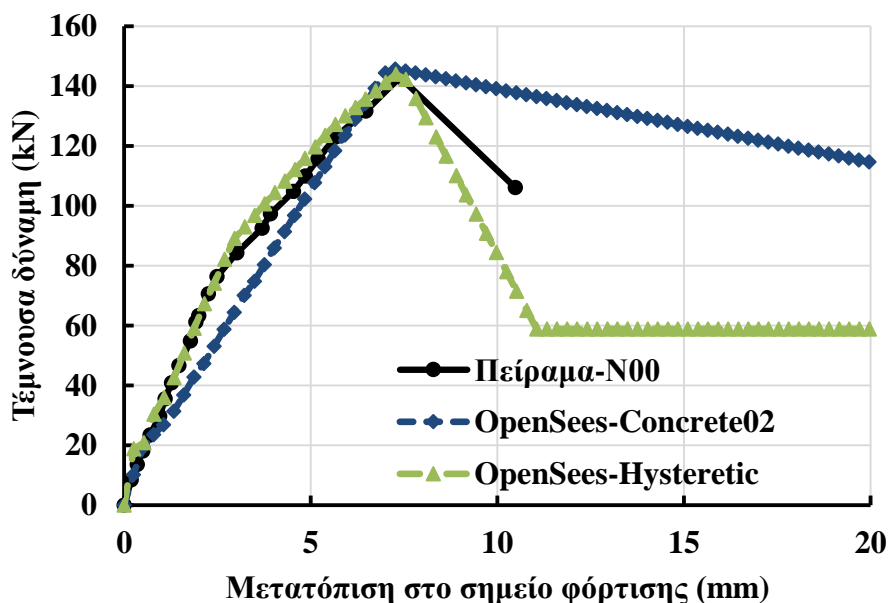
Από την εντολή **integrator DisplacementControl \$node \$dof \$incr** (χωρίς κάποια προαιρετικά ορίσματα που δε λαμβάνονται υπόψη), καθορίζεται το χρονικό βήμα στο πέρας του οποίου μία προσαύξηση μετατόπισης ενός συγκεκριμένου βαθμού ελευθερίας λαμβάνει μία συγκεκριμένη τιμή. Το \$node είναι ο κόμβος ελέγχου της απόκρισης. Ορίζεται αυτός στον οποίο επιβάλλεται η φόρτιση. Το \$dof είναι ο βαθμός ελευθερίας του εξεταζόμενου κόμβου, που είναι η κατακόρυφη μετατόπιση. Το \$incr είναι η προσαυξητική μετατόπιση. Ορίστηκε 0,27 mm που ισούται με το 10^{-4} του συνολικού μήκους της δοκού.

Μέσω της εντολής **analyze \$numIncr** προσδιορίζονται τα συνολικά βήματα της ανάλυσης. Επιλέχθηκαν 100 βήματα στο \$numIncr.

Τέλος, με την εντολή **analysis Static** ορίζεται το είδος της ανάλυσης. Επιλέγεται η στατική ανάλυση pushover, στην οποία επιλύεται το πρόβλημα $KU=R$, χωρίς τα μητρώα μαζών ή και αποσβέσεων.

4.6 Αποτελέσματα

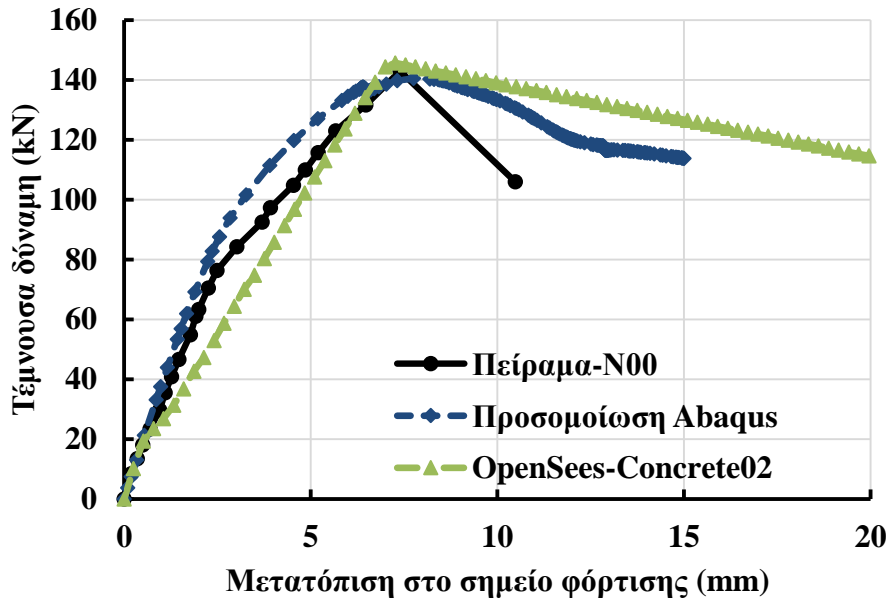
Στο σχήμα (4.9) που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης του OpenSees για τα δύο διατμητικά υλικά που εξετάστηκαν, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη πραγματική καμπύλη του πειράματος της N00 περίπτωσης. Ως προς τις αντοχές παρατηρείται, ότι το προσομοίωμα του OpenSees με διατμητικό υλικό το Concrete02 ανέπτυξε μέγιστη διατμητική αντοχή ίση με 145,70 kN, ενώ το προσομοίωμα με υλικό το Hysteretic σημείωσε διατμητική αντοχή 143,93 kN. Αυτές αποκλίνουν από την πραγματική αντοχή των 143 kN του πειράματος κατά 1,89% και 0,65% αντίστοιχα. Οι μετατοπίσεις στις οποίες παρουσιάστηκαν οι μέγιστες αυτές αντοχές ήταν για το Concrete02 7,26 mm και για το Hysteretic 7,28 mm. Οι αποκλίσεις αυτών των μεγεθών των δύο υλικών, ως προς την πραγματική μετατόπιση των 7,39 mm, είναι 1,76% και 1,49% αντίστοιχα. Ως προς τις κλίσεις, μέχρι τα 20-22 kN που μέχρι εκεί είναι η αρχική κλίση, πριν την ανάπτυξη μικρορωγμών, τα δύο υλικά ταυτίζονται με το πείραμα. Από εκεί και μέχρι τα 80-83 kN που γίνεται το πρώτο σπάσιμο της καμπύλης, λόγω μικρορηγματώσεων, μόνο το Hysteretic ακολουθεί επακριβώς την καμπύλη του πειράματος. Από εκεί και μέχρι την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής, πάλι το υστερητικό υλικό ακολουθεί την καμπύλη του πειράματος. Το Concrete02 εν γένει σημειώνει μία συνολική απόκριση μικρότερης κλίσης, η οποία στην ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής ταυτίζεται και αυτή με το πείραμα. Τέλος, ως προς τους κλάδους μετά τη μέγιστη αντοχή, το Concrete02 είναι λίγο πιο πλαστικό από το πείραμα, ενώ το Hysteretic πιο ψαθυρό. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια 2 και 3, η διατμητική αστοχία είναι ψαθυρής μορφής και δεν ενδιαφέρει η ακριβής απόκριση της κατασκευής μετά την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής.



Σχήμα 4.9 Καμπύλες τένουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, πειράματος και αριθμητικής προσομοίωσης με το OpenSees για τα δύο διατμητικά υλικά

Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι και τα δύο υλικά έχουν προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια την καμπύλη του πειράματος, καθώς οι αποκλίσεις της μέγιστης αντοχής και της μετατόπισης είναι αμελητέες. Εύλογα εξάγεται το γεγονός ότι το Hysteretic υλικό ταυτίζεται πρακτικά με την καμπύλη του πειράματος, αφού συμπίπτει σε κάθε κλάδο με αυτή. Ως εκ τούτου, παρουσιάζει καλύτερη απόκριση από αυτή του Concrete02. Αυτό παρουσιάζει μία πιο αδρή προσέγγιση του πραγματικού φαινομένου και αμελεί τις σταδιακές απομειώσεις της κλίσης λόγω ανάπτυξης ρωγμών. Ωστόσο, η ακριβής ταύτιση του Hysteretic απορρέει από τη μορφή του υλικού αυτού, που προκύπτει μέσα από τη δήλωση τριών σημείων ή αντίστοιχα τριών παραμέτρων. Έτσι, δημιουργείται μία καμπύλη πολυκλαδική. Όμως, η βαθμονόμηση αυτού του μοντέλου απαιτεί πολλές δοκιμές και συνδυασμούς παραδοχών για την εύρεση των κατάλληλων τιμών των φορτίων και των αντίστοιχων απομειωμένων τεμνόντων διατμητικών μέτρων, ώστε να οριστούν αυτές οι παράμετροι. Μάλιστα, έχοντας σαν υλικό αναφοράς το Concrete02 διαμορφώθηκε και αυτό το υλικό. Έτσι, για λόγους απλότητας, καθώς εμπεριέχει λιγότερες παραμέτρους, επιλέγεται το Concrete02 ως πιο εύχρηστο υλικό. Άλλωστε σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος σε καθολικό βαθμό ή μακροσκοπική κλίμακα. Το Concrete02 πληροί σε μεγάλη ακρίβεια τις απαιτήσεις προσομοίωσης και κατόρθωσε να το προσεγγίσει, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, το πείραμα αναφοράς. Το Hysteretic διερευνήθηκε καθαρά για να αποδειχτεί ότι ένα μη γραμμικό πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί με τεράστια ακρίβεια μέσα από τη μακροπροσομοίωση.

Στο σχήμα (4.10) που έπεται, παρουσιάζονται οι καμπύλες του πειράματος και των αριθμητικών προσομοιώσεων. Και οι δύο μέθοδοι της μικροσκοπικής προσομοίωσης και της προσομοίωσης με μακροστοιχεία δύνανται να περιγράψουν με καλή προσέγγιση την πραγματική μη γραμμική απόκριση της κατασκευής. Οι αποκλίσεις και των δύο προσομοιώσεων είναι σε αποδεκτά επίπεδα, με αυτή της μακροπροσομοίωσης να παρουσιάζει πιο ομοειδή συμπεριφορά. Να τονιστεί ότι η ταχύτητα ανάλυσης με το OpenSees ήταν ελάχιστα δευτερόλεπτα. Αντίθετα, το Abaqus ολοκλήρωσε την επίλυση σε 24,8 λεπτά. Αυτό δείχνει σε πόσο γρηγορότερο χρόνο μπορεί να προσομοιώσουν μία πραγματική απόκριση τα μακροστοιχεία. Μάλιστα, τέσσερα στοιχεία (όσα στοιχεία ετέθησαν μεταξύ των στηρίξεων της δοκού) που χρησιμοποιούν υλικά με ελάχιστες παραμέτρους είναι ικανά να περιγράψουν με μεγάλη ακρίβεια την κατασκευή. Αντίθετα, η μικροπροσομοίωση απαιτεί κάποιους χιλιάδες βαθμούς ελευθερίας και αρκετές παραμέτρους για να αναλυθεί αριθμητικά ένα πρόβλημα, ακόμη και αυτό της ανάλυσης μίας δοκού.



Σχήμα 4.10 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης, πειράματος, προσομοίωσης με το Abaqus και αριθμητικής προσομοίωσης με το OpenSees για το Concrete02

Έτσι, σαν γενική αποτίμηση μπορεί να αποτυπωθεί ότι η μακροπροσομοίωση μπορεί να δώσει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα σε ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο. Αντίθετα, τα μικροσκοπικά πεπερασμένα στοιχεία ενδείκνυνται στη μελέτη τοπικών φαινομένων σε κρίσιμες περιοχές του προβλήματος. Οπότε, κάθε πρόβλημα του οποίου επιζητείται μια αρχική αδρή προσέγγιση και μελέτη σε μακροσκοπικό επίπεδο θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί εύκολα και γρήγορα μέσω προσομοίωσης με τη χρήση μακροστοιχείων. Ένα τέτοιο πρόβλημα ήταν και η αποτίμηση της διατμητικής αντοχής πλακοδοκού, που απαιτείτο η μόρφωση διαγράμματος τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης. Αν αυτή η μέθοδος αδυνατεί να περιγράψει πιο πολύπλοκα προβλήματα ή προβλήματα που είναι επιθυμητό να καταγραφεί η εξέλιξη κάποιων φαινομένων σε κρίσιμες ζώνες της κατασκευής τοπικού χαρακτήρα, όπως η διάδοση ρωγμών, τότε θα μπορούσε κάποιος να καταφύγει στα μικροπροσομοιώματα, που οι χιλιάδες βαθμοί ελευθερίας θα μπορούν να περιγράψουν αυτές τις καταστάσεις.

Επιχειρήθηκε η ίδια ανάλυση με στοιχεία μορφωμένα σύμφωνα με τη μέθοδο των μετατοπίσεων. Ωστόσο, η εισαγωγή του section aggregator δεν επέφερε κάποιο αποτέλεσμα, δηλαδή δεν επιτεύχθηκε σύγκλιση επίλυσης. Για αυτό το λόγο δεν αναφέρθηκαν και ούτε αναλύθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο, όπως αυτό των στοιχείων της μεθόδου δυνάμεων. Όλα τα θεωρητικά που αφορούσαν την τεχνολογία στοιχείου ελήφθησαν από τις σημειώσεις κατά (Fragiadakis, 2020).

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται η αριθμητική προσομοίωση της διάβρωσης και η επίδρασή της στη φέρουσα ικανότητα της πλακοδοκού που μελετήθηκε προηγουμένως. Εξετάζεται η περίπτωση διάβρωσης με διείσδυση χλωριούχων ιόντων. Αυτά προέρχονται από τη χρήση αντιπηκτικών αλάτων σε περιοχές ψυχρού κλίματος και από αερομεταφερόμενα άλατα σε θαλάσσιες περιοχές (El-Maaddawy & Chekfeh, 2013). Η δεύτερη περίπτωση άπτεται και της Ελλάδας, δεδομένου ότι έχει μία αρκετά εκτεταμένη ακτογραμμή, μήκους 13676 km (Washington, 2021). Ως εκ τούτου, είναι βέβαιο ότι ένα μεγάλο ποσοστό των κατασκευών στον ελλαδικό χώρο πλήττεται από τη διάβρωση λόγω αλάτων, επειδή ανήκουν σε τέτοιο περιβάλλον. Για αυτό το λόγο κρίνεται υψίστης σημασίας η διερεύνηση της.

Γενικά, η διάβρωση συνδέεται με φαινόμενα διατμητικής αστοχίας, κατά κύριο λόγο. Αυτό πολύ απλά, γιατί επηρεάζονται οι εγκάρσιοι συνδετήρες, λόγω της τοποθεσίας τους. Είναι ο εγγύτερος οπλισμός στην επιφάνεια επικάλυψης του σκυροδέματος. Για αυτό, στο πείραμα αναφοράς προσομοιώθηκε η διάβρωση των συνδετήρων. Ωστόσο στην πραγματικότητα, η διάχυση των χλωριούχων ιόντων πραγματοποιείται και σε όλο το εσωτερικό τμήμα της δοκού, επηρεάζοντας και το διαμήκη οπλισμό. Έτσι, θα προσομοιωθούν αριθμητικά δύο περιπτώσεις. Αυτή των διαβρωμένων μεμονωμένα συνδετήρων, που μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά του πειράματος και αυτή της διάβρωσης ολόκληρου του οπλισμού, διατμητικού και διαμήκους. Στη δεύτερη περίπτωση δεν υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα για σύγκριση και έτσι γίνεται απόπειρα πρόβλεψης της συμπεριφοράς της δοκού.

Το επίπεδο ή αλλιώς το ποσοστό της διάβρωσης είναι το κατεξοχήν μέγεθος που έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της καμπτοδιατμητικής συμπεριφοράς ενός μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα, της πλαστιμότητάς του, της παραμορφωσιμότητάς του, της τάσης συνάφειας του με τον οπλισμό και εν γένει επηρεάζει τη μορφή αστοχίας του (El-Maaddawy & Soudki, 2003). Έτσι, το ποσοστό της διάβρωσης συνιστά μία από τις βασικές παραμέτρους για τον προσδιορισμό της ωφέλιμης διάρκειας ζωής της κατασκευής. Για αυτό το λόγο διερευνώνται πέντε ποσοστά διάβρωσης σε κάθε περίπτωση, ώστε να αξιολογηθεί η απόκριση της κατασκευής κατά τη διάρκεια ανάπτυξης ενός μικρού-ελεγχόμενου ποσοστού διάβρωσης μέχρι και ενός ακραίου που αντιστοιχεί σε μεγάλη απώλεια αντοχής. Τα ποσοστά διάβρωσης που ελέγχονται είναι 7%, 15%, 20%, 25% και 35%. Τα δύο πρώτα αποτελούν και τα ποσοστά στόχους που ετέθησαν στο πείραμα αναφοράς, με τη διαφορά ότι το 15% υλοποιήθηκε σε 12%.

5.2 Χρονική εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης

Με το που ολοκληρώνεται η κατασκευή, αυτή έρχεται σε επαφή και σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Αυτό συνεπάγεται τη διείσδυση χλωριούχων ιόντων στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση και συσσώρευσή τους στον χαλύβδινο οπλισμό. Μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι το φαινόμενο εξελίσσεται μέσω μίας διαχυτικής διαδικασίας κατά την οποία η έναρξη διάβρωσης πραγματοποιείται όταν η συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων στο χάλυβα ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή συγκέντρωσης. Μαθηματικά αυτή η έκφραση αποτυπώνεται ως, ότι η διάβρωση

ξεκινάει όταν η πιθανότητα υπερβεί το 10% αναφορικά με τη συγκέντρωση χλωριούχων στο χάλυβα να ξεπεράσουν μία κρίσιμη τιμή (ASTM, 2009). Αυτή η πιθανότητα καθορίζεται μέσω Monte Carlo προσομοίωσης για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών μεγεθών, που ξεφεύγει, όμως, από το σκοπό της παρούσας διπλωματικής.

Αντί της πιθανοτικής προσέγγισης του φαινομένου, μπορεί να γίνει μια σύζευξη των εργασιών των (Ouzaa & Oucif, 2019) και (Choe, Gardoni, Rosowsky, & Haukaas, 2008) για τον προσδιορισμό του χρόνου έναρξης της διάβρωσης. Σύμφωνα με τους πρώτους, η έναρξη της διάβρωσης προκύπτει μέσα από τη σχέση:

$$T_i = \frac{c_p^2}{4D_c} \left(\text{erf}^{-1} \left(\frac{c_{cr} - c_s}{c_0 - c_s} \right) \right)^{-2} \quad (5.1)$$

Όπου:

c_p το πάχος της επικάλυψης (σε mm) μέχρι την παρεία του εγγύτερου οπλισμού, που πρόκειται να διαβρωθεί πρώτα. Εδώ η επικάλυψη μέχρι τους συνδετήρες του κορμού είναι 22 mm.

D_c η σταθερά διάχυσης σε (mm²/year). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη σχέση που εμπεριέχεται στη δουλειά των (Ou, Fan, & Nguyen, 2013):

$$D_c = 100 \cdot 10^{-6,77 \left(\frac{w}{c} \right)^2 + 10,1 \left(\frac{w}{c} \right) - 3,14} \quad (5.2)$$

Όπου, (w/c) είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο. Χρησιμοποιείται ο λόγος με τον οποίο μορφώθηκαν τα δοκίμια ελέγχου του κεφαλαίου 2, ήτοι 0,65. Με βάση αυτά, προκύπτει ότι η σταθερά διάχυσης είναι 367,01 mm²/χρόνο.

erf είναι η συνάρτηση σφάλματος (error function)

c_0 η αρχική συγκέντρωση χλωριούχων στον οπλισμό (μάζα % ως προς τη μίξη σκυροδέματος). Για χάρη απλότητας μπορεί εύλογα να θεωρηθεί ότι είναι 0 η αρχική συγκέντρωση χλωριούχων.

c_s είναι η συγκέντρωση χλωριούχων στην επιφάνεια του οπλισμού (βάρους % ως προς τη μίξη σκυροδέματος). Εδώ είναι που υπεισέρχεται η αβεβαιότητα ως προς τον προσδιορισμό της. Για αυτό αξιολογείται η δουλειά των δευτέρων, (Choe, Gardoni, Rosowsky, & Haukaas, 2008), οι οποίοι μέσα από πειράματα με πιθανοτικές προσεγγίσεις προσδιόρισαν την επιφανειακή συγκέντρωση ως μία γραμμική σχέση συναρτήσεως του λόγου (w/c). Εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις ως προς τις περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορεί να ανήκει ένα στοιχείο του έργου. Να είναι μονίμως βυθισμένο σε υδάτινο περιβάλλον, να βρέχεται κατά καιρούς (παλιρροιακά), να πιτσιλάται ή να υφίσταται ατμοσφαιρικά τα αερομεταφερόμενα άλατα. Επιλέγεται η τελευταία περίπτωση, σύμφωνα με την οποία η επιφανειακή συγκέντρωση ορίζεται ως:

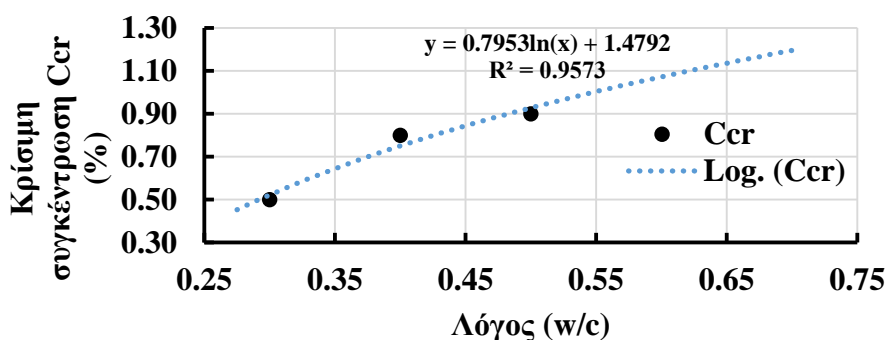
$$c_s = 2,565 \cdot \left(\frac{w}{c} \right) \quad (5.3)$$

Για λόγο 0,65 προκύπτει επιφανειακή συγκέντρωση 1,67%.

C_{cr} η κρίσιμη συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων (μάζα % ως προς τη μίξη σκυροδέματος). Πάλι υπολογίζεται πιθανοτικά και για αυτό αξιοποιείται η δουλειά των δεύτερων, (Choe, Gardoni, Rosowsky, & Haukaas, 2008), οι οποίοι μέσα από πειράματα προσδιόρισαν την κρίσιμη συγκέντρωση σε δύο περιπτώσεις, για στοιχείο που είναι συνεχώς βυθισμένο σε υδάτινο περιβάλλον ή συνεχώς υποβαλλόμενο σε ανακυκλιζόμενη υγρασία και ξηρότητα. Το δεύτερο είναι πιο αντιπροσωπευτικό, οπότε και επιλέγεται. Λαμβάνονται οι τρεις μέσες τιμές (χωρίς την τυπική απόκλιση) των συγκεντρώσεων που υπολογίστηκαν συναρτήσει του λόγου (w/c). Για την εύρεση της κρίσιμης συγκέντρωσης για το συγκεκριμένο λόγο (w/c) του πειράματος, διενεργείται μία λογαριθμική παρεμβολή, σύμφωνα με το σχήμα (5.1). Τότε προκύπτει μία σχέση της μορφής:

$$C_{cr} = 0,7953 \ln\left(\frac{w}{c}\right) + 1,4792 \quad (5.4)$$

Για λόγο 0,65 προκύπτει κρίσιμη συγκέντρωση χλωριούχων ίση με 1,14%.



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα κρίσιμης συγκέντρωσης χλωριούχων και λόγου (w/c)

Με βάση όλα τα παραπάνω, η σχέση (5.1) παράγει το αποτέλεσμα των 3,92 ετών. Προκύπτει ένα σύντομο χρονικό διάστημα έναρξης της διάβρωσης. Αλλά αυτό δικαιολογείται από τη μικρή επικάλυψη του σκυροδέματος και το μεγάλο λόγο νερού προς τσιμέντου, που ουσιαστικά αραιώνει το μείγμα και την αντίσταση ως προς τη διάχυση των χλωριούχων.

Εφόσον προσδιορίστηκε το διάστημα έναρξης της διάβρωσης, απομένει η εύρεση του χρόνου ανάπτυξης ενός συγκεκριμένου ποσοστού διάβρωσης. Αυτό εκφράζεται μέσα από την απώλεια της μάζας της ράβδου οπλισμού. Ποσοτικοποιείται, κατά (Ou, Fan, & Nguyen, 2013), μέσα από τη σχέση:

$$\Delta\omega = \frac{d_{bo}^2 - d_{br}^2}{d_{bo}^2} \cdot 100 \quad (5.5)$$

Όπου, $\Delta\omega$ το ποσοστό της διάβρωσης (%), d_{bo} η αρχική διάμετρος και d_{br} η διαβρωμένη διάμετρος. Άρα, το ποσοστό σχετίζεται άμεσα με την απομείωση της διαμέτρου των οπλισμών. Οι (Choe, Gardoni, Rosowsky, & Haukaas, 2008) πάλι, προσδιόρισαν την απομειωμένη διάμετρο λόγω διάβρωσης, συναρτήσει του χρόνου ανάπτυξης ενός συγκεκριμένου ποσοστού διάβρωσης, από τη στιγμή που έχει ξεκινήσει το φαινόμενο της διάβρωσης. Δηλαδή, η διαβρωμένη διάμετρος υπολογίζεται ανεξάρτητα από το χρόνο έναρξης της διάβρωσης. Αυτή η σχέση είναι η:

$$d_{br} = d_{bo} - \frac{1,0508 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1,64}}{d_c} \Delta t_{cor}^{0,71} \quad (5.6)$$

Όπου, d_c η επικάλυψη του ενδιαφερόμενου οπλισμού. 22 mm η επικάλυψη των συνδετήρων και 30 mm η επικάλυψη των διαμήκων οπλισμών. Δt_{cor} είναι το χρονικό διάστημα ανάπτυξης ενός συγκεκριμένου ποσοστού διάβρωσης από τη στιγμή που έχει αρχίσει το ίδιο το φαινόμενο. Τα d_{br} , d_{bo} και w/c είναι η απομειωμένη διάμετρος οπλισμού, η αρχική διάμετρος οπλισμού και ο λόγος νερού προς τσιμέντο, αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα (5.1) της εισαγωγής, εξετάζονται δύο περιπτώσεις διάβρωσης οπλισμών με πέντε ποσοστά η καθεμία. Η διάβρωση των συνδετήρων μόνο μπορεί να μελετηθεί ανεξάρτητα από το χρόνο όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Η διάβρωση και των διαμήκων μαζί συσχετίζει το χρόνο ακολουθώντας την εξής μεθοδολογία. Για κάθε συγκεκριμένο ποσοστό διάβρωσης που αναπτύσσεται στους συνδετήρες υπολογίζεται η απομειωμένη διάμετρος d_{br} των συνδετήρων μέσα από τη σχέση (5.5). Κατόπιν, από τη σχέση (5.6) για αυτή την απομειωμένη διάμετρο υπολογίζεται ο χρόνος Δt_{cor} που αναπτύσσεται το εκάστοτε ποσοστό διάβρωσης. Αυτός υπολογίζεται για 0,65 λόγο w/c και επικάλυψη $d_c=22$ mm. Έπειτα, στην ίδια σχέση τη (5.6) για αυτό το χρόνο που υπολογίστηκε, τοποθετώντας την επικάλυψη του διαμήκους οπλισμού τώρα, την $d_c=30$ mm και για ίδιο λόγο $w/c=0,65$, υπολογίζεται η απομειωμένη διάμετρος του διαμήκους οπλισμού. Τέλος, για αυτή τη διάμετρο υπολογίζεται πάλι από την (5.5) το ποσοστό διάβρωσης που έχουν υποστεί οι διαμήκεις ράβδοι. Έτσι, με αυτή τη διαδικασία προσδιορίζεται το ποσοστό διάβρωσης του διαμήκους οπλισμού, που έχει μεγαλύτερη διάμετρο και βρίσκεται και πιο εσωτερικά στη δοκό, σε σχέση με το εξεταζόμενο ποσοστό των συνδετήρων. Εφαρμόζοντας όλα αυτά, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα που συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (5.1):

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες οπλισμών για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης των συνδετήρων

Ποσοστό διάβρωσης συνδετήρων (%)	7.00	15.00	20.00	25.00	35.00
Διάμετρος συνδετήρα (mm)	8.00				
Απομειωμένη διάμετρος συνδετήρα (mm)	7.71	7.38	7.16	6.93	6.45
Λόγος w/c	0.65				
Επικάλυψη συνδετήρων (mm)	22.00				
Χρόνος ανάπτυξης ποσοστού διάβρωσης συνδετήρων (χρόνια)	1.10	3.31	5.06	7.07	11.90
Διάμετρος διαμήκους οπλισμού (mm)	25.00				
Επικάλυψη διαμήκους οπλισμού (mm)	30.00				
Απομειωμένη διάμετρος οπλισμού για ποσοστό διάβρωσης συνδετήρων (mm)	24.79	24.54	24.38	24.21	23.86
Ποσοστό διάβρωσης διαμήκους οπλισμού στον ίδιο χρόνο με τη διάβρωση των συνδετήρων (%)	1.67	3.63	4.89	6.19	8.89

5.3 Επίδραση της διάβρωσης στις ιδιότητες των υλικών

Η διάβρωση επηρεάζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού. Συγκεκριμένα, πλήττει το σκυροδέμα απομειώνοντας την αντοχή της επικάλυψης, εξαιτίας της ογκομετρικής εξάπλωσης των διαβρωτικών υποπροϊόντων, μειώνει την απόδοση περίσφιξης, αφού διαβρώνεται ο χάλυβας, απομειώνει τις ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού και χαλαρώνει τη συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος. Από τη φύση του πειράματος θα εξεταστούν οι δύο περιπτώσεις, που άπτονται της απομείωσης των ιδιοτήτων του σκυροδέματος και του χάλυβα, χωρίς να μελετηθεί η περίσφιξη και η συνάφεια. Οτιδήποτε ακολουθεί σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών εξάχθηκε από τη δουλειά των (Ou, Fan, & Nguyen, 2013).

5.3.1 Επιρροή στις ιδιότητες του σκυροδέματος

Η ογκομετρική αύξηση του οπλισμού λόγω των παραγώγων της διάβρωσης οδηγεί στην ανάπτυξη εγκάρσιων εφελκυστικών παραμορφώσεων. Αυτές με τη σειρά τους συντελούν στην ρηγμάτωση του σκυροδέματος της επικάλυψης, με αποτέλεσμα την απομείωση της θλιπτικής καμπύλης του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων του. Η εφελκυστικές αυτές εγκάρσιες παραμορφώσεις μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$\varepsilon_r = \frac{\sum w_{cr}}{b_o} \quad (5.7)$$

Το b_o άπτεται της περιμέτρου του εκτιθέμενου τμήματος της διατομής. Επειδή στην παρούσα περίπτωση η διατομή είναι τύπου T, μπορεί να θεωρηθεί ότι ολόκληρος ο κορμός εκτίθεται στο περιβάλλον. Συνεπώς, το b_o ισούται με το άθροισμα των δύο κατακόρυφων παρειών του κορμού και του πλάτους του. Το $\sum w_{cr}$ αποτελεί το ολικό πλάτος ρωγμής, που προέρχεται από τη διάβρωση των περιμετρικών, ως προς την εκτιθέμενη στο περιβάλλον διατομή, διαμήκων ράβδων οπλισμού και από τους συνδετήρες. Κάθε πλάτος ρωγμής μπορεί να προσδιοριστεί από τον εξής τύπο:

$$w_{cr} = \pi(V_{rs} - 1)2x \quad (5.8)$$

Όπου συνολικά η ποσότητα $2x$ εκφράζει τη μείωση της διαμέτρου μίας ράβδου οπλισμού. Δηλαδή είναι η διαφορά της αρχικής διαμέτρου μείον της απομειωμένης διαμέτρου λόγω διάβρωσης, όπως αυτή προκύπτει από τη σχέση (5.5) για κάποιο ποσοστό διάβρωσης. Το V_{rs} εκφράζει τη σταθερά επέκτασης της διαμέτρου της ράβδου του χάλυβα λόγω διάβρωσης. Ο αναλυτικός υπολογισμός της ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας διπλωματικής και υιοθετείται η τιμή 2, αυτή που επελέγη και στη δουλειά των (Ou, Fan, & Nguyen, 2013).

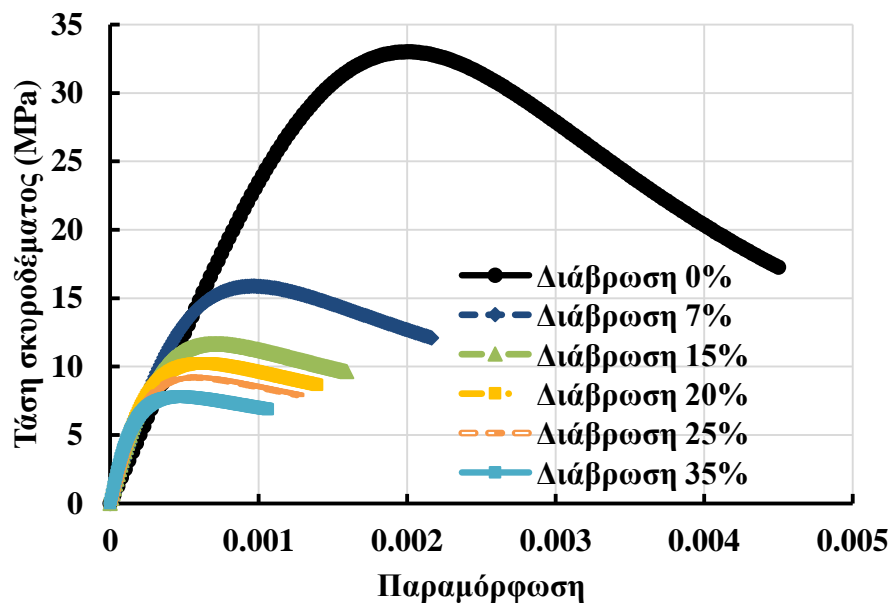
Από τον ορισμό της εγκάρσιας εφελκυστικής παραμόρφωσης, διαπιστώνεται εύκολα ότι αυτή υπολογίζεται διαφορετικά σε κάθε περίπτωση μελέτης. Στην πρώτη περίπτωση διάβρωσης, μόνο των συνδετήρων, το ολικό πλάτος ρωγμής υπολογίζεται ως το τριπλάσιο πλάτος ρωγμής της σχέσης (5.8). Τριπλάσιο, γιατί συνεισφέρουν τα τρία σκέλη του συνδετήρα που εκτείνονται περιμετρικά στον κορμό της διατομής. Στη δεύτερη περίπτωση, που διαβρώνονται και τα διαμήκη εφελκυστικά σίδηρα, η ολική ρωγμή, εκτός του τριπλασίου πλάτους των συνδετήρων, εμπεριέχει και το τετραπλάσιο πλάτος από τις τέσσερις εφελκυστικές ράβδους. Έτσι, υπολογίζεται το w_{cr} με τον όρο του $2x$ να διαφοροποιείται ανάλογα του ποσοστού διάβρωσης που εξετάζεται.

Έτσι, η απομείωση της αντοχής του σκυροδέματος μοντελοποιείται με την εισαγωγή μιας μειωτικής σταθεράς, που προκύπτει από τη σχέση:

$$\zeta = \frac{0,9}{\sqrt{1+600\varepsilon_r}} \quad (5.9)$$

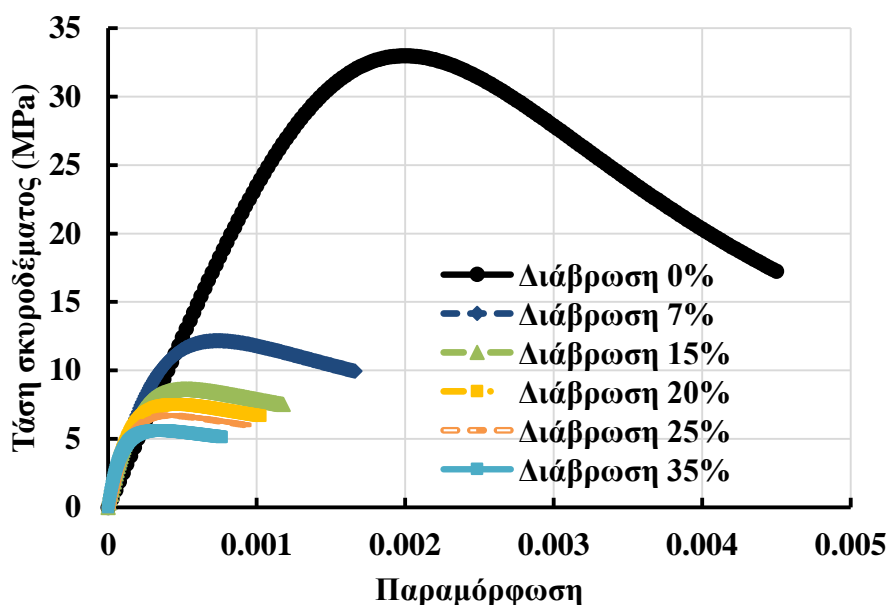
Αυτή η σταθερά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απομειώσει όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, όπως τη μέση θλιπτική και μέση εφελκυστική αντοχή, τις αντίστοιχες παραμορφώσεις των μέγιστων αντοχών, την απόλυτη παραμόρφωση σύνθλιψης σκυροδέματος και το μέτρο ελαστικότητας όπως αυτό ορίστηκε συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής. Όλες αυτές οι ποσότητες πολλαπλασιάζονται με τη σταθερά ζ . Να σημειωθεί πως το $\zeta=1$ στην περίπτωση που ο οπλισμός της δοκού δεν έχει υποστεί διάβρωση.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος συναρτήσει της σταθεράς ζ και για τις δύο περιπτώσεις μελέτης. Σε κάθε περίπτωση αποτυπώνεται η καμπύλη θλίψης που αντιστοιχεί σε κάθε εξεταζόμενο ποσοστό διάβρωσης. Στην πρώτη περίπτωση διάβρωσης μόνο των συνδετήρων, στο σχήμα (5.2), είναι εμφανές ότι και ένα μικρό ποσοστό διάβρωσης του 7% συντελεί σε απομείωση της αντοχής σκυροδέματος στα 15,87 MPa, από τα 33 MPa που ήταν η αρχική αντοχή. Όσο αυξάνεται η διάβρωση τόσο απομειώνεται και άλλο η αντοχή σκυροδέματος. Στην ακραία περίπτωση της διάβρωσης κατά 35% η αντοχή καταλήγει στα 7,79 MPa. Δηλαδή, μπορεί να υποστεί μείωση μέχρι και 76,39% η θλιπτική αντοχή. Κατά τον ίδιο τρόπο απομειώνονται και οι παραμορφώσεις. Φαίνεται ότι όσο μειώνεται η αντοχή, παρουσιάζεται μία μικρή αύξηση της στιβαρότητας του μοντέλου. Αυτό είναι καθαρά αριθμητικό και προκύπτει μέσα από τη σχέση του (Ρορονίς, 1973) που υπολογίζει τις τάσεις. Σε κάθε περίπτωση όμως, το τέμνον μέτρο είναι αμετάβλητο, αφού με την ίδια σταθερά ζ έχει απομειωθεί και η αντοχή σκυροδέματος και η αντίστοιχη παραμόρφωση.

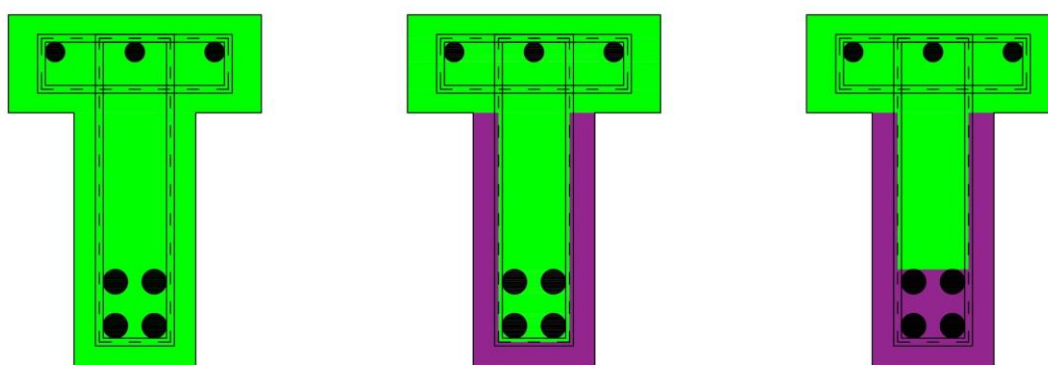


Σχήμα 5.2 Καμπύλες θλιπτικών τάσεων και παραμορφώσεων του σκυροδέματος, για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης για την περίπτωση της διάβρωσης αμιγώς των συνδετήρων

Όμοια συμπεριφορά ακριβώς εκδηλώνει και η περίπτωση της διάβρωσης του συνολικού οπλισμού. Εδώ η απομείωση είναι ακόμα μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Συγκεκριμένα, η αντοχή για 7% διάβρωση φτάνει στα 12,18 MPa, ενώ στην ακραία περίπτωση του 35% έχει απομειωθεί στα 5,61 MPa, σημειώνοντας μία ολική μείωση της τάξης του 83%. Εδώ είναι μεγαλύτερη η απομείωση αφού στον υπολογισμό της σταθεράς ζ συμβάλλει και το πλάτος ρωγμής που προκαλείται από το διαμήκη οπλισμό. Τα ίδια ισχύουν και για τις απομειώσεις των παραμορφώσεων.



Σχήμα 5.3 Καμπύλες θλιπτικών τάσεων και παραμορφώσεων του σκυροδέματος, για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης για την περίπτωση της διάβρωσης του συνολικού οπλισμού



Σχήμα 5.4 Από αριστερά, τα patches της διατομής χωρίς διάβρωση, της διατομής με διάβρωση των συνδετήρων και της διατομής με διάβρωση του πλήρους οπλισμού.

Στο παραπάνω σχήμα (5.4), παρατίθενται οι τρεις φάσεις της διατομής. Το αριστερά τμήμα άπτεται της διατομής χωρίς διάβρωση. Εδώ ολόκληρο το τμήμα της διατομής είναι “υγιές”, δηλαδή σε καμία περιοχή της δεν υφίσταται νόμος σκυροδέματος με απομειωμένες ιδιότητες. Στο μεσαίο τμήμα, που αναφέρεται στην περίπτωση της

διάβρωσης μόνο των συνδετήρων, θεωρείται ότι ο εκτεθειμένος κορμός είναι αυτός που θα υποστεί τροποποίηση και θα περιλαμβάνει νόμο σκυροδέματος με μειωμένες τιμές. Γίνεται η παραδοχή ότι η επικάλυψη του κορμού εκτείνεται μέχρι το κέντρο βάρους του διατμητικού οπλισμού (διακεκομμένη γραμμή). Τέλος, στη δεξιά περίπτωση της διάβρωσης του πλήρους οπλισμού, εκτός του εκτεθειμένου κορμού μπορεί να θεωρηθεί ότι προσβάλλεται και το τμήμα του πυρήνα του κορμού που εσωκλείει τις εφελκόμενες ράβδους. Έτσι, σε κάθε περίπτωση οι μωβ περιοχές της διατομής θα είναι αυτές που θα έχουν νόμο σκυροδέματος με τιμές ανάλογα την εκάστοτε σταθερά ζ που απομειώνει τις ιδιότητες του σκυροδέματος.

5.3.2 Επιρροή στις ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού

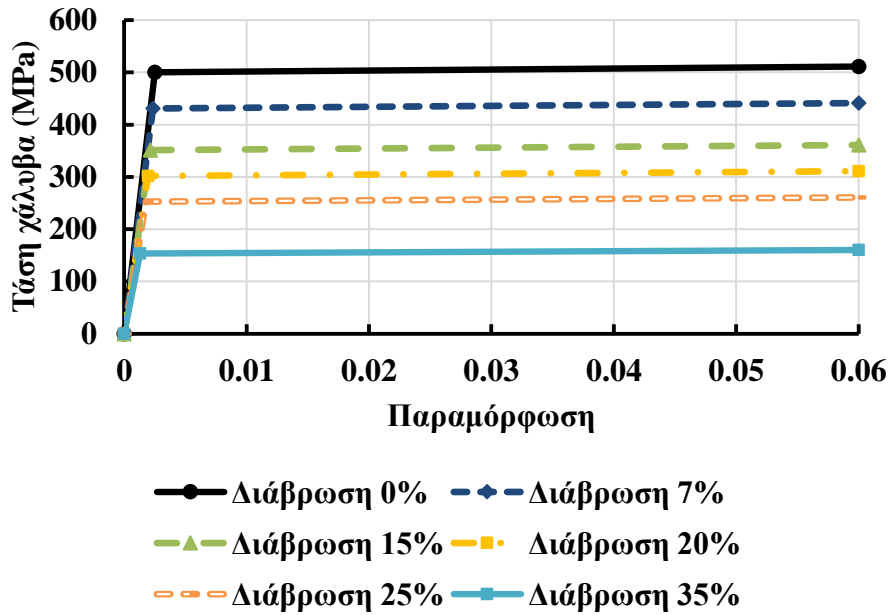
Η διάβρωση, προφανώς, πλήττει τις μηχανικές ιδιότητες και του χάλυβα οπλισμού. Η καμπτοδιατμητική συμπεριφορά ενός μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα μεταβάλλεται, αφού, λόγω της διάβρωσης, τροποποιείται και το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού. Οι σχέσεις που υπολογίζουν την απομείωση των ιδιοτήτων λαμβάνουν υπόψη το ποσοστό της διάβρωσης ή ισοδύναμα τη μαζική απώλεια ή απομείωση της διαμέτρου της χαλύβδινης ράβδου. Απομειώνονται συνολικά το όριο διαρροής του χάλυβα, η απόλυτη τάση του, το μέτρο ελαστικότητας του και η απόλυτη παραμόρφωση θραύσης του. Επειδή, όμως, έχει αξιοποιηθεί το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για το χάλυβα, θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι δύο σχέσεις απομείωσης των ιδιοτήτων του, αυτές του ορίου διαρροής και του μέτρου ελαστικότητας. Οι σχέσεις αυτές είναι οι:

$$\sigma_y = (1 - 1,98\Delta\omega)\sigma_{y0} \quad (5.10)$$

$$E_s = (1 - 1,15\Delta\omega)E_{s0} \quad (5.11)$$

Όπου σ_{y0} , E_{s0} , σ_y και E_s είναι το αρχικό όριο διαρροής, το αρχικό μέτρο ελαστικότητας, το απομειωμένο όριο διαρροής και το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού, αντίστοιχα. Το $\Delta\omega$ είναι το εκάστοτε εξεταζόμενο ποσοστό διάβρωσης.

Στο σχήμα (5.5) παρακάτω, τίθενται τα διγραμμικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης. Είναι εμφανής η επίδραση της διάβρωσης στην απομείωση της αντοχής του χάλυβα. Συγκεκριμένα μόλις από το 7% διάβρωσης η αντοχή μεταβάλλεται από τα 500 MPa, που είναι το αρχικό μέτρο διαρροής, στα 430,7 MPa. Όσο αυξάνεται η διάβρωση τόσο απομειώνεται και η αντοχή. Στην ακραία περίπτωση του 35% διάβρωσης, η αντοχή που παρέχει ο χάλυβας οπλισμού είναι μόλις 153,5 MPa. Άρα, η απώλεια αντοχής ξεκινάει από 13,86% και καταλήγει μέχρι 69,3%. Ανάλογη είναι και η μείωση του μέτρου ελαστικότητας, που από τα 200 GPa της αδιάβρωτης περίπτωσης, απομειώνεται στα 183,9 GPa στο 7% της διάβρωσης και ολοκληρώνεται στα 119,5 GPa στην τελευταία περίπτωση διάβρωσης. Εδώ τα ποσοστά απώλειας αντοχής ξεκινάνε από 8,05% και καταλήγουν σε 40,25%. Ο κλάδος μετά τη διαρροή παραμένει παράλληλος με τον αρχικό. Αυτό διότι διατηρήθηκε σταθερή η κράτυνση του 0,1%. Δεν απομειώθηκε ούτε η παραμόρφωση αστοχίας, καθώς ακολουθείται το διγραμμικό διάγραμμα Steel01 του OpenSees που δεν απαιτεί τη δήλωση απόλυτης παραμόρφωσης. Επομένως, διατηρείται η κράτυνση σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 5.5 Διγραμμικές καμπύλες τάσεων και παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού, για τα διάφορα ποσοστά διάβρωσης

5.4 Προσομοίωση διάβρωσης στο OpenSees

Το φαινόμενο της διάβρωσης και η επίδρασή της στη συνολική συμπεριφορά του φορέα μελετάται μέσω μακροπροσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι θα προσομοιωθεί αριθμητικά μέσω του OpenSees. Διατηρείται, επομένως, ο κώδικας που συντάχθηκε για την ανάλυση στο κεφάλαιο 4 και προστίθενται σε αυτόν τμήματα που αφορούν τη διάβρωση. Δημιουργούνται δύο κώδικες, ένας για κάθε περίπτωση διάβρωσης. Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, κοινό γνώρισμα είναι η διαδικασία της παραμετροποίησης. Οτιδήποτε έχει σχέση με όσα αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο καταχωρούνται σε μεταβλητές.

Στην πρώτη περίπτωση διάβρωσης, της αμιγούς των συνδετήρων, προστίθενται τα κομμάτια που αφορούν πρακτικά τις ιδιότητες των υλικών. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, σε μεταβλητές καταχωρούνται τα δεδομένα που επαρκούν για την αριθμητική επίλυση της διάβρωσης. Το πρώτο στοιχείο, που είναι και η κατεξοχήν παράμετρος, είναι η εκχώρηση σε μεταβλητή του ποσοστού διάβρωσης των συνδετήρων. Μετά αυτόματα, σε διαφορετικές μεταβλητές, υπολογίζονται και καταχωρούνται τα εξής δεδομένα, με τη σειρά όπως αναλύθηκε, στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού. Η απομειωμένη διάμετρος του συνδετήρα, λόγω διάβρωσης και η επιφάνεια αυτού του οπλισμού, όλα τα στοιχεία που απομειώνουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως το συνολικό πλάτος ρωγμής, η εκτεθειμένη περίμετρος του κορμού της διατομής, η εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση ώστε να προσδιοριστεί η σταθερά ζ. Κατόπιν, δημιουργούνται τρία νέα υλικά αυτά των διαβρωμένων. Ένα νέο υλικό Concrete04, της καμπύλης Popovics, όπου όλα τα ορίσματα της εντολής αυτής μειώνονται μέσω της σταθεράς ζ, ένα νέο Steel01, στο οποίο απομειώνονται το όριο διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού και ένα νέο Concrete02 για τη συνεισφορά της απομειωμένης τέμνουσας. Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 4, διατηρείται το υλικό Concrete02 για τη διατμητική

συμπεριφορά της δοκού. Εκεί, που έχει τεθεί σαν όρισμα η τέμνουσα της σχέσης (4.14), στην περίπτωση της διάβρωσης των συνδετήρων, τροποποιείται μόνο η συμβολή του διατμητικού οπλισμού. Δηλαδή, στον όρο του οπλισμού που εμπεριέχεται το εμβαδόν των συνδετήρων και το όριο διαρροής του χάλυβα, τίθενται τα απομειωμένα μεγέθη. Ο όρος του σκυροδέματος που περιέχει το διαμήκη οπλισμό δεν απομειώνεται σε αυτήν την περίπτωση. Τα υπόλοιπα στοιχεία του Concrete02, σχετικά με τις παραμορφώσεις, αυτές προκύπτουν με όμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση χωρίς διάβρωση, με τη νέα τέμνουσα όμως. Τα διατμητικά μέτρα $k_{sec}GA$ παραμένουν ως έχουν για λόγους σύγκρισης με τη συμπεριφορά της δοκού στην αδιάβρωτη κατάσταση. Μετά δημιουργείται ένα πρόσθετο section που εμπεριέχει τα patches με απομειωμένες ιδιότητες σκυροδέματος στα εκτεθειμένα τμήματα του κορμού. Τα δύο section aggregator, πλέον, εμπεριέχουν αφενός τα section patches χωρίς καμία απομείωση στη διατομή σκυροδέματος και στον οπλισμό και το διατμητικό νόμο του πυκνά οπλισμένου με συνδετήρες ανοίγματος και αφετέρου, αυτό με τα απομειωμένα section patches και την τροποποιημένη τέμνουσα. Αυτά τίθενται αντίστοιχα στα στοιχεία του φορέα όπως πρέπει, δηλαδή το section aggregator με τις μειωμένες ιδιότητες στα δύο στοιχεία με το αραιό συνδετήριο οπλισμό, που είναι το τμήμα της δοκού που έχει υποστεί διάβρωση. Τα υπόλοιπα στοιχεία της ανάλυσης παραμένουν ως έχουν.

Όμοια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση διάβρωσης ολόκληρου του οπλισμού. Εδώ, με εφελτήριο το ποσοστό διάβρωσης των συνδετήρων, προκύπτουν τα ποσοστά του διαμήκους με την εισαγωγή του παράγοντα του χρόνου. Προκύπτουν τα στοιχεία του πίνακα (5.1). Με την ίδια διαδικασία βρίσκονται όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για την απομείωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος και του χάλυβα. Πάλι όλα σε ξεχωριστές μεταβλητές στα πλαίσια της παραμετροποίησης. Τα νέα υλικά μορφώνονται με τον ίδιο τρόπο. Εδώ στο Concrete02 ο όρος της τέμνουσας τροποποιείται διττά. Η συνεισφορά του διατμητικού οπλισμού αλλάζει όπως πριν, με τη μειωμένη διάμετρο συνδετήρα και το μειωμένο όριο διαρροής, αλλά μεταβάλλεται και ο όρος της τέμνουσας σκυροδέματος. Αλλάζει η ποσότητα του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού, όπου εμπεριέχεται το εμβαδόν των ράβδων αυτών. Τίθενται οι απομειωμένες διαμέτροι σύμφωνα με το ποσοστό διάβρωσής τους. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν ως έχουν. Στο fiber section, προστίθεται και το patch του τμήματος του κορμού που περικλείει τις εφελκόμενες ράβδους, ενώ στα layers τοποθετούνται οι εφελκόμενοι οπλισμοί με μειωμένες ιδιότητες διαμέτρου και υλικού. Έτσι, τα section aggregators τροποποιούνται αναλόγως και τίθενται στα στοιχεία που πρέπει. Οι υπόλοιπες παράμετροι ανάλυσης δε μεταβάλλονται.

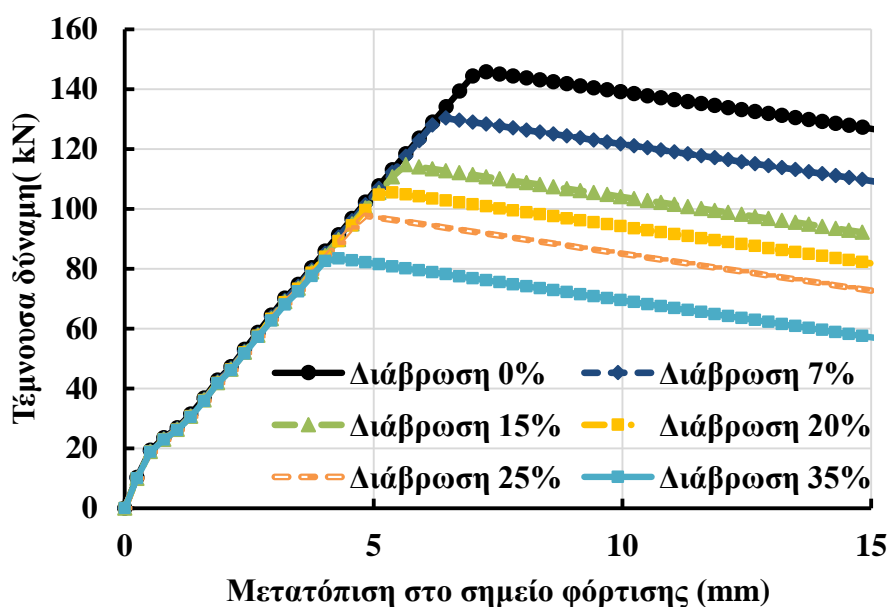
5.5 Αποτελέσματα ανάλυσης

Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω προέκυψαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της διάβρωσης για τις δύο περιπτώσεις. Ακολουθούν τα διαγράμματα της αντοχής της δοκού σε κάθε περίπτωση και τέλος έπεται ένα ραβδόγραμμα που θα εκφράζει την απώλεια αντοχής σε κάθε περίπτωση.

Στο σχήμα (5.6) παρατίθενται οι καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορα ποσοστά διάβρωσης. Αναλύεται η περίπτωση της διάβρωσης των συνδετήρων. Είναι εμφανής η επίδραση της διάβρωσης στην αντοχή της δοκού. Συνολικά, όσο αυξάνεται το ποσοστό διάβρωσης τόσο απομειώνεται η

αντοχή της δοκού. Αρχικά, η αντοχή της πλακοδοκού προσδιορίστηκε στο κεφάλαιο 4 ίση με 145,7 kN. Η μετατόπιση ανάπτυξης της μέγιστης αντοχής ήταν στα 7,26 mm. Αντίστοιχα, τώρα στην περίπτωση της διάβρωσης συνδετήρων, η αντοχή μειώνεται στα 130,3 kN. Η μετατόπιση τώρα είναι στα 6,45 mm. Άρα, υπήρχε απώλεια αντοχής κατά 15,4 kN σε ποσοστό διάβρωσης μόλις 7%. Το ίδιο μοτίβο απομείωσης συνεχίζεται και στα υπόλοιπα ποσοστά διάβρωσης. Συγκεκριμένα, η διατμητική αντοχή της δοκού μεταπίπτει στα 114,69 kN, στα 105,43 kN και στα 97,68 kN για τα ποσοστά 15%, 20% και 25% αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές ισοδυναμούν με απομείωση αντοχής κατά 31,01 kN, 40,27 kN και 48,02 kN για τα ίδια ποσοστά διάβρωσης αντίστοιχα. Οι μετατοπίσεις στο σημείο φόρτισης όπου αναπτύχθηκαν αυτές οι αντοχές είναι 5,64 mm, 5,37 mm και 4,83 mm. Τέλος στην ακραία περίπτωση του 35% ποσοστού διάβρωσης σημειώθηκε αντοχή 83,41 kN σε μετατόπιση 4,29 mm. Η μείωση αντοχής ήταν 62,29 kN.

Σε όρους κλίσης, μακροσκοπικά, διαφαίνεται εύκολα ότι η διάβρωση των συνδετήρων δεν επηρέασε την κλίση των επιμέρους καμπυλών. Ακολουθείται η ίδια πορεία από την αρχή μέχρι και τα 20 kN, που υπάρχει το πρώτο σπάσιμο της καμπύλης λόγω μικρορωγμών και έπειτα πάλι η ίδια κλίση σε όλες τις καμπύλες μέχρι την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής στην εκάστοτε περίπτωση διάβρωσης. Από τη μέγιστη αντοχή και στη συνέχεια πάλι ο καθοδικός κλάδος είναι παράλληλος με την αδιάβρωτη αρχική περίπτωση της δοκού. Αυτό οφείλεται αριθμητικά στο ότι οι μεταβλητές των μέτρων του Concrete02 δε μετεβλήθησαν, παρά μόνο ο όρος της συνολικής τέμνουσας αντοχής. Αντίστοιχα, και η συνολική εικόνα των καμπυλών ως προς τις κλίσεις παραμένει ίδια διότι δεν τροποποιήθηκε κάποια παράμετρος του σκυροδέματος ή του οπλισμού σχετικά με την ορθή ένταση.

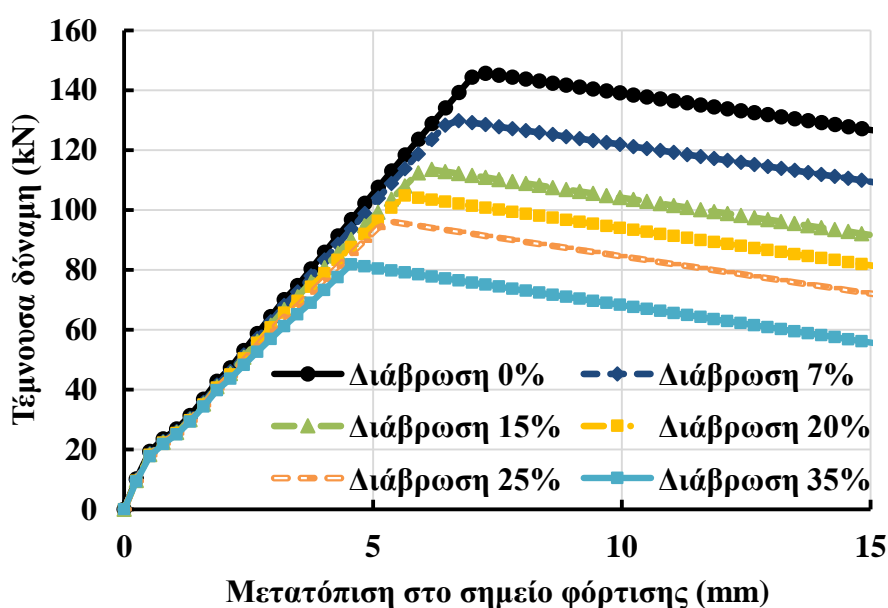


Σχήμα 5.6 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορα ποσοστά διάβρωσης στην περίπτωση διαβρωμένων συνδετήρων

Στο επόμενο σχήμα (5.7) παρατίθενται οι καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορα ποσοστά διάβρωσης. Εξετάζεται η

περίπτωση διάβρωσης ολόκληρου του οπλισμού τώρα. Είναι εμφανής και εδώ η επίδραση της διάβρωσης στην αντοχή της δοκού. Συνολικά, όσο αυξάνεται το ποσοστό διάβρωσης τόσο απομειώνεται η αντοχή της δοκού. Όμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση δηλαδή. Αρχικά, στην περίπτωση της διάβρωσης συνδετήρων και διαμήκους οπλισμού, η αντοχή μειώνεται στα 129,85 kN. Η μετατόπιση τώρα είναι στα 6,72 mm. Άρα, υπήρχε απώλεια αντοχής κατά 15,85 kN στο ποσοστό διάβρωσης του 7%. Το ίδιο μοτίβο απομείωσης συνεχίζεται και στα υπόλοιπα ποσοστά διάβρωσης. Συγκεκριμένα, η διατμητική αντοχή της δοκού μεταπίπτει στα 113,55 kN, στα 104,77 kN και στα 96,08 kN για τα ποσοστά 15%, 20% και 25% αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές ισοδυναμούν με απομείωση αντοχής κατά 32,16 kN, 40,93 kN και 49,62 kN για τα ίδια ποσοστά διάβρωσης αντίστοιχα. Οι μετατοπίσεις στο σημείο φόρτισης όπου αναπτύχθηκαν αυτές οι αντοχές είναι 6,18 mm, 5,64 mm και 5,37 mm. Τέλος στην ακραία περίπτωση του 35% ποσοστού διάβρωσης σημειώθηκε αντοχή 81,83 kN σε μετατόπιση 4,56 mm. Η μείωση αντοχής ήταν 63,87 kN.

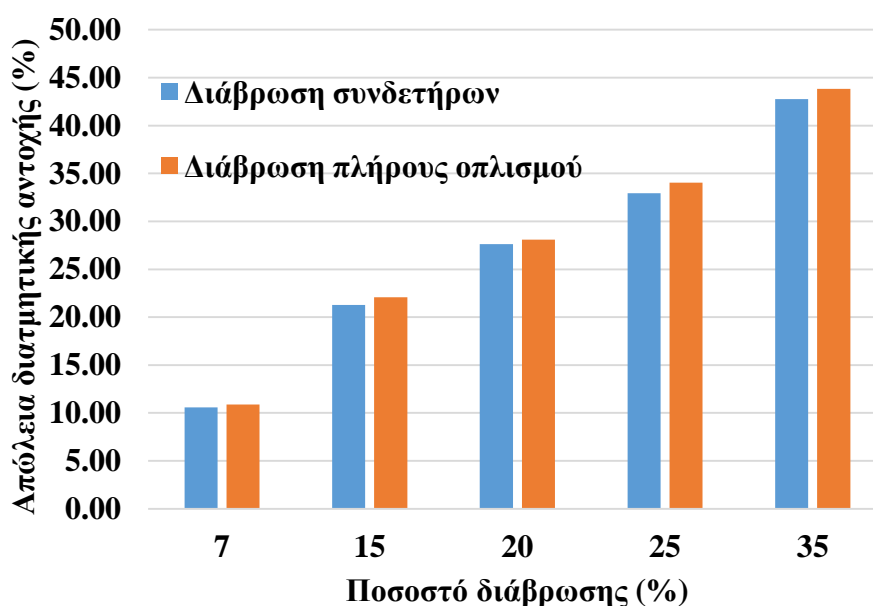
Σε όρους κλίσης, μακροσκοπικά, διαπιστώνεται εύκολα ότι η διάβρωση ολόκληρου του οπλισμού επηρέασε την κλίση των επιμέρους καμπυλών. Ακολουθείται η ίδια πορεία από την αρχή μέχρι και τα 20 kN, που υπάρχει το πρώτο σπάσιμο της καμπύλης λόγω μικρορωγμών και έπειτα υφίσταται μια ελαφριά απόκλιση από την αρχική κλίση σε όλες τις καμπύλες μέχρι την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής στην εκάστοτε περίπτωση διάβρωσης. Με την αύξηση του ποσοστού διάβρωσης μεγεθύνεται και η απόκλιση. Από τη μέγιστη αντοχή και στη συνέχεια, ο καθοδικός κλάδος ακολουθεί με όμοια τάση με αυτόν της αδιάβρωτης αρχικής περίπτωσης της δοκού. Η διαφορά των κλίσεων τώρα οφείλεται στην απομείωση των ιδιοτήτων των υλικών κατά την ορθή ένταση. Συγκεκριμένα, εδώ απομειώθηκε το μέτρο ελαστικότητας και η διάμετρος των διαμήκων εφελκόμενων οπλισμών, ενώ προστέθηκε και άλλο ένα patch στην εφελκυστική περιοχή του κορμού με απομειωμένες ιδιότητες σκυροδέματος. Οι ελαφρώς απομειωμένες τιμές αντοχής οφείλονται και στην απομείωση του ποσοστού



Σχήμα 5.7 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για διάφορα ποσοστά διάβρωσης στην περίπτωση διαβρωμένου ολόκληρου του οπλισμού

του διαμήκους οπλισμού που υφίσταται στον όρο της συνεισφοράς του σκυροδέματος στη συνολική τέμνουσα αντοχής.

Στο ραβδόγραμμα (5.8) παρουσιάζονται οι απώλειες διατμητικής αντοχής της δοκού και στις δύο περιπτώσεις διάβρωσης, για όλα τα εξεταζόμενα ποσοστά. Αρχικά, παρατηρείται ότι σε 7% διάβρωση η απώλεια στην περίπτωση των συνδετήρων είναι 10,57%, ενώ στην περίπτωση της διάβρωσης ολόκληρου του οπλισμού είναι 10,88%. Σύμφωνα με τον πίνακα (2.4) των αποτελεσμάτων του πειράματος η απώλεια αντοχής είναι 11% για την περίπτωση των συνδετήρων, που είναι και η μόνη που εξετάστηκε πειραματικά. Αυτό σημαίνει ότι ολόκληρη η διαδικασία προσομοίωσης ως τώρα για την περίπτωση της διάβρωσης συνδετήρων είναι ορθή και αποδεκτή, αφού παρουσίασε απόκλιση μόλις 3,91% από την πραγματικότητα. Τα υπόλοιπα ποσοστά της διάβρωσης ακολουθούν την ίδια διαδικασία ανάλυσης. Το 15% ήταν ποσοστό στόχος του πειράματος που υλοποιήθηκε στο 12%. Έτσι, ούτε αυτό έχει την πειραματική διαβεβαίωση. Όσον αφορά την περίπτωση ολόκληρου του οπλισμού, δεν υπάρχει πειραματική διερεύνηση, οπότε τα όσα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό αποτελούν μία προβλεπόμενη διαδικασία. Έτσι, συνεχίζοντας στο 15% ποσοστό διάβρωσης, η απομείωση αντοχής ήταν 21,28% για τους συνδετήρες και 22,07% για ολόκληρο τον οπλισμό. Στα ποσοστά 20% και 25% διάβρωσης, η αντοχή μειώθηκε κατά 27,64% και 32,95% για τους συνδετήρες, αντίστοιχα και κατά 28,09% και 34,05% αντίστοιχα, για την περίπτωση του διαβρωμένου ολόκληρου του οπλισμού. Τέλος, στο ακραίο σενάριο του 35% ποσοστού διάβρωσης, αναπτύχθηκε αντοχή απομειωμένη κατά 42,75% και 43,83% για τις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα.



Σχήμα 5.8 Ραβδόγραμμα απομείωσης διατμητικής αντοχής δοκού για διάφορα ποσοστά διάβρωσης για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα (Σχήμα 5.8) είναι εμφανές ότι η διάβρωση έχει σημαντική επίδραση στη διατμητική ικανότητα της δοκού. Ένα μικρό ποσοστό διάβρωσης ήδη συντελεί στο 1/10 περίπου απώλειας αντοχής, ενώ ένα μεγάλο ποσοστό προξενεί απομείωση αντοχής λίγο κάτω από τη μισή αυτής της δοκού. Ακόμη, από τον

τρόπο με τον οποίο μορφώθηκε αριθμητικά η διάβρωση ολόκληρου του οπλισμού, προκύπτει ότι έχει μικρή επίδραση στην περαιτέρω αύξηση της απώλειας αντοχής. Δηλαδή, στο ίδιο ποσοστό είναι ελάχιστη η πρόσθετη απομείωση της συνεισφορά των διαβρωμένων διαμήκων. Αυτό προκύπτει διότι μόνο το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού αλλάζει στον όρο του σκυροδέματος για την αποτίμηση της διατμητικής ικανότητας. Ωστόσο, ο κύριος λόγος είναι ότι το ποσοστό διάβρωσης των διαμήκων είναι αρκετά μικρότερο συγκριτικά με αυτό των συνδετήρων. Αυτό έχει προκύψει από το συνδυασμό σχέσεων που λαμβάνουν υπόψη την αρχική διάμετρο και την επικάλυψη του οπλισμού. Επειδή ο διαμήκης βρίσκεται πιο εσωτερικά και έχει πάνω από την τριπλάσια διάμετρο σε σχέση με του συνδετήρα, το φαινόμενο εξελίσσεται αρκετά πιο αργά εκεί. Ενδεικτικά, σύμφωνα με τον πίνακα (5.1) ακόμα και στην ακραία περίπτωση του 35% διάβρωσης των συνδετήρων, μόλις 8,89% διάβρωση υφίσταται ο διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός. Όσο αυξάνονται τα ποσοστά, αυτή η πρόσθετη απώλεια μεγεθύνεται ολοένα και περισσότερο.

6 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ ΜΕ CFRP ΜΕΘΟΔΟΥΣ

6.1 Γενικά

Εφόσον προσομοιώθηκε η διάβρωση της πλακοδοκού, επόμενο βήμα είναι η αριθμητική ανάλυση της ενίσχυσής της. Εξετάζεται η ενίσχυση με δύο CFRP μεθόδους, αυτή των ενσωματωμένων ράβδων και αυτή του εξωτερικού συνεχούς μανδύα. Αυτές είναι και οι μέθοδοι που διερευνήθηκαν πειραματικά. Επειδή η ενίσχυση εφαρμόζεται σαν μέσο βελτίωσης της συμπεριφοράς ενός φορέα, που στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει υποστεί διάβρωση, θεωρείται και εδώ ότι πραγματοποιείται στη φάση που έχει διαβρωθεί. Άρα, δε συγκρίνεται η περίπτωση R00 και S00 του πειράματος, που αποτιμήθηκε η αύξηση της αντοχής της δοκού απλά με τη εφαρμογή των ενισχυτικών μέσων χωρίς διάβρωση. Γίνεται η εύλογη παραδοχή, που όπως και στην πραγματικότητα, έτσι και στην προσομοίωση, θα διαβρωνόταν μέχρι ενός σημείου η κατασκευή, αρχικά και έπειτα θα εφαρμοζόταν η μέθοδος ενίσχυσής της. Έτσι, θεωρείται ότι ο φορέας διαβρώνεται μέχρι το ποσοστό του 15% και κατόπιν γίνεται η εφαρμογή της ενίσχυσης. Οπότε, μελετάται η αύξηση της αντοχής σε αυτή τη φάση και έπειτα εξετάζεται η κατάσταση της δοκού στο τελευταίο στάδιο της διάβρωσης.

Η διερεύνηση της ενίσχυσης θα πραγματοποιηθεί προσθέτοντας στην εξίσωση (4.14) τον όρο της συμβολής του ενισχυτικού μέσου στη διατμητική αντοχή της δοκού. Συγκεκριμένα, η εξίσωση αυτή τροποποιείται ως:

$$V_{sh} = V_c + V_s + V_f \quad (6.1)$$

Όπου, V_f είναι η συνεισφορά των ενσωματωμένων ράβδων ή του μανδύα ενίσχυσης στην ανάληψη μέρους της τέμνουσας. Στη βιβλιογραφία υπάρχει μια πληθώρα σχέσεων για τον προσδιορισμό της συμβολής της ενίσχυσης. Εξετάζονται συνολικά δώδεκα σχέσεις, εκ των οποίων οι μισές άπτονται των ενσωματωμένων ράβδων ενίσχυσης και οι υπόλοιπες του μανδύα.

Επομένως, σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς της ενισχυμένης δοκού για τις διάφορες σχέσεις που θα παρουσιαστούν. Θα μελετηθούν δύο φάσεις ενίσχυσης, αυτή της άμεσης ανταπόκρισης και αυτή της μακροπρόθεσμης προχωρημένης διάβρωσης. Σε κάθε φάση θα αξιολογηθούν και οι δύο μέθοδοι ενίσχυσης. Θα μορφωθούν διαγράμματα τέμνουσας και μετατόπισης για εποπτική εικόνα της βελτίωσης της κατασκευής.

6.2 Ενίσχυση με τη μέθοδο των ενσωματωμένων ράβδων

6.2.1 Κανονισμός ACI 440.1R-15

Ο κανονισμός (ACI, ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 2015) 440.1R είναι από τους λίγους κανονισμούς που έχουν ενσωματώσει μεθοδολογίες υπολογισμού της διατμητικής συνεισφοράς οπλισμού εγκαρσίων ράβδων από ινοπλισμένα πολυμερή. Ο όρος V_f της (6.1) σχέσης υπολογίζεται με ανάλογο τρόπο με αυτόν της συμβολής των συνδετήριων οπλισμών από χάλυβα, ήτοι:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s_{fv}} \quad (6.2)$$

Όπου στην παραπάνω σχέση (6.2), εννοείται ότι οι ράβδοι CFRP είναι τοποθετημένοι εγκάρσιως στο διαμήκη άξονα της δοκού και οι ποσότητες που εμπεριέχονται εκφράζουν τα εξής:

A_{fv} είναι το εμβαδόν των ράβδων ενίσχυσης. Χρησιμοποιείται η διάταξη της πειραματικής μελέτης του Κεφαλαίου 2, δηλαδή μία ενσωματωμένη ράβδος (ένα σκέλος ισοδύναμου οπλισμού) από CFRP διαμέτρου 10mm.

d μπορεί να θεωρηθεί το ισοδύναμο στατικό ύψος της διατομής της πλακοδοκού, δηλαδή 295 mm

s_{fv} αποτελεί την απόσταση των CFRP ράβδων κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού. Τίθενται αυτές οι ράβδοι στο αραιά διατμητικώς οπλισμένο άνοιγμα ανά 275 mm, για την αναπλήρωση της απομειωμένης συνεισφοράς των συνδετήρων.

f_{fv} είναι η αναπτυσσόμενη τάση του CFRP οπλισμού. Η τάση αυτή πρέπει να περιορίζεται μέχρι μία τιμή ώστε να ελέγχεται το εύρος διατμητικής ρωγμής, να επιτευχθεί διατμητική συνεκτικότητα στο σκυρόδεμα και να αποφευχθεί αστοχία στο καμπτόμενο τμήμα της CFRP ράβδου. Για αυτούς του λόγους ορίζεται ως:

$$f_{fv} = \min(0,004E_f, f_{fu}, f_{f,bend}) \quad (6.3)$$

Όπου στη σχέση (6.3):

E_f το μέτρο ελαστικότητας της CFRP ράβδου, ίσο με 124000 MPa. Λαμβάνεται η τιμή του πειράματος στο Κεφάλαιο 2.

f_{fu} είναι η τάση στη αστοχία σε εφελκυσμό. Λαμβάνεται η τιμή των 2172 MPa, σύμφωνα με το πείραμα του Κεφαλαίου 2.

$f_{f,bend} = \left(\frac{0,05r_b}{d_b} + 0,30\right) f_{fu}$, όπου εδώ τα r_b και d_b εκφράζουν την ακτίνα και τη διάμετρο του καμπτόμενου τμήματος της ράβδου. Εδώ οι ράβδοι είναι ευθύγραμμες που εκτείνονται από την κάτω παρειά του κορμού της διατομής μέχρι την άνω παρειά του πέλματος. Οπότε αυτός ο όρος της σχέσης αυτής δεν εξετάζεται.

Στη σχέση (6.3) πιο κρίσιμος όρος είναι ο πρώτος, δηλαδή η ποσότητα $0,004E_f$. Μάλιστα, στον κανονισμό αναφέρεται πως η ποσότητα 0,004, που συνοδεύει το μέτρο ελαστικότητας του ενισχυτικού μέσου, αποτελεί την παραμόρφωση περιορισμό της ράβδου ώστε να αποφευχθεί η απομείωση της εμπλοκής των αδρανών (degradation of aggregate interlock), ενός μηχανισμού που συμβάλλει στη μεταφορά φορτίου κατά την ανάπτυξη ρωγμής.

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει πως η συνεισφορά των CFRP ράβδων, σύμφωνα με αυτόν το κανονισμό, είναι $V_f=41,79$ kN .

6.2.2 Κανονισμός JSCE 1997

Ένας άλλος κανονισμός που εμπεριέχει μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό της διατμητικής συμβολής CFRP ράβδων είναι αυτός του Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997. Οι σχέσεις που περιλαμβάνει ο κανονισμός υπάρχουν στη δουλειά των (Bui, Stitmannaitum, & Ueda, 2020). Εδώ η συμβολή των ράβδων υπολογίζεται με

παρόμοιο τρόπο όπως στον κανονισμό (ACI, ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 2015). Το μέρος της τέμνουσας που αναλαμβάνεται από τις ράβδους είναι:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_f Z}{s_{fv}} = \frac{7 A_{fv} f_f v d}{8 s_{fv}} \quad (6.4)$$

όπου οι ποσότητες A_{fv} και s_{fv} είναι οι ίδιες όπως ορίστηκαν και πριν. Εδώ αλλάζει ο μοχλοβραχίονας αναφοράς, όπου, αντί του ισοδύναμου στατικού ύψους της διατομής, λαμβάνεται μία απομειωμένη τιμή αυτού. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται τα 7/8 της ποσότητας αυτής.

Διαφορετική είναι, επίσης, η αναπτυσσόμενη τάση των ράβδων. Αυτή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_f = E_{fw} \sqrt{\left(\frac{h}{0,3}\right)^{-0,1} f_c' \frac{\rho_s E_s}{\rho_{fw} E_{fw}} \cdot 10^{-4}} \quad (6.5)$$

Όπου:

E_{fw} το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων. Όπως πριν ίσο με 124000 MPa

h το ολικό ύψος της διατομής ίσο με 360 mm. Συμπίπτει και με το ύψος των ράβδων όπως ενσωματώνονται μέσα στη διατομή.

f_c' η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος. Εισάγεται η μέση θλιπτική αντοχή των 33 MPa για κατηγορία C25/30 σκυροδέματος.

$\rho_s = \frac{A_{stot,tens}^{cor}}{bd}$ το γεωμετρικό ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού. Υπέρ της ασφαλείας μπορούν να τεθούν οι απομειωμένες, λόγω διάβρωσης, διαμέτροι των ράβδων των διαμήκων οπλισμών.

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα του εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού. Πάλι, υπέρ της ασφαλείας, τίθεται η απομειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, λόγω διάβρωσης.

$\rho_{fw} = \frac{A_{fv}}{s_{fv} b}$ το ποσοστό του διατμητικού πρόσθετου οπλισμού ενίσχυσης CFRP ράβδων

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει πως η συμβολή των CFRP ράβδων, σύμφωνα με αυτόν το κανονισμό, είναι $V_f = 21,70$ kN. Ελήφθησαν οι απομειωμένες τιμές διαμέτρου και μέτρου ελαστικότητας για τον εφελκόμενο διαμήκη οπλισμό, λόγω διάβρωσης 15% των συνδετήρων στο αραιό άνοιγμα της δοκού.

6.2.3 Μέθοδος των L.D. Lorenzis και A. Nanni

Εδώ παρατίθεται η διαδικασία υπολογισμού της συνεισφοράς στην συνολική τέμνουσα των ράβδων τοποθετημένων κοντά στην επιφάνεια της δοκού (NSM). Και σε αυτή τη μέθοδο ισχύει η ίδια λογική με αυτή των ενσωματωμένων ράβδων. Ακολουθείται η μεθοδολογία των (Lorenzis & Nanni, 2001). Σύμφωνα με την εργασία τους, η διατμητική συνεισφορά της ενίσχυσης μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από τη σχέση:

$$V_f = \begin{cases} V_{1F} \\ V_{2F} \end{cases} \quad (6.6)$$

Δηλαδή προκύπτει ως μία εκ των δύο αυτών ποσοτήτων, ανάλογα με τη μορφή αστοχίας που διέπει την αλληλεπίδραση ράβδων και δοκού σκυροδέματος.

Πιο συγκεκριμένα, η V_{1F} προκύπτει μέσα από αστοχία συνάφειας των ράβδων με τη δοκό. Υπολογίζεται ως το άθροισμα των δράσεων των CFRP ράβδων που διασταυρώνονται με τη διατημητική ρωγμή. Γίνεται η παραδοχή ρωγμής κλίσης υπό 45° . Κάθε ράβδος που τέμνεται από τη ρωγμή μπορεί να θεωρηθεί ότι διαιρείται σε δύο κομμάτια. Η δράση αντίστασης, σε καθένα από αυτά τα κομμάτια, μπορεί να υπολογιστεί ως το μέσο αποτέλεσμα της τάσης συνάφειας της ράβδου με το εμβαδόν της επιφάνειας του βραχύτερου τμήματος της ράβδου. Το βραχύ αυτό τμήμα αποτελεί το ενεργό μήκος της ράβδου. Υπολογίζεται ως:

$$V_{1F} = 2 \sum A_i f_i = 2 \pi d_b \tau_b L_{tot} \quad (6.7)$$

Όπου:

A_i είναι το εμβαδόν της διατομής των ράβδων

f_i είναι η εφελκυστική τάση των ράβδων που τέμνονται από τη ρωγμή των 45°

d_b η διάμετρος των ράβδων CFRP, 10 mm

τ_b η μέση τάση συνάφειας. Αυτή προσδιορίζεται κανονικά μέσα από πείραμα ολίσθησης και αντίστοιχης αναπτυσσόμενης τάσης συνάφειας στη διεπιφάνεια ράβδου και σκυροδέματος. Επειδή δεν παρατίθεται στο πείραμα τέτοιο δεδομένο, χρησιμοποιείται απλοποιητικά η τάση αντοχής συνάφειας του κολλητικού μέσου των ράβδων που ενσωματώνονται στη δοκό. Λαμβάνεται η τιμή του κατασκευαστή αυτού του κολλητικού μέσου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα του Κεφαλαίου 2. Είναι 12,4 MPa.

L_{tot} είναι το άθροισμα των ενεργών μηκών όλων των ράβδων που διέρχονται από τη ρωγμή. Υπολογίζεται στην πιο δυσμενή θέση της ρωγμής, στην οποία το ενεργό ολικό μήκος λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του. Για τον υπολογισμό του ελάχιστου ενεργού μήκους εισάγεται μία απομειωμένη τιμή του ύψους της διατομής της δοκού. Αυτή είναι:

$$d_{net} = d_r - 2c \quad (6.8)$$

Όπου d_r το ύψος της ράβδου ενίσχυσης μέσα στη δοκό. Ταυτίζεται με το ύψος της διατομής της δοκού, δηλαδή 360 mm. Το c εκφράζει την επικάλυψη των εφελκυσόμενων διαμήκων ράβδων της δοκού, ίσο με 30 mm.

Έτσι, το L_{tot} υπολογίζεται ως:

$$L_{tot} = L_{totmin} = \begin{cases} d_{net} - s_{fv} & , \alpha v \frac{d_{net}}{3} \leq s_{fv} \leq d_{net} \\ 2d_{net} - 4s_{fv} & , \alpha v \frac{d_{net}}{4} \leq s_{fv} \leq \frac{d_{net}}{3} \end{cases} \quad (6.9)$$

Όπου s_{fv} η απόσταση των ράβδων, ανά 275 mm.

Η V_{2F} είναι η αντίσταση των ράβδων ενίσχυσης που αντιστοιχούν σε παραμόρφωση ράβδου 0,004. Οι λόγοι οι ίδιοι με του κανονισμού (ACI, ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 2015). Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται το ενεργό μήκος της ράβδου που τέμνεται από τη ρωγμή και εντείνεται με παραμόρφωση 0,004 ως:

$$L_i = 0,001 \frac{d_b E_b}{\tau_b} \quad (6.10)$$

Όπου, d_b , E_b και τ_b η διάμετρος των CFRP ράβδων, το μέτρο ελαστικότητας τους και η τάση συνάφειας του κολλητικού μέσου, όπως ορίστηκαν προηγουμένως. Η V_{2F} υπολογίζεται όμοια όπως η (6.7), με τη διαφορά ότι το L_{tot} εξαρτάται από γεωμετρικές συνθήκες.

Ανάλογα με τις γεωμετρικές συνθήκες καθορίζεται η τελική σχέση (6.6). Έτσι, αν ισχύει $\frac{d_{net}}{2} \leq s_{fv} \leq d_{net}$, τότε:

$$V_f = \begin{cases} V_{1F} & , \text{αν } L_i \geq d_{net} - s_{fv} \\ V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b L_i & , \text{αν } L_i < d_{net} - s_{fv} \end{cases} \quad (6.11)$$

Αν ισχύει $\frac{d_{net}}{3} \leq s_{fv} \leq \frac{d_{net}}{2}$, τότε:

$$V_f = \begin{cases} V_{1F} & , \text{αν } L_i \geq s_{fv} \\ \begin{cases} V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b (L_i + d_{net} - 2s_{fv}) & , \text{αν } d_{net} - 2s_{fv} \leq L_i < s_{fv} \\ V_{2F} = 4\pi d_b \tau_b L_i & , \text{αν } L_i < d_{net} - 2s_{fv} \end{cases} \end{cases} \quad (6.12)$$

Τέλος, αν ισχύει $\frac{d_{net}}{4} \leq s_{fv} \leq \frac{d_{net}}{3}$, τότε:

$$V_f = \begin{cases} V_{1F} & , \text{αν } L_i \geq d_{net} - 2s_{fv} \\ \begin{cases} V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b (L_i + d_{net} - 2s_{fv}) & , \text{αν } s_{fv} \leq L_i < d_{net} - 2s_{fv} \\ V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b (2L_i + d_{net} - 3s_{fv}) & , \text{αν } d_{net} - 3s_{fv} \leq L_i < s_{fv} \\ V_{2F} = 6\pi d_b \tau_b L_i & , \text{αν } L_i < d_{net} - 3s_{fv} \end{cases} \end{cases} \quad (6.13)$$

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει πως η συμβολή των CFRP ράβδων, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, είναι $V_f=19,48$ kN. Προέκυψε πως κρίσιμη ήταν η αστοχία λόγω συνάφειας, δηλαδή η συμβολή της V_{1F} ποσότητας ενεργοποιήθηκε θεωρώντας πως η τάση συνάφειας έλαβε την τιμή τ_b και δεν προηγήθηκε ένταση της ράβδου με παραμόρφωση 0,004.

6.2.4 Μέθοδος των S.J.E. Dias και J.A.O. Barros

Πρόκειται για άλλη μία περίπτωση υπολογισμού της διατμητικής συνεισφοράς των ράβδων CFRP κατηγορίας NSM. Προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού της ενίσχυσης της δοκού σε διάτμηση μέσα από την εργασία των (Dias & Barros, 2013). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία τους, ο όρος της συμβολής της ενίσχυσης, για ράβδους τοποθετημένες εγκάρσιως υπό διεύθυνση 90° και για σταθερή κλίση ρωγμής 45° , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_f = h_w \frac{A_{fv}}{s_{fv}} \epsilon_{fe} E_f \quad (6.14)$$

Όπου h_w το συνολικό ύψος της διατομής, ίσο με 360 mm. Οι ποσότητες A_{fv} , s_{fv} και E_f είναι το εμβαδόν της διάταξης ράβδων CFRP, η απόστασή τους και το μέτρο ελαστικότητάς τους. Όπως ορίστηκαν προηγουμένως.

Η ποσότητα ϵ_{fe} εκφράζει την ενεργή παραμόρφωση των ράβδων. Αυτή προσδιορίστηκε μέσα από πειράματα και βαθμονομήθηκε κατάλληλα, ώστε να ανταποκρίνεται στα εξαγόμενα αποτελέσματά τους. Θεώρησαν ότι τέσσερεις παράμετροι παίζουν καταλυτικό ρόλο στην απόκριση δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενισχυμένης με CFRP ράβδους. Το ποσοστό των ράβδων και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με το διαμήκη άξονα της δοκού, η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος της δοκού και το ποσοστό των συνδετήρων για να καλυφθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ υπάρχοντος διατμητικού οπλισμού και ενισχύοντος. Κατέληξαν στην εξής σχέση ενεργούς παραμόρφωσης (σε %):

$$\epsilon_{fe} = \frac{(3,76888e^{-0,1160261\theta_f + 0,0010437\theta_f^2}) \left(\frac{E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}}{f_{cm}^{\frac{2}{3}}} \right)^{-0,460679e^{0,0351199\theta_f - 0,0003431\theta_f^2}}}{\gamma_f} \quad (6.15)$$

Όπου:

θ_f η διεύθυνση των ράβδων CFRP ως προς το διαμήκη άξονα της δοκού. Ο προσανατολισμός τους είναι 90°, ίδιος με αυτόν των συνδετήρων.

E_f το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων, ίσο με 124000 MPa

$\rho_f = \frac{A_{fv}}{s_{fv}b}$ το ποσοστό των ράβδων

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα των συνδετήρων. Μπορεί να τεθεί η απομειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, λόγω διάβρωσης των συνδετήρων.

$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}^{cor}}{s_w b}$, το ποσοστό των συνδετήρων. Τίθεται η απομειωμένη τιμή της διαμέτρου του εγκάρσιου διατμητικού οπλισμού της δοκού.

f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος της δοκού, ίση με 33 MPa

γ_f ένας πρόσθετος συντελεστής αβεβαιότητας ίσος με 1,3, για να ληφθούν υπόψη και άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν την απόκριση της δοκού που έχει ενισχυθεί με τις ράβδους CFRP

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει πως η συνεισφορά των CFRP ράβδων, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, είναι $V_f=39,53$ kN. Προέκυψε μεγαλύτερο αποτέλεσμα με τις απομειωμένες τιμές των χαρακτηριστικών των συνδετήρων, λόγω διάβρωσής τους, γιατί επιθυμείται να αναπαρασταθεί η υφιστάμενη κατάσταση της δοκού. Αυτό σημαίνει πως όσο μειώνεται η αντοχή των συνδετήρων, αυξάνεται η συνεισφορά της συμβολή της ενίσχυσης.

6.2.5 Μέθοδος των P. Valerio, T.J. Ibell και A.P. Darby

Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται η συμβολή, στη διατμητική αντοχή της δοκού, των πλήρως ενσωματωμένων ράβδων (Deep Embedment). Εφαρμόζεται η διαδικασία προσδιορισμού της ενίσχυσης, που παρέχουν οι ράβδοι, σύμφωνα με την εργασία των (Valerio, Ibell, & Darby, 2009). Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα πειραμάτων που διενεργήθηκαν, προτείνεται μία απλοποιημένη διαδικασία εύρεσης της πρόσθετης αντοχής σε διάτμηση που παρέχουν οι ράβδοι. Υπολογίζεται με την παραδοχή της αναλογίας δικτυώματος των 45° ως:

$$V_f = \frac{\sigma_f A_f}{s_f} z \quad (6.16)$$

Στην παραπάνω σχέση είναι:

σ_f είναι το όριο της αναπτυσσόμενης τάσης των CFRP ράβδων. Ισούται με $\varepsilon_f E_f$, όπου $\varepsilon_f = 0,004$ η παραμόρφωση των ράβδων και $E_f = 124000 \text{ MPa}$. Προκύπτει αυτή η σχέση κατ' αναλογία και για τους ίδιους λόγους με τον κανονισμό (ACI, ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 2015).

A_f το εμβαδόν της ράβδου CFRP

s_f η απόσταση των ράβδων κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού

z είναι ο ενεργός μοχλοβραχίονας. Ισούται με $h - 2l_{b,max}$, όπου h το ολικό ύψος της διατομής, ίσο με 360 mm και $l_{b,max}$ το μήκος αγκύρωσης σε κάθε άκρο της ράβδου CFRP. Προκύπτει μέσα από τη σχέση:

$$l_{b,max} = \frac{\sigma_f A_f}{\pi d_b \tau_b} \quad (6.17)$$

Όπου:

d_b η διάμετρος της ράβδου CFRP, ίση με 10 mm

τ_b η τάση συνάφειας της ράβδου. Όμοια, όπως πριν στην υποενότητα (6.2.3), πρέπει να τεθεί η μέση τιμή βάσει πειράματος μέτρησης τάσης συνάφειας και ολίσθησης. Αλλά απουσία τέτοιων δεδομένων, τίθεται η τιμή της τάσης αντοχής συνάφειας της ράβδου με το κολλητικό μέσο, ίση με 12,4 MPa, από τον κατασκευαστή.

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει πως η συμβολή των CFRP ράβδων, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, είναι $V_f=22,67 \text{ kN}$.

6.2.6 Μέθοδος του A.K.M.A. Islam

Η τελευταία μέθοδος ενίσχυσης με τη χρήση CFRP ράβδων, που εξετάζεται, είναι αυτή που προτάθηκε από τη δουλειά του (Islam, 2009). Πάλι άπτεται της κατηγορίας NSM ενίσχυσης με ράβδους. Μέσα από πειραματικές διεργασίες κατέληξε στο συμπέρασμα πως κατά την ένταση των ράβδων ενεργοποιείται ένα ποσοστό της εφελκυστικής τους αντοχής. Αυτό είναι το 33% περίπου. Ως εκ τούτου, καταλήγει στην εξής σχέση για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της μεθόδου ενίσχυσης στη διατμητική αντοχή της δοκού:

$$V_f = \frac{1}{3} \frac{A_f f_{yf} d}{s} \quad (6.18)$$

Όπου:

A_f το εμβαδόν της ράβδου CFRP

s η απόσταση των ράβδων στη διαμήκη έννοια της δοκού

d το ισοδύναμο στατικό ύψος της διατομής

f_{yf} η αντοχή σε εφελκυσμό της CFRP ράβδου. Τίθεται η τιμή των 2172 MPa.

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει πως η συνεισφορά των CFRP ράβδων, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, είναι $V_f=61$ kN . Αποτελεί τη λιγότερο συντηρητική προσέγγιση σε σχέση με τις προηγούμενες μεθοδολογίες.

6.3 Ενίσχυση με τη μέθοδο του εξωτερικού συνεχούς μανδύα

6.3.1 Κανονισμός ACI 440.2R-08

Πάλι ο κανονισμός του American Concrete Institute (ACI, 2008) εμπεριέχει μεθοδολογία για τον υπολογισμό της συμβολής στη διατμητική αντοχή της δοκού, αυτής της μεθόδου ενίσχυσης του εξωτερικού μανδύα. Εδώ η συνεισφορά αυτή υπολογίζεται μέσα από μία γενική σχέση που λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ινών του CFRP μανδύα και τη μορφή της ρηγμάτωσης. Αυτή είναι:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} z_{fv} (\sin\alpha + \cos\alpha)}{s_f} \quad (6.19)$$

Στην παραπάνω σχέση οι επιμέρους ποσότητες είναι οι εξής:

A_{fv} είναι η επιφάνεια του ενισχυτικού εξωτερικού μανδύα. Ορίζεται ως $2nt_f w_f$, όπου n το πλήθος στρώσεων του μανδύα. Εδώ υιοθετείται η τιμή 1, ήτοι της μίας ενιαίας στρώσης υφάσματος του μανδύα. Το t_f είναι το πάχος του μανδύα, ίσο με 1 mm. Το w_f είναι το πάχος, κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού, του πλήθους στρώσεων του μανδύα.

s_f είναι η απόσταση, κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού, των στρώσεων του μανδύα.

Αν ο μανδύας είναι συνεχές ύφασμα, χωρίς διακοπές, ώστε να δημιουργείται ένα πλήθος στρώσεων (λωρίδες) που να απέχουν κεντροβαρικά ανά μία απόσταση μεταξύ τους, τότε ο λόγος $\frac{w_f}{s_f}$ ισούται με 1 αποτελώντας, δηλαδή, μία ενιαία οντότητα φύλλου CFRP.

α ο προσανατολισμός των ινών του μανδύα σε σχέση με το διαμήκη άξονα της δοκού. Εδώ είναι 90° , δηλαδή τοποθετημένος εγκάρσια ως προς τον άξονα της πλακοδοκού.

$z_{fv} = 0,9d_{fv}$, όπου d_{fv} είναι το ενεργό ύψος του CFRP εξωτερικού μανδύα οπλισμού. Ορίζεται ως η απόσταση από την ακραία άνω ίνα της διατομής, στην οποία υψώνεται το φύλλο του μανδύα μέχρι το κέντρο βάρους του του εφελκυσμένου οπλισμού. Επειδή η διατομή είναι πλακοδοκός, ο μανδύας εκτείνεται όσο είναι το καθαρό ύψος του κορμού. Έτσι, αυτή η ποσότητα μπορεί να οριστεί ως $d_{eq} - h_f = 195$ mm, όπου d_{eq}

το ισοδύναμο στατικό ύψος της διατομής, ίσο με 295 mm και h_f το πάχος του πέλματος της διατομής, ίσο με 100 mm. Επιλέγεται μία απομειωμένη τιμή του μογλοβραχίονα για υπέρ της ασφαλείας. Αυτή η τιμή είναι υπό τη μορφή Ευρωκώδικα. Ο ίδιος ο κανονισμός το λαμβάνει $z_{fv} = d_{fv}$.

$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f$ η αναπτυσσόμενη τάση του μανδύα ενίσχυσης. Προσδιορίζεται μέσα από την ενεργή παραμόρφωσή του και το μέτρο ελαστικότητάς του, ίσο με 95800 MPa. Η ενεργή παραμόρφωση είναι η μέγιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση που επιτυγχάνεται στην ονομαστική αντοχή του συστήματος ενίσχυσης και κυβερνάται από τη μορφή αστοχίας του, σε αντιστοιχία με τη διάταξή του. Λαμβάνονται όλες οι μορφές αστοχίας υπόψη και ανάλογα την πιο κρίσιμη προσδιορίζεται η ενεργή παραμόρφωση. Πρόκειται για μανδύα που εναγκαλιάζει τον κορμό της διατομής της δοκού. Δηλαδή εφάπτεται με αυτήν σε τρεις παρειές. Σε αυτήν την περίπτωση έχει παρατηρηθεί ότι η αστοχία επέρχεται τις περισσότερες φορές από την αποκόλληση του μανδύα από τη διατομή (debonding). Αυτή ήταν άλλωστε και η αστοχία του πειράματος στο Κεφάλαιο 2. Σε αυτήν την περίπτωση, λοιπόν, εισάγεται μία μειωτική σταθερά αποκόλλησης που εκφράζει την ενεργή παραμόρφωση σαν ποσοστό της απόλυτης παραμόρφωσης κατά την αστοχία του συστήματος σε εφελκυσμό. Έτσι:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (6.20)$$

Όπου ε_{fu} η απόλυτη παραμόρφωση του μανδύα, ίση με 0,01. Τίθεται ο περιορισμός του 0,004, όπου σε αυτή την παραμόρφωση θεωρείται ότι επέρχεται το φαινόμενο του aggregate interlock, όπως εξηγήθηκε στην υποενότητα (6.2.1). Η σταθερά απομείωσης λόγω αποκόλλησης λαμβάνει υπόψη την αντοχή του σκυροδέματος και του συστήματος ενίσχυσης, καθώς και τον τύπο “τυλίγματος” της διατομής από το μανδύα. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (6.21)$$

Όπου, L_e το ενεργό μήκος συνάφειας, δηλαδή το μήκος εντός του οποίου οι τάσεις συνάφειας παραμένουν σταθερές. Προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (6.22)$$

Όπου τα n , t_f και E_f είναι το πλήθος στρώσεων του μανδύα, το πάχος του και το μέτρο ελαστικότητας, αντίστοιχα. Στις μονάδες όπως παρατέθηκαν προηγουμένως.

Οι τροποποιητικοί συντελεστές k_1 και k_2 εμπεριέχονται για να λάβουν υπόψη την αλληλεπίδραση του συστήματος ενίσχυσης με το σκυρόδεμα και τον τρόπο τοποθέτησής του στη δοκό, αντίστοιχα. Ορίζονται ως εξής:

$$k_1 = \left(\frac{f_{c'}}{27} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6.23)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad (6.24)$$

Όπου f_c' η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, ίση με 33 MPa. Τα d_{fv} και L_e ορίστηκαν προηγουμένως. Το k_2 έχει αυτή τη μορφή, διότι άπτεται της περίπτωσης που ο μανδύας εφάπτεται περιμετρικά στον κορμό της διατομής της πλακοδοκού.

Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω, προκύπτει πως η συνεισφορά του CFRP εξωτερικού συνεχούς μανδύα, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, είναι $V_f=82,16$ kN.

6.3.2 Μέθοδος του T.C. Triantafillou

Εδώ υπολογίζεται η συνεισφορά του εξωτερικού συνεχούς μανδύα στη συνολική τέμνουσα που αναλαμβάνει η δοκός, μέσα από την εργασία του (Triantafillou, Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites, 1998). Εδώ προτείνεται ο προσδιορισμός του όρου της διατμητικής συμβολής του συστήματος ενίσχυσης ως:

$$V_f = \frac{0,9}{\gamma_{frp}} \rho_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp} b_w d (1 + \cot\beta) \sin\beta \quad (6.25)$$

Όπου:

γ_{frp} συντελεστής ασφαλείας, ίσος με 1,15 για CFRP σύστημα ενίσχυσης. Επειδή πρόκειται για αποτίμηση πραγματικής συμπεριφοράς, δε λαμβάνεται υπόψη.

ρ_{frp} το ποσοστό του συστήματος ενίσχυσης μανδύα. Ορίζεται ως $\frac{2t_f}{b_w}$ για συνεχές ενιαίο ύφασμα μανδύα, χωρίς να είναι διαιρεμένο σε λωρίδες. t_f και b_w είναι το πάχος του μανδύα, ίσο με 1 mm και το πλάτος της δοκού, αντίστοιχα, ίσο με 125 mm.

E_{frp} το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα, ίσο με 95800 MPa

d το ενεργό ύψος του μανδύα. Κατ' αναλογία με την περίπτωση του κανονισμού (ACI, 2008), μπορεί να ληφθεί το d_{fv} που είναι το ύψος του μανδύα μέχρι το κέντρο βάρους του εφελκυσμένου οπλισμού, ίσο με 195 mm.

β η διεύθυνση των ινών του μανδύα σε σχέση με το διαμήκη άξονα της δοκού, ίση με 90°

Απομένει ο υπολογισμός της ενεργούς παραμόρφωσης. Αυτή προέκυψε μέσα από πειράματα που διενεργήθηκαν και λαμβάνει υπόψη δύο μορφές αστοχίας που μπορεί να συμβούν. Αυτές είναι η θραύση (fracture) του συστήματος ενίσχυσης και η αποκόλληση του μανδύα. Η μορφή αστοχίας είναι συνάρτηση εδώ της στιβαρότητας του μανδύα ενίσχυσης, που αριθμητικά αποτυπώνεται από την ποσότητα $\rho_{frp} E_{frp}$. Έτσι, ανάλογα με το που κυμαίνεται αυτή η ποσότητα καθορίζεται η ενεργή παραμόρφωση ως:

$$\varepsilon_{frp} = \begin{cases} 0,0119 - 0,0205(\rho_{frp} E_{frp}) + 0,0104(\rho_{frp} E_{frp})^2 & , \text{αν } 0 \leq \rho_{frp} E_{frp} \leq 1 \\ -0,00065(\rho_{frp} E_{frp}) + 0,00245 & , \text{αν } 1 < \rho_{frp} E_{frp} \end{cases} \quad (6.26)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για $\rho_{frp} E_{frp}$ σε GPa, προκύπτει κρίσιμη η δεύτερη περίπτωση της (6.26), που ισοδυναμεί με μηχανισμό αστοχίας αποκόλλησης.

Εκτελώντας την παραπάνω διαδικασία, προκύπτει πως η συμβολή του CFRP εξωτερικού συνεχούς μανδύα, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, είναι $V_f=48,88$ kN.

6.3.3 Μέθοδος των T.C. Triantafillou και C.P. Antonopoulos

Ο T.C. Triantafillou σε συνεργασία τώρα με τον C.P. Antonopoulos στην εργασία τους (Triantafillou & Antonopoulos, 2000), επιχείρησαν τον επαναπροσδιορισμό της συνεισφοράς των CFRP εξωτερικών ενισχυτικών μέσων υπολογίζοντας εκ νέου την αναπτυσσόμενη ενεργό παραμόρφωση. Έτσι, η φιλοσοφία υπολογισμού της διατμητικής συμβολής του εξωτερικού μανδύα δεν αλλάζει και προκύπτει από την ίδια ακριβώς σχέση (6.25).

Αυτή τη φορά εισάχθηκε στις πειραματικές διερευνήσεις τους και η επίδραση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, πέραν της αντοχής ή στιβαρότητας του ενισχυτικού μέσου. Για την περίπτωση U σχήματος μανδύα, που εναγκαλιάζει τον κορμό της διατομής της πλακοδοκού, πάλι προκύπτουν οι δύο ίδιοι μηχανισμοί αστοχίας, αυτός της αποκόλλησης και αυτός της θραύσης. Η ενεργός παραμόρφωση προκύπτει, ανάλογα με τις ιδιότητες της ενίσχυσης και του σκυροδέματος, από το μηχανισμό αστοχίας που προηγείται. Έτσι αν καθοριστικός είναι ο μηχανισμός της αποκόλλησης, τότε η ενεργός παραμόρφωση είναι:

$$\varepsilon_{frp,1} = 0,65 \left(\frac{f_c^2}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \quad (6.27)$$

Όπου f_c , E_f και ρ_f η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, το μέτρο ελαστικότητας του μέσου ενίσχυσης και το ποσοστό του αντίστοιχα. Τίθενται οι ίδιες τιμές με τις προηγούμενες υποενότητες.

Αν καθοριστικός είναι ο μηχανισμός αστοχίας σε απόσχιση-θραύση του μανδύα CFRP, τότε η ενεργή παραμόρφωση δίνεται από την εξής σχέση:

$$\varepsilon_{frp,2} = 0,17 \left(\frac{f_c^2}{E_f \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \quad (6.28)$$

Όπου ε_{fu} η απόλυτη παραμόρφωση του μανδύα, ίση με 1%.

Σαν μέγιστο όριο και των δύο αυτών ποσοτήτων τίθεται αυτό του 0,004, που αντιστοιχεί στην περίπτωση να μην απωλεσθεί ο μηχανισμός του aggregate interlock και να διατηρηθεί η διατμητική συνοχή του σκυροδέματος.

Στην παρούσα περίπτωση, κρίσιμος προέκυψε πάλι ο μηχανισμός της αποκόλλησης και έτσι αξιοποιείται η σχέση (6.27). Συνεπώς, εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία, προκύπτει η συμβολή του μανδύα, στη συνολική διατμητική ικανότητα της δοκού, ίση με $V_f=63,48$ kN. Αυξημένη συγκριτικά με την πρότερη δουλειά του T.C. Triantafillou.

6.3.4 Μέθοδος των Z. Zhang και T. Hsu

Η μεθοδολογία των Z. Zhang και T. Hsu εμπεριέχεται στην εργασία των (Bukhari, Vollum, Ahmad, & Sagaseta, 2013) που μελέτησαν τη διατμητική ενίσχυση δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα που παρέχουν τα εξωτερικά φύλλα CFRP του μανδύα. Ο όρος

της διατμητικής συνεισφοράς του εξωτερικού μανδύα υπολογίζεται πάλι από την ίδια σχέση (6.25) του T.C. Triantafyllou, υπό τη μορφή δηλαδή του Ευρωκώδικα. Οπότε το μόνο που διαφοροποιείται και σε αυτή την περίπτωση είναι ο υπολογισμός της ενεργής παραμόρφωσης του συστήματος ενίσχυσης. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν δύο συντελεστές απομείωσης που αν συνδυαστούν με την απόλυτη παραμόρφωση του μανδύα θα προσδιορίσουν την ενεργή παραμόρφωση του συστήματος. Ο ένας λαμβάνει τις αντοχές του μέσου ενίσχυσης και την αλληλεπίδρασή του με το σκυρόδεμα και ο άλλος λαμβάνει τον μηχανισμό αποκόλλησής του. Λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή εκ των δύο. Έτσι:

$$R = \min\left(1,4871 \left(\frac{\rho_f E_f}{f_c}\right)^{-0,7488}, \frac{\tau_{max} L_e}{2f_{fu} t_f} \leq 1\right) \quad (6.29)$$

Όπου οι ποσότητες ρ_f , E_f και f_c είναι το ποσοστό του μανδύα, το μέτρο ελαστικότητάς του και η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αντίστοιχα. Η τ_{max} εκφράζει την απόλυτη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση (σε MPa) μεταξύ κορμού διατομής και μανδύα και προκύπτει από τη σχέση:

$$\tau_{max} = (7,64 \cdot 10^{-4} f_c^2) - (7,64 \cdot 10^{-2} f_c) + 6,38 \quad (6.30)$$

Οι ποσότητες:

L_e είναι το ενεργό μήκος συνάφειας. Στην εργασία των (Bukhari, Vollum, Ahmad, & Sagaseta, 2013) λαμβάνεται η τιμή των 75 mm. Αλλά αναφέρεται πως απαιτείται διερεύνηση. Έτσι, για το λόγο αυτό μπορεί να ληφθεί το μήκος του κανονισμού του (ACI, 2008), της σχέσης (6.22).

f_{fu} είναι η αντοχή σε εφελκυσμό του μανδύα, ίση με 986 MPa

t_f το πάχος του μανδύα

Τελικά, προκύπτει η αναπτυσσόμενη ενεργή παραμόρφωση ως:

$$\varepsilon_{fe} = R\varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (6.31)$$

Όπου ε_{fu} η απόλυτη παραμόρφωση του συστήματος. Ο περιορισμός της 0,004 παραμόρφωσης τίθεται και εδώ για τους ίδιους λόγους.

Εκτελώντας την παραπάνω διαδικασία προέκυψε κρίσιμος πάλι ο μηχανισμός αποκόλλησης. Έτσι, η συμβολή του μανδύα, στη συνολική διατμητική ικανότητα της δοκού, προέκυψε βάσει της σχέσης (6.25) ίση με $V_f=24,05$ kN.

6.3.5 Μέθοδος των G. Monti και M.A. Liotta βάσει κανονισμού CNR-DT200/2004

Μέσα από την εργασία των (Monti & Liotta, 2007), οι οποίοι βασίστηκαν στις διατάξεις του ιταλικού κανονισμού (CNR, 2004), προσδιορίζεται η συνεισφορά του εξωτερικού συνεχούς μανδύα ως εξής, υποθέτοντας ρωγμές κλίσης 45° και τοποθετημένα το μανδύα εγκαρσίως ως προς το διαμήκη άξονα της δοκού όπως στην παρούσα εξεταζόμενη περίπτωση:

$$V_f = \frac{1}{\gamma_{RD}} 0,9 d f_{fed} 2 t_f \frac{w_f}{p_f} \quad (6.32)$$

Όπου:

γ_{RD} συντελεστής ασφάλειας για την απομείωση της διατμητικής αντοχής του ενισχυτικού μέσου. Ισούται με 1,2 , αλλά παραλείπεται, διότι εδώ γίνεται αποτίμηση της πραγματικής συμπεριφοράς της δοκού και όχι σχεδιασμός της.

d είναι το ισοδύναμο στατικό ύψος της διατομής, ίσο με 295 mm

t_f το πάχος του μανδύα, ίσο με 1 mm

Ο όρος $\frac{w_f}{p_f}$ ισούται με 1, λόγω συνεχούς μανδύα, αφού εκφράζει το πλάτος λωρίδων ανά κεντροβαρική απόστασή τους κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού

Απομένει ο υπολογισμός της f_{fed} μέγιστης ενεργής αναπτυσσόμενης τάσης του συστήματος εξωτερικού μανδύα CFRP. Εδώ γίνεται η παραδοχή αποκόλλησης του μανδύα για τύπο U εφαρμογής. Ορίζεται μέσα από τη σχέση:

$$f_{fed} = f_{fdd} \left[1 - \frac{1}{3} \frac{l_e \sin \beta}{\min\{0,9d, h_w\}} \right] \quad (6.33)$$

Όπου β η διεύθυνση των ινών του μανδύα σε σχέση με το διαμήκη άξονα της δοκού, ίση με 90° , d το ισοδύναμο στατικό ύψος της δοκού και h_w το ύψος του κορμού της διατομής, ίσο με 260 mm. Το l_e είναι το ενεργό μήκος συνάφειας και ορίζεται ως:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}} \quad (6.34)$$

Όπου E_f το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα και f_{ctm} η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος C25/30, ίση με 2,565 MPa , όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3.

Η f_{fdd} είναι η τάση αποκόλλησης ίση με:

$$f_{fdd} = \frac{0,80}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{fk}}{t_f}} \quad (6.35)$$

Όπου:

$\gamma_{f,d}$ είναι ένας συντελεστής ασφάλειας, που ισούται με 1,2 ή 1,5 , ανάλογα με τις πιστοποιήσεις ποιότητας που έχει λάβει η εφαρμογή του μέσου ενίσχυσης. Αφενός, ελλείψει δεδομένων και αφετέρου, λόγω αποτίμησης πραγματικής συμπεριφοράς, μπορεί να παραληφθεί και αυτός ο συντελεστής.

Η ποσότητα Γ_{fk} εκφράζει την ειδική ενέργεια θραύσης, που αντιστοιχεί στην απώλεια της συνοχής στη διεπιφάνεια του ενισχυτικού μέσου και του σκυροδέματος της διατομής της δοκού, κατά την αποκόλληση. Αποτυπώνεται μέσα από τη σχέση:

$$\Gamma_{fk} = 0,03k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (6.36)$$

k_b είναι ένας συντελεστής κάλυψης που εμπεριέχει τους όρους που αφορούν τη γεωμετρία λωρίδων μανδύα. Επειδή είναι συνεχές φύλλο έπεται ότι $k_b=1$.

f_{ck} η χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου, ίση με 25 MPa για σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30

Ο παραπάνω κανονισμός εμπεριέχει περίπτωση απομείωσης της τάσης αποκόλλησης αν το πραγματικό μήκος αγκύρωσης του μανδύα, που μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το ύψος του κορμού της διατομής, είναι μικρότερο του ενεργού. Δε συμβαίνει σε αυτή την περίπτωση. Επίσης, για μανδύα που τυλίγεται γύρω από γωνία υπάρχει ένας πρόσθετος όρος που αυξάνει την τάση αποκόλλησης. Γίνεται η παραδοχή ότι ο μανδύας στον κορμό συμπεριφέρεται σαν ένα φύλλο, χωρίς να τυλίγεται γύρω από μία γωνία και επιβάλλεται να εξεταστεί ο μανδύας όπως τυλίγεται γύρω από την κάτω παρειά του κορμού της διατομής, αυτό συμπεριλαμβάνεται στη σχέση (6.33). Άλλωστε, υπέρ της ασφαλείας είναι και το γεγονός ότι λαμβάνεται η μικρότερη τάση αποκόλλησης.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία, προκύπτει πως η συνεισφορά του μανδύα, στη συνολική διατμητική ικανότητα της δοκού, είναι ίση με $V_f=75,17$ kN. Αν τεθούν και συντελεστές ασφαλείας 1,2 για την απομείωση της συμβολής της τέμνουσας και 1,5 για την πιστοποίηση εφαρμογής του συστήματος ενίσχυσης, η ίδια σχέση παράγει το αποτέλεσμα των 33,41 kN. Αλλά λαμβάνεται η πλήρης τιμή του.

6.3.6 Μέθοδος των A. Mofidi και O. Chaallal

Η τελευταία μέθοδος υπολογισμού της συμβολής, στην ολική διατμητική ικανότητα της δοκού, του εξωτερικού συνεχούς μανδύα εμπεριέχεται στην εργασία των (Mofidi & Chaallal, 2014). Για τον υπολογισμό του όρου διάτμησης του μανδύα κινήθηκαν στα πρότυπα του κανονισμού του (ACI, 2008) και χρησιμοποίησαν την εξής σχέση που άπτεται της παραδοχής 45° ρωγμής και εγκάρσιας τοποθέτησης μανδύα:

$$V_f = \rho_f E_f \varepsilon_{fe} b d_f \quad (6.37)$$

Όπου ρ_f , E_f , b και d_f είναι το ποσοστό του μανδύα, το μέτρο ελαστικότητά του, το πλάτος του κορμού της διατομής και το ενεργό ύψος του μανδύα ίσο με 195 mm, που είναι το ύψος από την ακραία θλιπτική ίνα του φύλλου μέχρι το κέντρο βάρους του εφελκόμενου οπλισμού. Πάλι εφαρμόζοντας στατιστική παλινδρόμηση σε πειράματα προσδιορίστηκε η ενεργή παραμόρφωση του συστήματος ενίσχυσης ως:

$$\varepsilon_{fe} = 0,31 k_c k_L k_w \sqrt{\frac{f_c'}{t_f E_f}} \leq 0,005 \quad (6.38)$$

Όπου:

$$k_c = \frac{0,6}{\sqrt{\rho_f E_f + \rho_s E_s}} \quad (6.39)$$

Η σταθερά ρηγμάτωσης σκυροδέματος που συσχετίζει τις αντοχές-στιβαρότητες των εγκάρσιων συνδετήριων οπλισμών και του CFRP συστήματος ενίσχυσης. Αφορά την περίπτωση U-σχήματος μανδύα. Οι ποσότητες ρ_s και E_s εκφράζουν το ποσοστό και το μέτρο ελαστικότητας των συνδετήριων. Για αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, τίθενται τα απομειωμένα μεγέθη της διαμέτρου και μέτρου ελαστικότητας των συνδετήριων λόγω της διάβρωσής τους.

$$k_L = \begin{cases} 1 & , \text{αν } \lambda \geq 1 \\ (2 - \lambda)\lambda & , \text{αν } \lambda < 1 \end{cases} \quad (6.40)$$

Σταθερά που λαμβάνει υπόψη της την επάρκεια ή όχι του μήκους αγκύρωσης του CFRP εξωτερικού μανδύα. Ως λ ορίζεται ο λόγος L_{max}/L_e , όπου L_{max} είναι το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης, ίσο με την ποσότητα d_f για μανδύα U-σχήματος εγκαρσίως (90°) τοποθετημένο και L_e το ενεργό μήκος συνάφειας ίσο με την ποσότητα της σχέσης (6.34).

$$k_w = \frac{1 + \left(\frac{w_f - 1}{s_f - 2}\right)^2}{1 - \left(\frac{w_f - 1}{s_f - 2}\right)^2} \quad (6.41)$$

Σταθερά που λαμβάνει τη συνεισφορά των λωρίδων μανδύα. Επειδή πρόκειται για συνεχές σύστημα μανδύα, ο λόγος του πλάτους λωρίδων προς την κεντροβαρική κατά τη διαμήκη έννοια της δοκού απόστασή τους $\frac{w_f}{s_f}$ είναι ίσος με 1.

f_c' και t_f η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και το πάχος του μανδύα

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία, προκύπτει πως η συμβολή του μανδύα, στη συνολική διατμητική ικανότητα της δοκού, είναι ίση με $V_f=68,02$ kN.

6.4 Προσομοίωση ενίσχυσης στο OpenSees

Οι μέθοδοι ενίσχυσης και η επίδρασή της στη συνολική συμπεριφορά του φορέα μελετώνται και αυτοί μέσω μακροπροσομοίωσης. Διατηρείται, επομένως, ο κώδικας που συντάχθηκε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 5 και προστίθενται σε αυτόν τμήματα που αφορούν την ενίσχυση με τις δύο μεθόδους. Και σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται η διαδικασία της παραμετροποίησης, δηλαδή οτιδήποτε έχει σχέση με όσα αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο καταχωρούνται σε μεταβλητές.

Γενικά για κάθε μία μέθοδο ενίσχυσης εξετάζονται δύο σενάρια. Θεωρείται ότι ο οπλισμός της δοκού έχει διαβρωθεί στο 15% και τότε είναι που εφαρμόζονται οι μέθοδοι ενίσχυσης. Γενικά το 15% είναι ένα ποσοστό σχετικά προχωρημένης διάβρωσης, αλλά και αντίστοιχα ένα άνω όριο εφαρμογής ενίσχυσης. Υποτίθεται ότι μία κατασκευή ελέγχεται ανά κάποια διαστήματα, οπότε δε θα επιτραπεί να προχωρήσει αρκετά η διάβρωση. Το δεύτερο σενάριο είναι ο έλεγχος της δοκού στο ακραίο σενάριο του 35% διάβρωσης. Εξετάζεται αυτό, ώστε να διαπιστωθεί πόσο έχει αλλάξει η διατμητική αντοχή παρά την εφαρμογή της ενίσχυσης. Ως προς τον οπλισμό, θεωρείται η περίπτωση που έχει διαβρωθεί ο πλήρης οπλισμός, δηλαδή εκτός των εγκάρσιων συνδετήρων και ο διαμήκης εφελκόμενος. Αυτό γιατί έτσι αντικατοπτρίζεται πιστότερα το πραγματικό φαινόμενο. Μάλιστα, γίνεται και η παραδοχή ότι, όταν εφαρμόζεται η ενίσχυση, η επικάλυψη του κορμού περιμετρικά ανανεώνεται. Έτσι, αυτή διαβρώνεται από την αρχή, τη στιγμή που έχει ήδη διαβρωθεί κατά 15% η υπόλοιπη δοκός και φτάνει μέχρι ενός ποσοστού όταν η υπόλοιπη δοκός είναι στο 35%

Αριθμητικά στο OpenSees υλοποιείται διατηρώντας τον κώδικα με τη διάβρωση του πλήρους οπλισμού. Κατόπιν, μορφώνεται ένα μικρό τμήμα στο οποίο εμπεριέχονται και οι δώδεκα σχέσεις υπολογισμού της συνεισφοράς της ενίσχυσης, στη συνολική διατμητική ικανότητα της δοκού, που παρουσιάστηκαν. Σε μεταβλητές καταχωρούνται

όλες οι σχέσεις που αφορούν την ενίσχυση. Στο υλικό Concrete02 στον όρο της τέμνουσας αντοχής προστίθεται η συνεισφορά της εκάστοτε σχέσης ενίσχυσης. Οι υπόλοιπες παράμετροι του υλικού παραμένουν ως έχουν για σύγκριση με την περίπτωση της δοκού χωρίς ενίσχυση. Τα patches, που αφορούν την επικάλυψη της διατομής, τροποποιούνται ώστε το σκυρόδεμα χωρίς την απομειωτική σταθερά ζ να τα χαρακτηρίζει. Αυτό στο σενάριο της εφαρμογής της ενίσχυσης. Στο δεύτερο σενάριο δημιουργείται ένα πρόσθετο υλικό Concrete04 που θα αλλοιώνεται με μια νέα μειωτική σταθερά ζ. Αυτή προκύπτει με την ίδια διαδικασία του Κεφαλαίου 5, θεωρώντας ότι η διάβρωση ξεκινάει τη στιγμή που έχει διαβρωθεί το 15% της υπόλοιπης δοκού.

6.5 Αποτελέσματα ανάλυσης

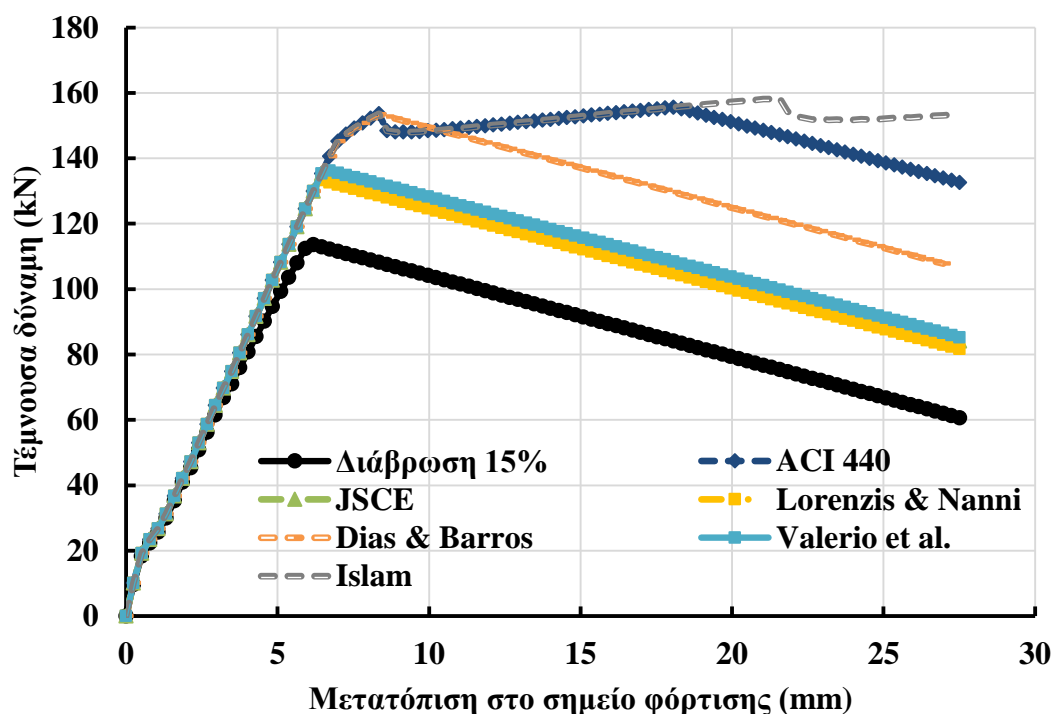
Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω προέκυψαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της ενίσχυσης των δύο μεθόδων για τα δύο σενάρια διάβρωσης. Ακολουθούν τα διαγράμματα της αντοχής της δοκού σε κάθε περίπτωση ενίσχυσης και σε κάθε σενάριο, ενώ παρατίθενται ραβδογράμματα που δείχνουν την πρόσθετη συμβολή των μεθόδων ενίσχυσης, τόσο συγκριτικά με την εκάστοτε διαβρωμένη δοκό όσο και με την αρχική, N00 περίπτωση.

Στο σχήμα (6.1) παρατίθενται οι καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού της συμβολής των μέσων ενίσχυσης των ράβδων στη συνολική απόκριση της κατασκευής. Άπτεται της περίπτωσης διάβρωσης 15% του πλήρους σπλισμού. Είναι εμφανής η διακύμανση των σχέσεων ως προς τα τελικά αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, διαφαίνεται πως τρεις από τις έξι σχέσεις παρουσιάζουν ομοειδή συμπεριφορά. Οι μεθοδολογίες των Lorenzis & Nanni, των Valerio et al. και ο κανονισμός JSCE επιδεικνύουν παραπλήσια αποτελέσματα. Με τη μέθοδο των Lorenzis & Nanni σημειώθηκε μέγιστη διατμητική δύναμη στα 133,24 kN σε μετατόπιση 6,45 mm. Ο JSCE κανονισμός παρουσίασε μέγιστη δύναμη στα 135,28 kN στην ίδια μετατόπιση και η μεθοδολογία των Valerio et al. στα 136,16 kN σε ελαφρώς μεγαλύτερη μετατόπιση στα 6,72 mm. Οι Dias & Barros κατέληξαν σε μία αρκετά πιο αυξημένη αντοχή στα 153,44 kN σε αντίστοιχη μετατόπιση 8,34 mm. Οι τελευταίες δύο μεθοδολογίες του κανονισμού ACI 440 και της εργασίας του Islam, παρουσιάζουν μία ιδιαίζουσα συμπεριφορά.

Από τη μορφή της καμπύλης τους φαίνεται ότι διατηρούν μία μετελαστική συμπεριφορά βαθμιδωτής αύξησης. Αυτή η μορφή έρχεται σε αντίθεση με τις άλλες καμπύλες που αναπτύσσουν μία μέγιστη αντοχή και έπειτα επέρχεται πρακτικά η αστοχία τους μέσω ενός καθοδικού κλάδου. Αυτή η συμπεριφορά είναι ίδιον της αμιγώς διατμητικής αστοχίας. Από την άλλη, ο ανοδικός κλάδος μετά την εμφάνιση της πρώτης διαρροής υποδηλώνει κράτυνση κάποιου υλικού. Όταν η άνοδος είναι διαρκής χωρίς πτώση, σε αυτό δε μετέχει το διατμητικό υλικό διότι πρόκειται περί ψαθυρής διατμητικής αστοχίας. Οπότε, σε αυτές τις περιπτώσεις υφίσταται άλλης μορφής συμπεριφοράς του φορέα και συγκεκριμένα αποκρίνεται έτσι λόγω καμπτικής συμβολής στο φαινόμενο. Αυτή η ανοδική πορεία της καμπύλης μετά την παραλαβή του μέγιστου φορτίου αποτελεί την κρατυνόμενη συνεισφορά του χάλυβα σπλισμού. Αυτός έχει οριστεί από το υλικό Steel01, στο οποίο δεν υπάρχει κάποια παραμόρφωση αστοχίας, παρά διαρκώς κρατυνόμενη. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση όσο και να διαρκέσει η ανάλυση θα εμφανίζεται αυτή η κράτυνση του χάλυβα. Ωστόσο, μετά από

κάποια κρατυνόμενη μετατόπιση μπορεί να εμφανιστεί και καθοδικός κλάδος, όπως στην περίπτωση του κανονισμού του ACI 440, στη μετατόπιση των 18,06 mm. Εκεί το φορτίο έφτασε τη μέγιστη τιμή, στο σύνολο της καμπύλης, των 155,59 kN. Γενικά, γίνεται μία διαρκής καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση, που ανάλογα σε ποιο φορτίο και σε ποια μετατόπιση στην ανάλυση, μπορεί να γίνει κρίσιμη η επίδραση, είτε του διατμητικού υλικού και να επέλθει η κάθοδος, είτε της κράτυνσης άλλου υλικού και να μην επηρεαστεί από τη διάτμηση. Έτσι, είναι στην περίπτωση του Islam, που αποτέλεσε τη μεγαλύτερη συμβολή ενίσχυσης. Εκεί ήταν αρκετά υψηλό το φορτίο και δεν επηρέασε την καμπτική συμπεριφορά. Έπειτα από τη διαρροή, στο κρατυνόμενο τμήμα της καμπύλης, το φορτίο της τέμνουσας έφτασε και μέχρι τα 158,34 kN σε μετατόπιση 21,57 mm.

Με βάση τα παραπάνω, επειδή στο πείραμα αναφοράς η αστοχία ήταν διατμητική σε όλες τις περιπτώσεις, έτσι και στην παρούσα διπλωματική λαμβάνεται υπόψη μόνο το τμήμα της καμπύλης μέχρι την εμφάνιση της διαρροής της. Συνεπώς, αμελείται η κρατυνόμενη συμπεριφορά και λαμβάνεται σαν μέγιστη αντοχή η κατάσταση της δοκού λίγο πριν την εμφάνιση της κράτυνσης. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις του κανονισμού του ACI 440 και της μεθόδου του Islam θεωρείται ότι η δοκός ανέπτυξε μέγιστη αντοχή σε φορτίο 153,62 kN και σε αντίστοιχη μετατόπιση 8,34 mm. Και γενικά, αυτό το φορτίο και αυτή η μετατόπιση αντιστοιχούν στη μέγιστη απόκριση της κατασκευής στη διάβρωση του 15% του σπλισμού της. Το φορτίο της μεθόδου του Dias & Barros ήταν ελάχιστα πιο κάτω από το μέγιστο της δοκού. Αυτό σημαίνει πως η συμβολή αυτής της μεθόδου έφτασε στο όριο της διατμητικής συμπεριφοράς. Λίγο μεγαλύτερο να ήταν θα υπήρχε η καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση.

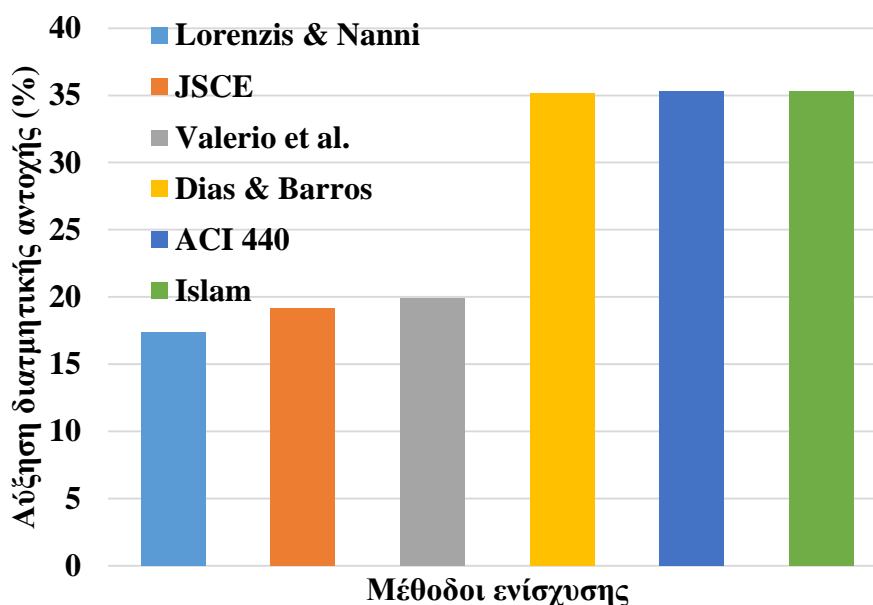


Σχήμα 6.1 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%

Η παραπάνω παραδοχή λαμβάνεται και για λόγους ασφαλείας. Θεωρείται σαν αντοχή η τιμή πριν την κράτυνση και αγνοείται η επίδραση των υλικών που συμβάλλουν σε αυτή την απόκριση. Κατ' αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται και τα αριθμητικά σφάλματα προσομοίωσης αυτών, όπως του Steel01 που δεν έχει όρισμα κάποια παραμόρφωση αστοχίας και ενδεχομένως να μην ανταποκρίνεται επακριβώς στην πραγματική συμπεριφορά του χάλυβα.

Σε όρους κλίσης, για την καθολική απόκριση των καμπυλών, φαίνεται ότι αυξήθηκε λίγο η κλίση μετά τα 20 kN όλων των καμπυλών, λόγω αύξησης της διατμητικής δύναμης από τους όρους της τέμνουσας των διαφόρων σχέσεων ενίσχυσης.

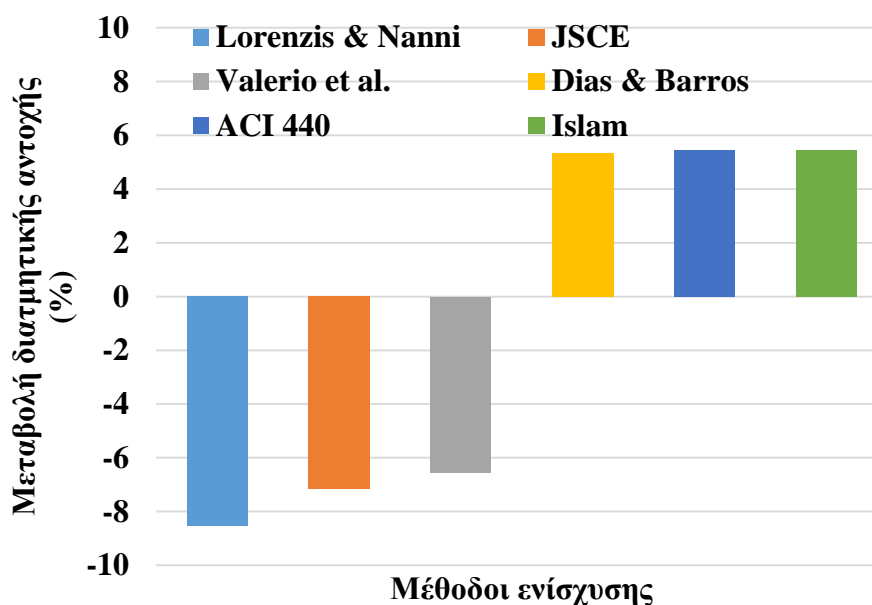
Παρακάτω τίθεται το ραβδόγραμμα (Σχήμα 6.2) που δείχνει τα ποσοστά αύξησης της αντοχής της πλακοδοκού ύστερα από την εφαρμογή των διαφόρων σχέσεων ενίσχυσης με CFRP ράβδους, σε σχέση με την αντοχή της κατά το 15% ποσοστό διάβρωσής της. Η αντοχή της δοκού σε αυτήν τη περίπτωση είχε σημειωθεί ίση με 113,55 kN. Προκύπτει ότι οι τρεις πιο συντηρητικές σχέσεις σημείωσαν αύξηση της αντοχής της δοκού κατά 17,34%, 19,14% και 19,91% για τις μεθόδους των Lorenzis & Nanni, JSCE και Valerio et al. αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες τρεις σχέσεις κατέληξαν σε αύξηση της αντοχής της δοκού λίγο πάνω 35%, που είναι και το μέγιστο όριο. 35,14% η σχέση των Dias & Barros και 35,29% ο ACI 440 και η σχέση του Islam.



Σχήμα 6.2 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%

Στο επόμενο ραβδόγραμμα (Σχήμα 6.3) παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής της δοκού στην υφιστάμενη κατάσταση με τις μεθόδους ενίσχυσης σε σχέση με τη N00 περίπτωση, δηλαδή αυτή που δεν έχει υποστεί διάβρωση και ούτε ενίσχυση. Στο Κεφάλαιο 4 δείχτηκε πως η αντοχή της δοκού ήταν στα 145,70 kN. Επιλέγεται να παρουσιαστεί και αυτή η μεταβολή ώστε να δείχτεί πόσο αποδοτική ήταν η ενίσχυση σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Διότι η αρχική κατάσταση έχει διαμορφωθεί με βάση τη μελέτη και διερευνάται αν η κατασκευή τώρα που έχει υποστεί διάβρωση μπορεί να ανταποκριθεί στις αρχικές απαιτήσεις με τις οποίες μορφώθηκε. Οι

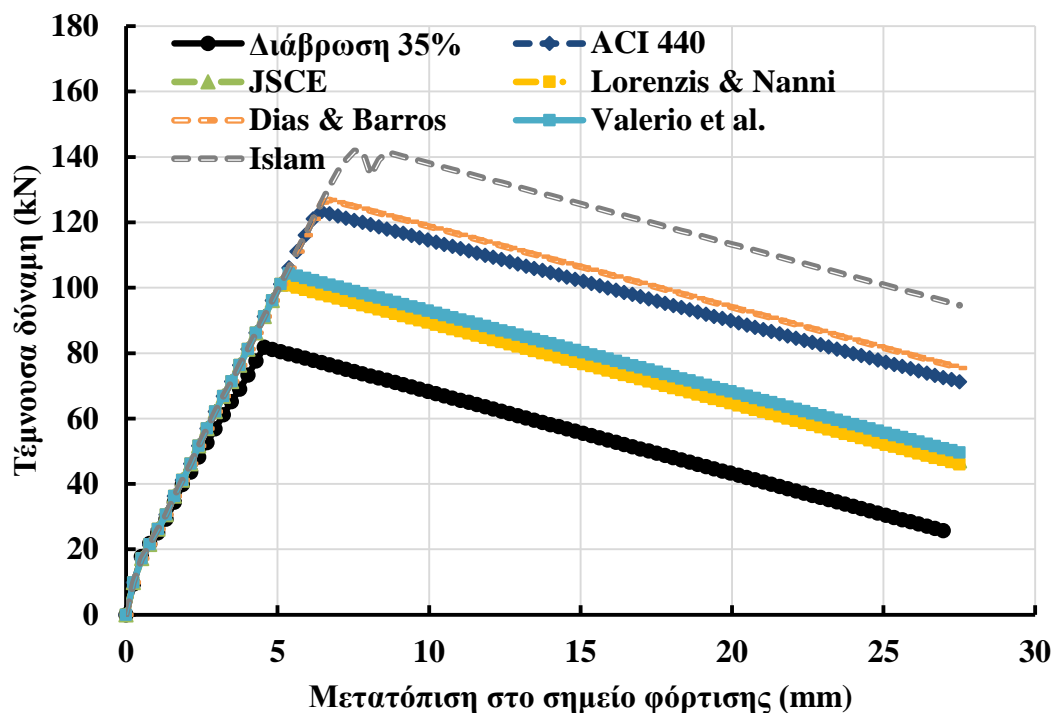
συντηρητικές προσεγγίσεις των Lorenzis & Nanni, JSCE και Valerio et al. έδειξαν ότι στην τωρινή κατάσταση η δοκός έχει μειωμένη αντοχή κατά 8,55%, 7,15% και 6,55% αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες τρεις μέθοδοι που κυμαίνονται, πρακτικά, στα ίδια επίπεδα έδειξαν ότι και στην υφιστάμενη κατάσταση η αντοχή της δοκού είναι αυξημένη λίγο κάτω από 5,5% σε σχέση με την αρχική της κατάσταση. 5,32% η σχέση των Dias & Barros και 5,44% ο ACI 440 και η σχέση του Islam.



Σχήμα 6.3 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15% σε σχέση με τη N00 περίπτωση

Στο σχήμα (6.4) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το δεύτερο σενάριο της διάβρωσης του ποσοστού 35% για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης. Εδώ παρατηρείται ότι ενεργοποιούνται διατμητικά όλες οι καμπύλες. Αυτό συμβαίνει διότι με την απομείωση των ιδιοτήτων των υλικών, λόγω διάβρωσης, μειώθηκε και η συνολική τέμνουσα στην οποία συμβάλλει το σκυρόδεμα και ο χάλυβας του διατμητικού οπλισμού. Έτσι, υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο ανάπτυξης διατμητικής δύναμης μέχρι την κράτυνση, όπως φάνηκε στην προηγούμενη περίπτωση. Άρα, όλες οι μέθοδοι ενίσχυσης εδώ ανέπτυξαν αντοχή που συντελεί μόνο σε διατμητική αστοχία.

Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος των Lorenzis & Nanni απέδωσε διατμητική αντοχή ίση με 101,13 kN σε μετατόπιση στο σημείο φόρτισης 5,10 mm. Ο κανονισμός JSCE ανέπτυξε συνολική αντοχή ίση με 101,74 kN σε μετατόπιση 5,37 mm. Οι Valerio et al. κατέληξαν σε αντοχή 104,28 kN στην ίδια μετατόπιση των 5,37 mm. Τώρα παραπλήσιες φαίνονται οι προσεγγίσεις του κανονισμού ACI 440 και των Dias & Barros. Αναπτύχθηκαν αντοχές ίσες με 123,29 kN και 126,85 kN, αντίστοιχα, σε μετατοπίσεις 6,45 mm και 6,72 mm. Τέλος, η λιγότερο συντηρητική προσέγγιση του Islam παρουσιάζει μία βύθιση και ανάκαμψη μετά την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής, που πρόκειται για μία αριθμητική ιδιομορφία, ίσως στην οριακή καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση. Ωστόσο, δε λαμβάνεται υπόψη. Εδώ η αντοχή είναι 141,84 kN σε μετατόπιση 7,53 mm.



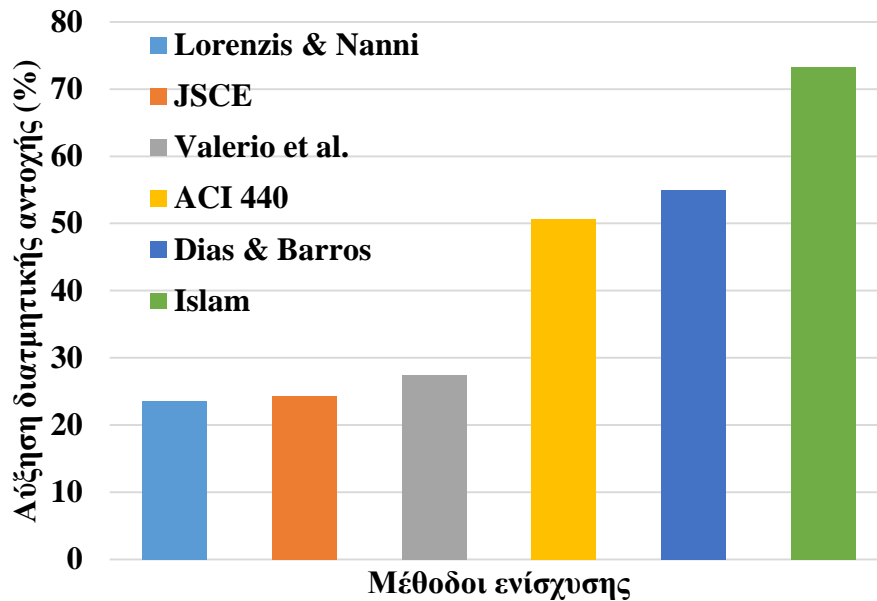
Σχήμα 6.4 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%

Καθολικά, η μορφή τους είναι πλέον η κλασσική με παρουσία καθοδικού κλάδου, που υποδεικνύει τη διατμητική αστοχία. Πάλι η κλίση των καμπυλών είναι λίγο πιο αυξημένη σε σχέση με την άοπλη από ράβδους δοκό. Οι καθοδικοί κλάδοι είναι παράλληλοι, λόγω των παραμέτρων του Concrete02.

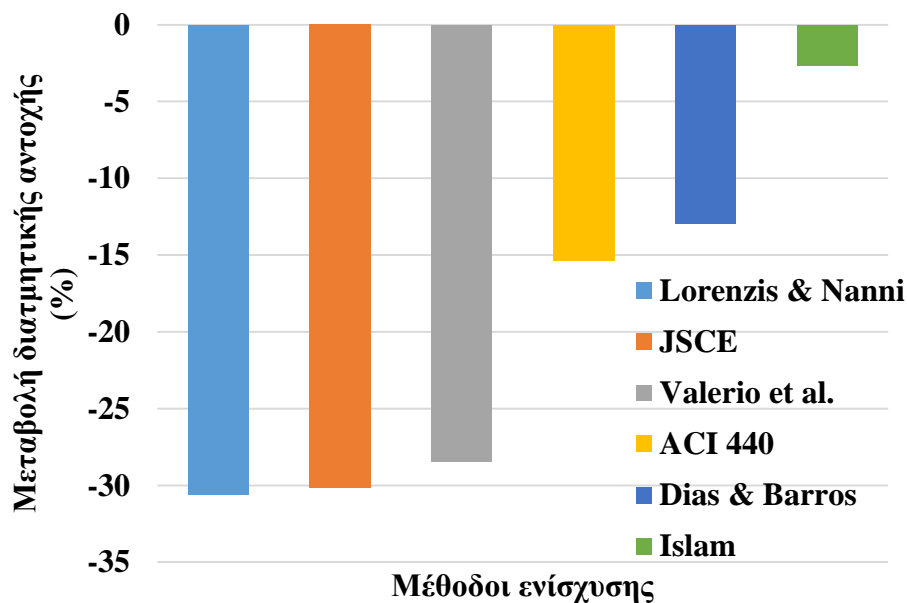
Στο σχήμα (6.5) εμφανίζονται οι αυξημένες αντοχές της ενισχυμένης δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε σχέση με τη διαβρωμένη κατά 35%, πλέον, δοκού. Οι συντηρητικές προσεγγίσεις των Lorenzis & Nanni, JSCE και Valerio et al. έδειξαν ότι η αντοχή της δοκού αυξήθηκε κατά 23,59%, 24,33% και 27,44%, αντίστοιχα. Ο κανονισμός ACI 440 συνετέλεσε στην αύξηση κατά 50,67%, ενώ η μέθοδος Dias & Barros κατά 55,01%. Τέλος, ο Islam τη βελτίωσε τη δοκό στην απόλυτη αύξηση των 73,34%. Παρατηρείται ότι εν γένει αυξήθηκε αρκετά η συμβολή των ενισχύσεων εδώ, καθώς μειώθηκε περαιτέρω η αντοχή, λόγω διάβρωσης. Οι σχέσεις του JSCE και των Dias & Barros διαφοροποιείται λίγο σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο διάβρωσης, διότι λαμβάνουν υπόψη τις απομειωμένες τιμές των χαρακτηριστικών του χάλυβα οπλισμού.

Τέλος, για την περίπτωση των ράβδων, στο σχήμα (6.6) εμπεριέχονται οι μεταβολές των αντοχών στην υφιστάμενη κατάσταση του 35% διάβρωσης σε σχέση με την αρχική δοκό. Εδώ φαίνεται πως καμία σχέση δεν κατορθώνει να αναπληρώσει την αρχική αντοχή της δοκού. Οι Lorenzis & Nanni έχουν απώλεια 30,59%, σε σχέση με την αρχική αντοχή, ο κανονισμός JSCE 30,17%, ενώ οι Valerio et al. στο 28,42%. Ο ACI 440 λίγο πιο πάνω από 15% απώλεια και συγκεκριμένα 15,38% , ενώ οι Dias & Barros περίπου 13% ή 12,94%. Μόνο ο Islam είχε απώλεια στα 2,64%, αμελητέα σχεδόν.

Δηλαδή με αυτή τη σχέση δεν υπάρχει σχεδόν απώλεια της αντοχής κατά την εμφάνιση διάβρωσης ποσοστού 35% σε σχέση με την αρχική κατάσταση.



Σχήμα 6.5 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%

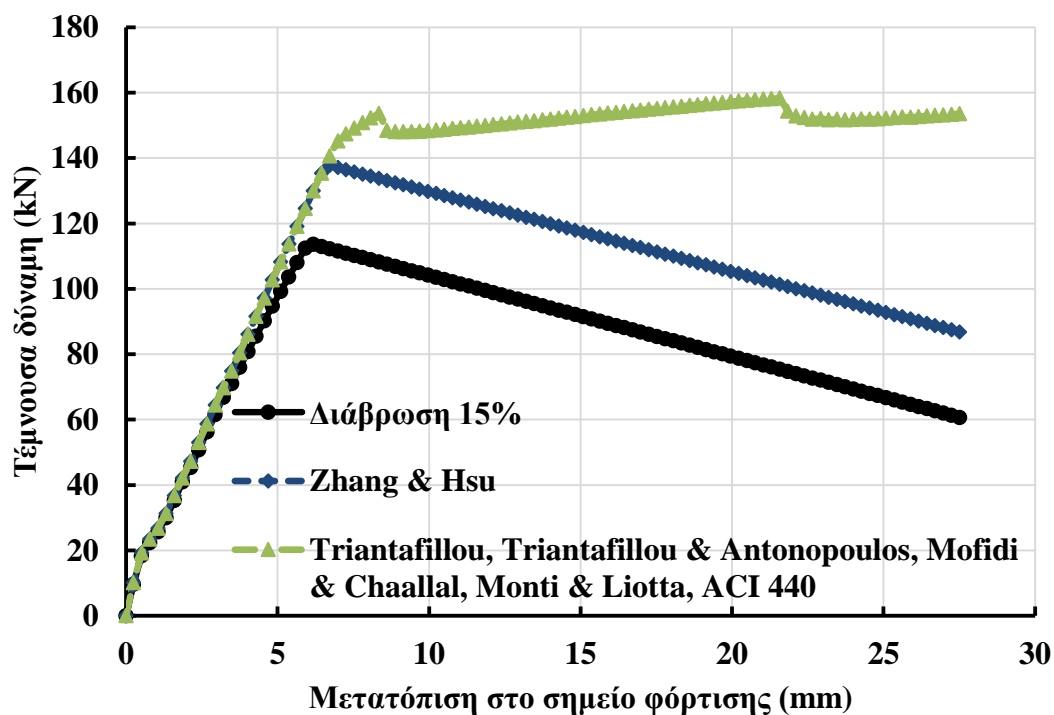


Σχήμα 6.6 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35% σε σχέση με τη N00 περίπτωση

Στο σχήμα (6.7) παρατίθενται οι καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού της συμβολής του μέσου ενίσχυσης του εξωτερικού συνεχούς μανδύα στη συνολική απόκριση της κατασκευής. Άπτεται της περίπτωσης διάβρωσης 15% του πλήρους οπλισμού. Όπως φαίνεται άμεσα, οι πέντε εκ των έξι σχέσεων παρουσιάζουν εφάμιλλη συμπεριφορά. Μάλιστα, όλες οι πέντε αυτές σχέσεις επιδεικνύουν την καμπτική συμπεριφορά

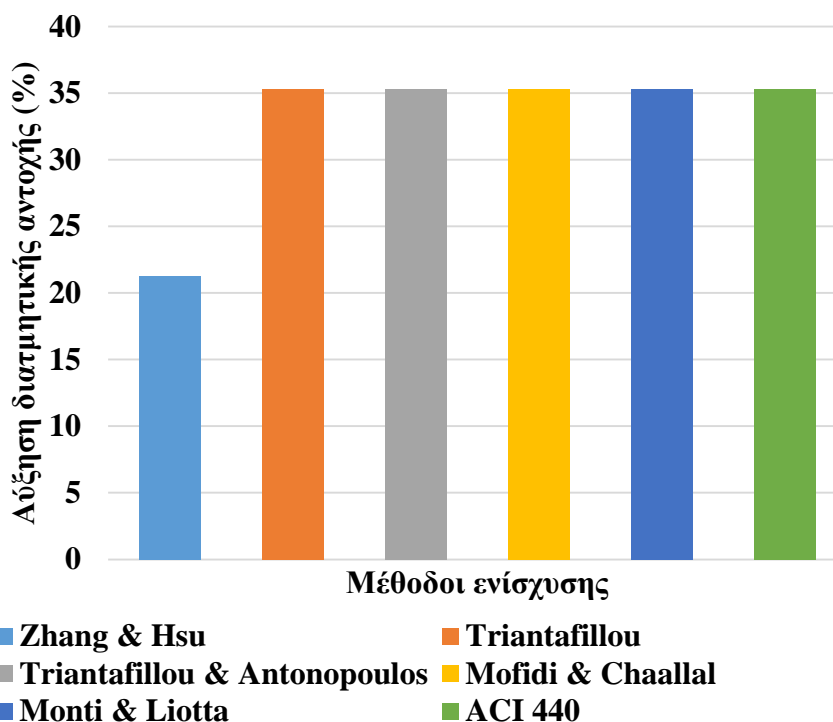
κράτνσης του χάλυβα οπλισμού. Όπως φάνηκε και στην υποενότητα (6.3) αρκετές σχέσεις έβγαλαν σαν αποτέλεσμα υψηλές σχετικά τιμές ως προς τη συμβολή του μανδύα ενίσχυσης στην ολική διατμητική αντοχή της δοκού. Οι σχέσεις των Triantafillou, Triantafillou & Antonopoulos, Mofidi & Chaallal, Monti & Liotta και του κανονισμού του ACI 440 είναι αυτές που δεν κατέληξαν σε διατμητική αστοχία της δοκού. Δηλαδή, έχουν τιμές τέτοιες, ώστε υπερεκτιμούν, ενδεχομένως, τη διατμητική αντοχή της δοκού, με απόρροια να αποκρίνονται αλλιώς. Και συγκεκριμένα κρατύνονται λόγω καμπτικής πλέον συμπεριφοράς. Μόνο η πιο συντηρητική σχέση από όλες τις υπόλοιπες, του Zhang & Hsu είναι αυτή που συνεισφέρει μέχρι ενός σημείου, πέραν του οποίου ο φορέας αστοχεί διατμητικά και ψαθυρά, μέσω ενός απότομου καθοδικού κλάδου. Η σχέση, λοιπόν, του Zhang & Hsu συνέβαλε σε διατμητική αντοχή της πλακοδοκού ίση με 137,72 kN σε αντίστοιχη μετατόπιση 6,72 mm. Για τις υπόλοιπες σχέσεις ισχύει ότι αναφέρθηκε και παραπάνω, δηλαδή διατηρείται το κομμάτι των καμπυλών μέχρι και την ανάπτυξη του φορτίου, ύστερα από το οποίο επέρχεται η κρατυνόμενη αυξομείωση της καμπύλης. Γίνεται αυτό, διότι σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διατμητική απόκριση της δοκού, άρα και ο ίδιος ο διατμητικός τρόπος αστοχίας. Συνεπώς αμελούνται οι κρατύνσεις των καμπυλών. Οπότε, όπως και στην περίπτωση των ράβδων ενίσχυσης, θεωρείται ότι οι υπόλοιπες σχέσεις συμβάλλουν στη βελτίωση της αντοχής της δοκού μέχρι την ανάπτυξη φορτίου αντοχής ίσου με 153,62 kN σε μετατόπιση 8,34 mm, ανεξάρτητα που στο σύνολο της καμπύλης υπάρχει ανάπτυξη φορτίου μέχρι 158,34 kN στη μετατόπιση των 27,57 mm.

Ως προς την κλίση των δύο καμπυλών της αριθμητικής προσομοίωσης ισχύουν τα ίδια, ήτοι μία μικρή αύξηση σε σχέση με την καμπύλη της διαβρωμένης δοκού. Καμία απόκλιση στην κλίση μεταξύ των καμπυλών των περιπτώσεων ενίσχυσης.



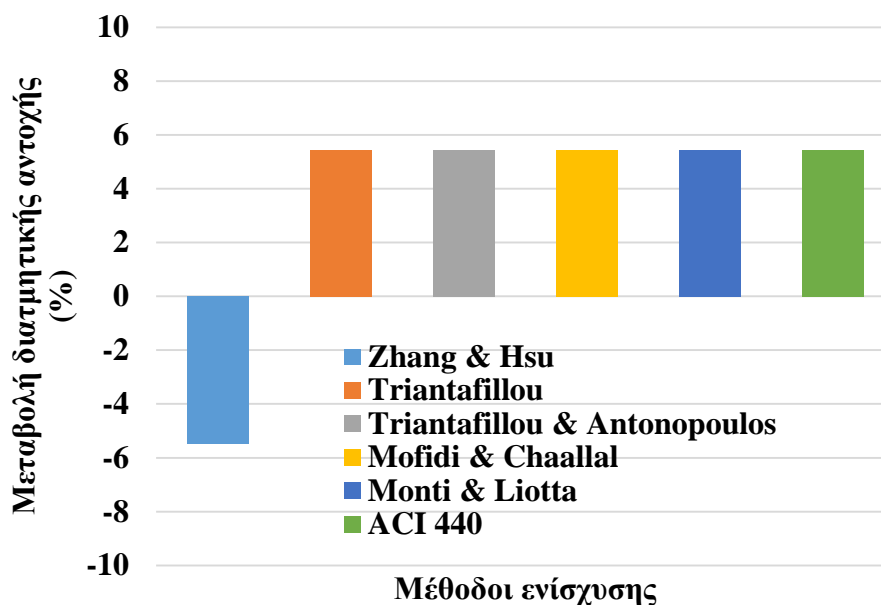
Σχήμα 6.7 Καμπύλες τένουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%

Στο σχήμα (6.8), έπεται το ραβδόγραμμα της αύξησης στη διατμητική αντοχή της δοκού, που προξενούν οι διάφορες σχέσεις υπολογισμού της συμβολής του CFRP εξωτερικού μανδύα. Πρόκειται για τη βελτίωση της δοκού στην υφιστάμενη κατάσταση του 15% ποσοστού διάβρωσης. Όπως είναι αναμενόμενο, οι πέντε σχέσεις από τις έξι που εξετάστηκαν και που υπερόπλισαν διατμητικά τη δοκό, συνέβαλαν στην ανάπτυξη του άνω ορίου αντοχής της. Έτσι, σε σχέση με την αντοχή της διαβρωμένης κατά 15% δοκού των 113,55 kN, έγινε βελτίωση της ικανότητάς της κατά 35,29%. Αντίστοιχα, η σχέση των Zhang & Hsu συνεισέφερε σε βελτίωση της διατμητικής αντοχής της δοκού κατά 21,29%.



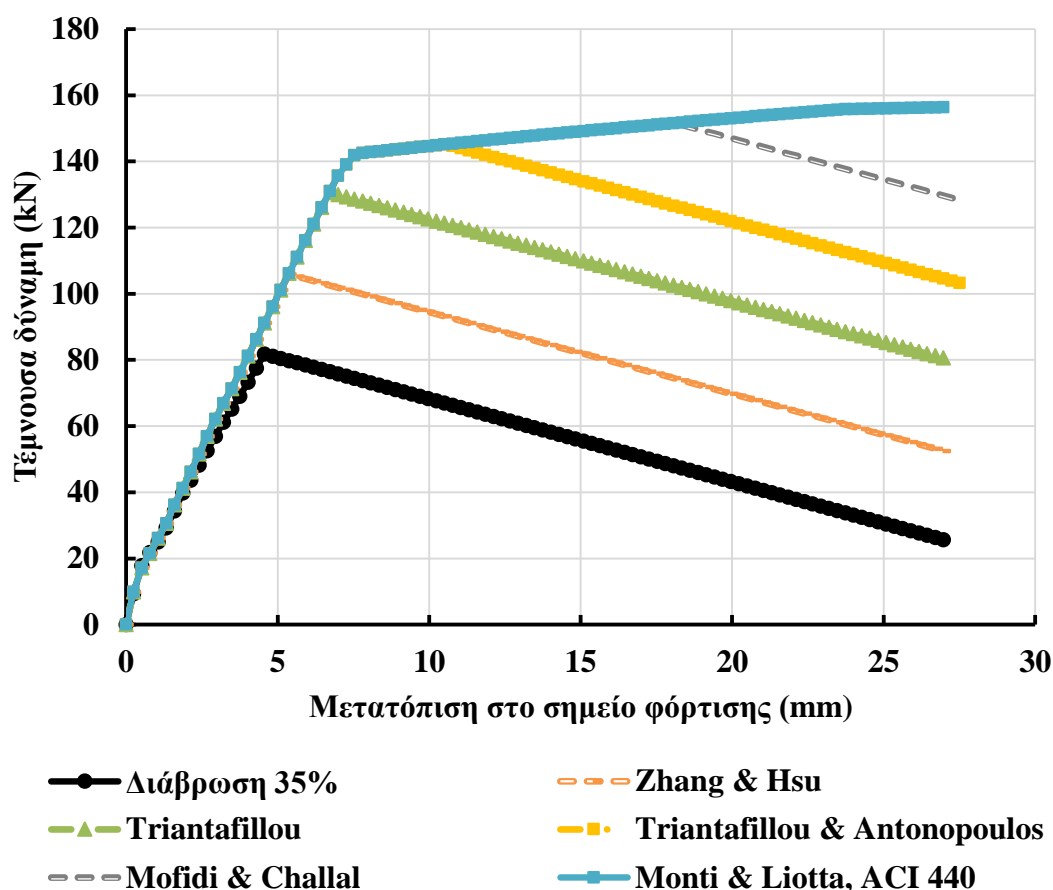
Σχήμα 6.8 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15%

Το σχήμα (6.9) παραπάνω, παρουσιάζει τη μεταβολή της αντοχής της δοκού στην υφιστάμενη κατάσταση της διάβρωσης του 15% του οπλισμού της, σε σχέση με την αρχική κατάστασή της, που η αντοχή τότε ήταν 145,70 kN. Όπως είναι πρόδηλο, μόνο η πιο συντηρητική σχέση των Zhang & Hsu δεν κατόρθωσε να αναπληρώσει πλήρως την αντοχή της δοκού μετά την εφαρμογή του μέσου ενίσχυσης. Σημείωσε συνολική απώλεια, σε σχέση με τη N00 περίπτωση, 5,48%. Αντίθετα, οι υπόλοιπες σχέσεις που έφτασαν στην απόλυτη αντοχή της δοκού παρουσιάζουν συνολική αύξηση 5,44% σε σχέση με την αρχική κατάστασή της.



Σχήμα 6.9 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 15% σε σχέση με τη N00 περίπτωση

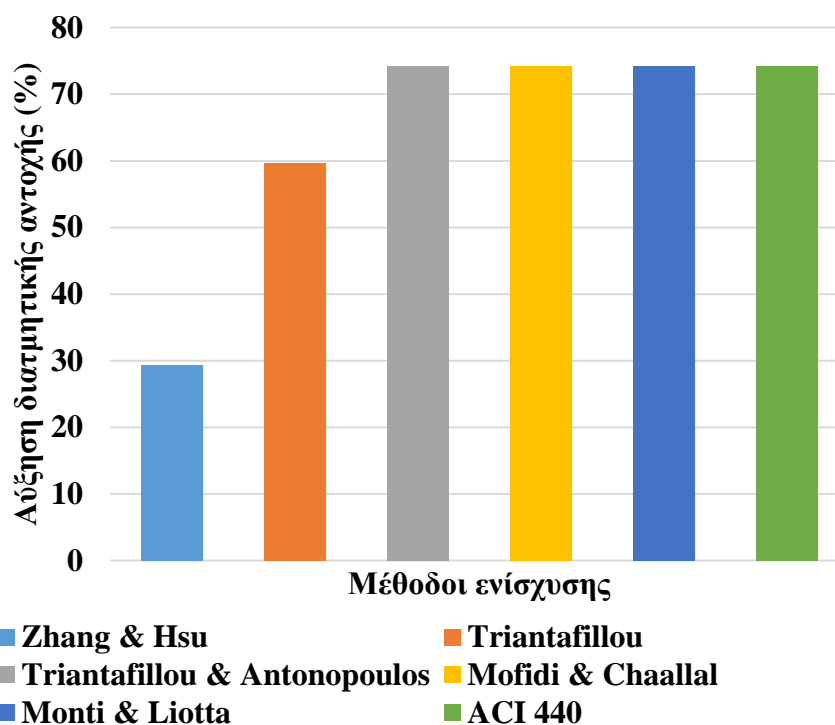
Στο σχήμα (6.10) που έπεται στη συνέχεια, έχουν σχηματιστεί οι καμπύλες της διατμητικής αντοχής της δοκού συναρτήσει της μετατόπισης στο σημείο φόρτισης. Αφορούν τη βελτίωση που παρέχει ο μανδύας ενίσχυσης στη δοκό που έχει υποστεί 35% διάβρωση του πλήρους οπλισμού της. Όμοια, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση των ράβδων ενίσχυσης, έτσι και εδώ, περισσότερες σχέσεις, πλέον, επιδεικνύουν διατμητική συμπεριφορά, καθώς έχει μειωθεί η αντοχή της δοκού λόγω αυξημένης διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι σχέσεις των Zhang & Hsu και η μεμονωμένη Triantafillou είναι αυτές που αποκρίνονται αμιγώς διατμητικά. Σε αυτές τις μεθόδους οι αντοχές που αναπτύχθηκαν είναι 105,86 kN σε μετατόπιση 5,37 mm και 130,67 kN σε μετατόπιση 6,72 mm, αντίστοιχα. Οι σχέσεις των Triantafillou & Antonopoulos και των Mofidi & Chaallal είναι αυτές που προξένησαν καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση, καθώς μετά την ανάπτυξη του φορτίου διαρροής, επιδεικνύουν κρατυνόμενη συμπεριφορά μέχρι ενός σημείου και ύστερα αστοχούν διατμητικά. Εφαρμόζοντας την ίδια παραδοχή με την κράτυνση των καμπυλών, θεωρείται σαν φορτίο αστοχίας αυτό της διαρροής. Αυτό είναι ίσο με 142,58 kN που αντιστοιχεί σε μετατόπιση 7,80 mm. Ως προς την καθολική μορφή της καμπύλης, η μεθοδολογία των Triantafillou & Antonopoulos έχει μέγιστο φορτίο 145,12 kN τη στιγμή που επέρχεται η διατμητική αστοχία στη μετατόπιση των 10,50 mm. Όμοια, οι Mofidi & Chaallal υπέδειξαν μέγιστο φορτίο κράτυνσης 151,57 kN σε μετατόπιση 18,06 mm. Οι λιγότερο συντηρητικές προσεγγίσεις των Monti & Liotta και του κανονισμού ACI 440 δεν επηρέασαν διατμητικά την πλακοδοκό. Αντίθετα, μετά τη διαρροή κρατύνονται αυξανόμενα μέχρι το πέρας της ανάλυσης. Πάλι σαν φορτίο αστοχίας, σύμφωνα με τη θεώρηση της ασφαλείας, λαμβάνεται αυτό πριν τη διαρροή-κράτυνση που είναι το ίδιο και για τις δύο άλλες σχέσεις. Δηλαδή, τα 142,58 kN με αντίστοιχη μετατόπιση 7,80 mm. Για αυτές τις σχέσεις, όταν τελειώνει η ανάλυση, το μέγιστο φορτίο είναι 156,35 kN σε μετατόπιση αντιστοιχίας των 26,97 mm.



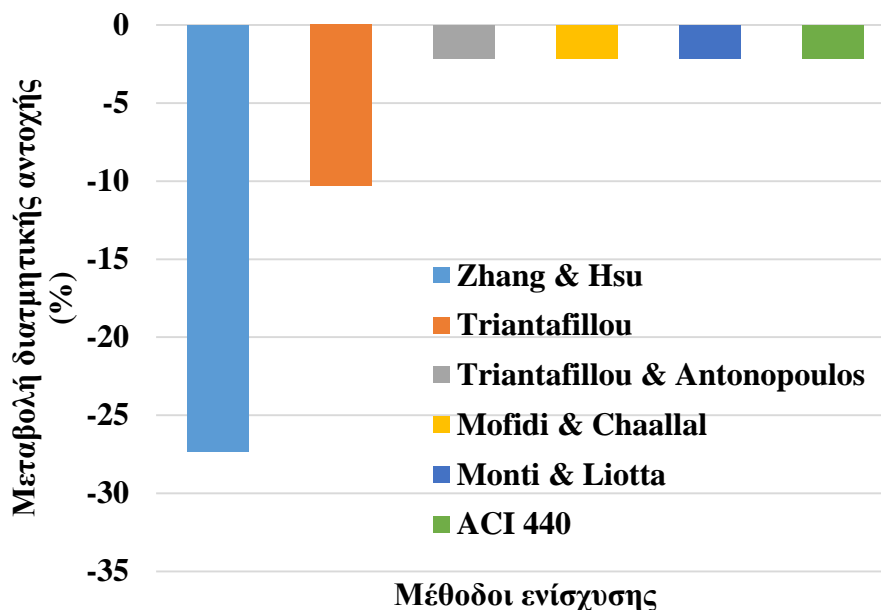
Σχήμα 6.10 Καμπύλες τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης στο σημείο φόρτισης για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%

Στο σχήμα (6.11), στο ραβδόγραμμα, παρουσιάζεται η αύξηση της αντοχής της διαβρωμένης κατά 35% δοκού, που επιφέρουν οι πρόσθετες αντοχές που λήφθηκαν υπόψη, για τις διάφορες σχέσεις ενίσχυσης με μανδύα που εξετάστηκαν. Οι δύο σχέσεις των Zhang & Hsu και του Triantafillou, που εμφάνισαν αμιγή διατμητική συμπεριφορά, κατέληξαν να συμβάλλουν σε αύξηση της αντοχής της δοκού κατά 29,36% και 59,69%, αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες σχέσεις, που ενίσχυσαν στο ίδιο επίπεδο τη δοκό, βελτίωσαν την υφιστάμενη κατάσταση του 35% διάβρωσης κατά 74,24%.

Στο ραβδόγραμμα του σχήματος (6.12) παρουσιάζεται η μεταβολή της διατμητικής αντοχής της δοκού, που προξενεί η ενίσχυση του μανδύα των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού, σε σχέση με την αρχική της κατάσταση, ήτοι τη N00 περίπτωση. Όλες οι σχέσεις με τα φορτία αντοχής που προέκυψαν, δεν αναπληρώνουν πλήρως την αντοχή της αρχικής δοκού χωρίς διάβρωση. Πιο αναλυτικά, η συντηρητική σχέση των Zhang & Hsu σημείωσε 27,34% απώλεια αντοχής σε σχέση με αυτήν της N00 περίπτωσης. Ο Triantafillou 10,1% πιο μειωμένη η αντοχή συγκριτικά με την αρχική κατάσταση της δοκού. Οι υπόλοιπες σχέσεις για πολύ λίγο δεν φτάνουν την αρχική αντοχή της δοκού. Απέχουν μόλις 2,14% από τη διατμητική ικανότητα της N00 δοκού.



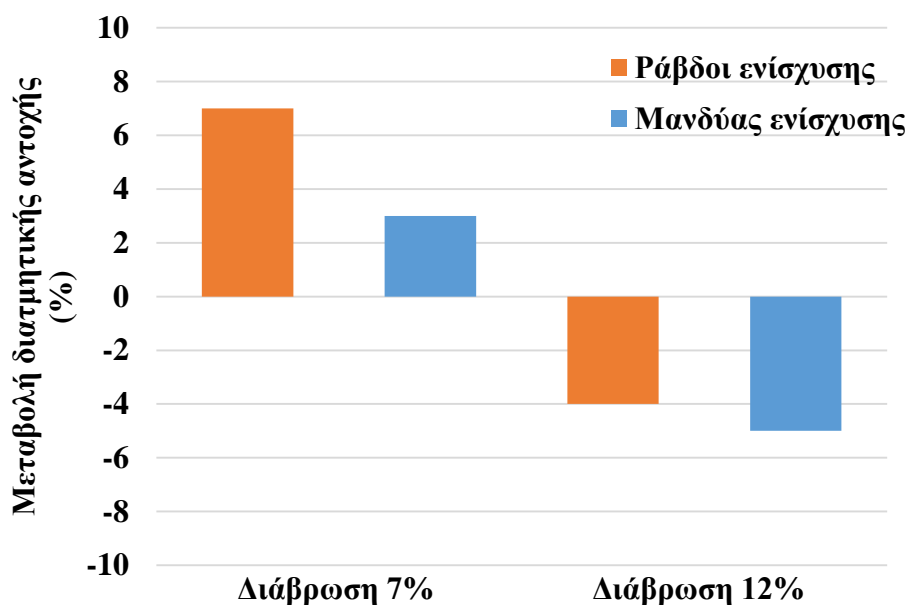
Σχήμα 6.11 Ραβδόγραμμα αύξησης αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35%



Σχήμα 6.12 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού για τις διάφορες σχέσεις του μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστό διάβρωσης δοκού 35% σε σχέση με τη N00 περίπτωση

Στο σχήμα (6.13) περιλαμβάνονται, σε μορφή ραβδογράμματος, τα αποτελέσματα των μεθόδων ενίσχυσης του πειράματος. Περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του πίνακα (2.4) που άπτονται των περιπτώσεων R07, R12, S07 και S12. Εκφράζεται η μεταβολή της διατημητικής αντοχής της δοκού στα ποσοστά διάβρωσης 7% και 12%, μόνο των συνδετήρων, που υλοποιήθηκαν πειραματικά, σε σχέση με τη N00 περίπτωση.

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του 7% διάβρωσης τα δύο ενισχυτικά μέσα συνέβαλαν εν γένει σε αύξηση της διατμητικής αντοχής της δοκού. σε σχέση με αυτήν της N00 περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι ράβδοι ενίσχυσης κατά 7% και ο μανδύας 3%. Σε ποσοστό διάβρωσης 12%, τα μέσα ενίσχυσης δεν κατόρθωσαν να αναπληρώσουν την αρχική αντοχή της πλακοδοκού. Υπήρχε απώλεια διατμητικής ικανότητας κατά 4% και 5% για τις ράβδους και τον μανδύα ενίσχυσης, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.13 Ραβδόγραμμα μεταβολής αντοχής της δοκού του πειράματος για τις ράβδους και το μανδύα ενίσχυσης σε ποσοστά διάβρωσης δοκού 7% και 12% σε σχέση με τη N00 περίπτωση

Προκύπτουν διαφορές σε σχέση με την αριθμητική προσομοίωση. Αφενός, στο πείραμα φάνηκε πιο αποδοτική η μέθοδος ενίσχυσης των ράβδων από αυτήν του μανδύα, αφού σημείωσε πιο αυξημένη αντοχή στο 7% διάβρωσης και λιγότερη απώλεια αντοχής στο 12%. Αντίθετα, στην αριθμητική προσομοίωση και γενικά από τις σχέσεις που εξετάστηκαν, η μέθοδος του μανδύα προέκυψε πιο αποδοτική, αφού στο 15% διάβρωσης οι πέντε από τις έξι σχέσεις την όπλισαν αρκετά, ώστε δεν αστόχησε καν από διατμητική αστοχία, που στην περίπτωση των ράβδων μόνο η μία (του Islam) εμφάνισε την ίδια συμπεριφορά. Αλλά και από τις θεωρητικές σχέσεις που διερευνήθηκαν πιστοποιείται η μεγαλύτερη συνεισφορά του μανδύα, καθώς η συμβολή των ράβδων κυμάνθηκε από τα 19,48 kN, που ήταν η μέθοδος Lorenzis & Nanni η πιο συντηρητική, μέχρι τα 61 kN, που αποτέλεσε τη μέθοδο του Islam. Από την άλλη, η συμβολή του μανδύα κυμάνθηκε από τα 24,05 kN, μέσω της χρήσης της σχέσης των Zhang & Hsu, έως και τα 82,16 kN, του κανονισμού του ACI 440. Αφετέρου, ασχέτως αν δεν έγινε η αριθμητική προσομοίωση στα ίδια ακριβώς ποσοστά διάβρωσης με αυτά του πειράματος, παρά σε πιο προχωρημένες (15%) έως και σε ακραίες (35%), φαίνεται η αριθμητική προσομοίωση να δίνει πιο αυξημένες τιμές. Πιο αυξημένες τιμές δίνουν και οι πιο συντηρητικές σχέσεις, πόσο μάλλον οι ακραίες σχέσεις που απέχουν αρκετά. Ωστόσο, δεν πρέπει να ανησυχεί αυτό το θέμα, που δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση με το πείραμα, όπως στην περίπτωση της προσομοίωσης της N00 περίπτωσης και της διαβρωμένης κατάστασης. Το πείραμα από τη μία, είναι αρκετά περιορισμένο καθώς με μόλις 9 δοκίμια επιδιώκει να προσομοιώσει τρεις φάσεις διάβρωσης και δύο

μεθόδους ενίσχυσης. Θα έπρεπε σίγουρα να διενεργηθούν περισσότερα πειράματα ή στο ίδιο πείραμα να υπάρχουν τουλάχιστον τρία δοκίμια από κάθε περίπτωση διάβρωσης και ενίσχυσης. Δηλαδή, να κατασκευαστούν 27 τουλάχιστον δοκίμια. Γεγονός αρκετά δαπανηρό, εξού και η αναγκαιότητα αριθμητικών προσομοιώσεων. Ενδεχομένως να μην επιτελέστηκαν και όπως θα έπρεπε οι μέθοδοι ενίσχυσης. Από την άλλη, ίσως οι θεωρητικές σχέσεις που αξιοποιήθηκαν να μην καλύπτουν αρκετά όλο το εύρος των περιπτώσεων. Οι σχέσεις των περιορισμένων κανονισμών που κυκλοφορούν, που βασίζονται σε μεθοδολογίες ατομικών και ιδρυματικών εργασιών, αλλά και οι ίδιες οι εργασίες που ακόμα δεν έχουν ευρεία πιστοποίηση και εγκυρότητα σε όλα τα εύρη των περιπτώσεων ενδεχομένως να μην είναι οι κατάλληλες. Αυτό διότι όλες αυτές οι σχέσεις προκύπτουν από στατιστική ανάλυση κάποιων πειραματικών δοκιμίων με παραδοχές και θεωρήσεις των εκάστοτε ατόμων που μετέχουν στη μόρφωση αυτών των σχέσεων. Έτσι, απαιτούνται περισσότερα δεδομένα αλλά και περισσότερες πειραματικές διαδικασίες, ώστε να βαθμονομηθούν οι σχέσεις κατάλληλα και για περισσότερες εφαρμογές.

Ωστόσο, μακροσκοπικά, η αριθμητική προσομοίωση πέτυχε το σκοπό της, καθώς κάθε σχέση συνέβαλε στην ανάπτυξη πρόσθετης αντοχής. Μάλιστα, πιστοποιείται και από το πείραμα το γεγονός ότι οι μέθοδοι ενίσχυσης, όχι απλά αμέσως μετά την εφαρμογή τους, αλλά και με το πέρας κάποιου συγκεκριμένου ποσοστού διάβρωσης, εξακολουθούν να συμβάλουν στην πρόσθετη αντοχή της δοκού. Αντίθετα, ύστερα από προχωρημένη διάβρωση, ακόμα και η εφαρμογή μεθόδων ενίσχυσης αδυνατεί να αναπληρώσει πλήρως την αρχική διατμητική ικανότητα των δοκών.

Σχετικά με τη λήψη των φορτίων για τον προσδιορισμό της αντοχής της δοκού στις διάφορες σχέσεις των δύο μεθόδων ενίσχυσης στα δύο σενάρια της διάβρωσης, που λήφθηκε αυτό κατά τη διαρροή, επισημαίνεται πως είναι και υπέρ της ασφαλείας. Σαφώς, αν κρατύνεται το μοντέλο δύναται να αποκριθεί πιο πλάστιμα και όχι ψαθυρώς διατμητικά και να αναπτύξει και μεγαλύτερη αντοχή προφανώς από αυτή της πρώτης διαρροής. Όμως, έτσι όπως μορφώθηκε το μοντέλο στο OpenSees με τις διάφορες παραδοχές μπορεί να υπάρχουν και αστοχίες αριθμητικές που να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Για αυτό μια ασφαλής προσέγγιση είναι να ληφθεί υπόψη η απόκριση και η αντοχή μιας κατασκευής μέχρι εκείνο το σημείο και να αμεληθεί η συμπεριφορά κράτυνσης. Άλλωστε και το plateau της κράτυνσης δεν απέχει πολύ από το φορτίο της διαρροής, επομένως δεν ξεφεύγει αρκετά από το σκοπό της η μεθοδολογία προσομοίωσης της ενίσχυσης μαζί με τις θεωρήσεις της.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η ανάλυση και η σχεδίαση μίας ενισχυμένης πλακοδοκού έναντι διάβρωσης. Αρχικά, η περίπτωση της δοκού, χωρίς να έχει υποστεί διάβρωση και να έχει εφαρμοστεί πάνω σε αυτή κάποιο ενισχυτικό μέσο, προσομοιώθηκε αριθμητικά με δύο μεθόδους, με τα μικροσκοπικά πεπερασμένα στοιχεία και με μακροστοιχεία. Έγινε βαθμονόμηση και των δύο μοντέλων με τέτοιον τρόπο, ώστε να προσεγγίσουν όσο καλύτερα γίνεται το πραγματικό πείραμα. Κατόπιν, μέσω μακροπροσομοίωσης, εξετάστηκε η απόκριση της δοκού έναντι διάβρωσης. Διερευνήθηκαν δύο περιπτώσεις διάβρωσης οπλισμού, μεμονωμένα των συνδετήρων και αυτών μαζί με το διαμήκη, σε πέντε ποσοστά διάβρωσης, 7%, 15%, 20%, 25% και 35%. Ύστερα, πάλι με μακροπροσομοίωση, εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι ενίσχυσης, αυτές των ενσωματωμένων ράβδων και του εξωτερικού συνεχούς μανδύα, με σκοπό να προβλεφθεί η ενισχυμένη αντοχή της δοκού. Μελετήθηκαν έξι σχέσεις για κάθε μέθοδο ενίσχυσης από την υφιστάμενη βιβλιογραφία. Η ανάλυση έγινε σε δύο σενάρια διάβρωσης, εφαρμογή ενίσχυσης στο 15% διάβρωσης του πλήρους οπλισμού και εξέλιξη αυτής μέχρι το 35% μαζί με την ενίσχυση. Είναι, συνεπώς, δεδομένο πως σε όλη αυτή τη διαδικασία προσομοίωσης προέκυψε μία πληθώρα συμπερασμάτων.

Κατά την αριθμητική ανάλυση του φορέα, χωρίς την επίδραση και χωρίς την εφαρμογή κάποιων μέσων ενίσχυσης, με τη μέθοδο των μικροσκοπικών πεπερασμένων στοιχείων, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσής του με το λογισμικό του Abaqus. Αρχικά, κατά την εκτέλεση της ελαστικής ανάλυσης για την εύρεση μίας βέλτιστης διακριτοποίησης και τη χρήση ενός κατάλληλου πεπερασμένου στοιχείου για την προσομοίωση της δοκού, προέκυψε ότι το εικοσακομβικό C3D20R μειωμένης ολοκλήρωσης ήταν η πιο κατάλληλη λύση. Αυτό, διότι συνδύασε τη μικρότερη απόκλιση σε τρία εξεταζόμενα μεγέθη, της εγκάρσιας μετατόπισης της δοκού, της ορθής τάσης της δοκού και την τάση του χάλυβα στην πλέον εφελκόμενη περιοχή της δοκού, στο μικρότερο αριθμό βαθμών ελευθερίας και σε πολύ μικρό χρόνο εκτέλεσης. Ως προς το υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και πιο συγκεκριμένα, για το σκυρόδεμα, φάνηκε πως το μοντέλο πλαστικής βλάβης (CDP) ήταν μία ορθή επιλογή για την περιγραφή της μη γραμμικής απόκρισης του φορέα, συνδυάζοντας όλες τις ιδιαιτερότητες της συμπεριφοράς του υλικού αυτού. Το αποτέλεσμα της αριθμητικής αυτής προσομοίωσης με τις παραδοχές και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν προσέγγισε μακροσκοπικά με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά. Το φορτίο αστοχίας ήταν 140,51 kN έναντι των 143 του πειράματος, σε μετατόπιση 7,75 mm σε σχέση με τα 7,39 mm πάλι του πειράματος. Δηλαδή η προσομοίωση είχε απόκλιση κατά 1,74% και 4,87% σε αυτά τα μεγέθη αντίστοιχα. Μικροσκοπικά, το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος της βλάβης, οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, στη φάση επίτευξης του μέγιστου φορτίου, απέδωσαν με μεγάλη ακρίβεια τη μορφή, το σχηματισμό και τη διάδοση ρωγμών. Τέλος, κατά τη διερεύνηση τεσσάρων βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το μοντέλο CDP προέκυψαν κάποιες παρατηρήσεις. Το ιξώδες δεν επηρεάζει την ελαστική απόκριση του φορέα, παρά αυτή μετά τη διαρροή. Μείωση της τιμής του συνεπάγεται και μείωση του καθοδικού κλάδου της καμπύλης. Η αύξηση των τιμών της γωνίας διάδοσης και

της ενέργειας θραύσης συντελεί σε πιο στιβαρή απόκριση του φορέα. Το κριτήριο διαρροής Rankine είναι λιγότερο αυστηρό από το Drucker-Prager.

Κατά την αριθμητική ανάλυση της ίδιας περίπτωσης, αλλά με τη μέθοδο των μακροστοιχείων μέσω του λογισμικού OpenSees, προέκυψαν αρκετά σημαντικά συμπεράσματα. Συγκριτικά με την προσομοίωση με τα μικροσκοπικά πεπερασμένα στοιχεία, προκύπτει ότι το ίδιο πρόβλημα αναλύεται με την ίδια ακρίβεια αλλά με πολύ λιγότερο υπολογιστικό κόστος. Η ανάλυση με το Abaqus πραγματοποιήθηκε σε 1488 δευτερόλεπτα, ενώ στο OpenSees σε ελάχιστα δευτερόλεπτα, δηλαδή στιγμιαία. Αυτό οφείλεται στο ότι το πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί με ελάχιστους βαθμούς ελευθερίας και λίγα στοιχεία, με έξι μόλις στη συγκεκριμένη περίπτωση. Εν αντιθέσει, τα μικροσκοπικά απαιτούν κάποιους χιλιάδες βαθμούς ελευθερίας. Σχετικά με την ίδια τη μακροπροσομοίωση, ως προς την τεχνολογία στοιχείου προέκυψε πως το στοιχείο κατανεμημένης πλαστικότητας με πολυστρωματική θεώρηση της διατομής και συνδυασμό του Section Aggregator, με τη μέθοδο των δυνάμεων ήταν αυτό απέδωσε αποτελέσματα. Αντίθετα, η εναλλακτική αυτού, ήτοι η χρήση του στοιχείου με τη μέθοδο των μετατοπίσεων προξένησε τη μη σύγκλιση της ανάλυσης. Η παρούσα μακροπροσομοίωση με τις παραδοχές και τις παραμέτρους των υλικών που υιοθετήθηκαν, περιέγραψε με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική απόκριση της δοκού. Συγκεκριμένα, τα δύο υλικά που αξιοποιήθηκαν για την αποτύπωση της διατμητικής συμπεριφοράς, το Concrete02 και το Hysteretic, έβγαλαν ως μέγιστο φορτίο αστοχίας τις τιμές 145,70 kN και 143,93 kN, που αποκλίνουν από το πείραμα κατά 1,89% και 0,65%, αντίστοιχα. Οι μετατοπίσεις των μέγιστων φορτίων είναι 7,26 mm και 7,28 mm, για τα δύο υλικά αντίστοιχα, που σημειώνουν απόκλιση από το πραγματικό δοκίμιο ίση με 1,76% και 1,49%. Προκύπτει, επομένως, το συμπέρασμα ότι το Hysteretic υλικό είναι αρκετά αξιόπιστο, κατάλληλο και πιο ακριβές από το Concrete02, για την επακριβώς περιγραφή της καμπύλης του δοκιμίου. Ωστόσο, απαιτεί περισσότερες δοκιμές και παραμέτρους για την ακριβή βαθμονόμησή του, γεγονός που το καθιστά λιγότερο εύρηστο. Έτσι, με το Concrete02, που έχει ελάχιστα ορίσματα, καθίσταται ικανή η προσομοίωση μέσω μακροστοιχείων της πραγματικής μη γραμμικής απόκρισης ενός φορέα με ικανοποιητική ακρίβεια, όπως δείχτηκε.

Κατά την προσομοίωση της διάβρωσης με τη χρήση, πάλι μακροστοιχείων, εξάχθηκαν και εδώ σημαντικές παρατηρήσεις. Με τον τρόπο με τον οποίο αναλύθηκε, προέκυψε πως η παράμετρος του λόγου νερού προς τσιμέντο (w/c) είναι η κατεξοχήν παράμετρος που καθορίζει το χρόνο έναρξης της διάβρωσης. Μεγάλος λόγος αντιστοιχεί σε γρήγορη εμφάνιση της διάβρωσης. Μετά, η ίδια παράμετρος σε συνδυασμό με την επικάλυψη οποιουδήποτε στοιχείου επηρεάζουν την εξέλιξη της διάβρωσης στο στοιχείο αυτό. Η διάβρωση του διαμήκους οπλισμού εξελίσσεται με πιο αργό ρυθμό από αυτόν των συνδετήρων. Το φαινόμενο της διάβρωσης επιδρά σημαντικά στην απομείωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος και του χάλυβα που προσβάλλονται. Ως προς την ανάλυσή της αριθμητικά, το ένα ποσοστό από τα πέντε που εξετάστηκαν ταυτίζεται σχεδόν με το πραγματικό δοκίμιο, οπότε φαίνεται να έγινε ορθά η μελέτη της. Στην πραγματικότητα υπήρχε απώλεια αντοχής κατά 11% στην περίπτωση διάβρωσης 7% μόνο των συνδετήρων. Στην αριθμητική μακροπροσομοίωση προέκυψε απώλεια ίση με 10,57%. Πολύ κοντινά αποτελέσματα. Στα υπόλοιπα τέσσερα ποσοστά διάβρωσης 15%, 20%, 25% και 35%, η απώλεια εξελίχθηκε σε 21,28%, 27,64%,

32,95% και 42,75%, αντίστοιχα. Εύλογα διαφαίνεται, λοιπόν, πόσο σημαντική είναι η επιρροή της διάβρωσης στη διατμητική ικανότητα της δοκού. Στην περίπτωση διάβρωσης ολόκληρου του οπλισμού, φαίνεται πως η πρόσθετη διάβρωση του διαμήκους οπλισμού επηρέασε ελάχιστα τη συνολική απόκριση. Τα ποσοστά απώλειας αντοχής κυμάνθηκαν ως εξής για τα ποσοστά διάβρωσης 7%, 15%, 20%, 25% και 35%: 10,88%, 22,07%, 28,09%, 34,05% και 43,83%, αντίστοιχα, λίγο πιο αυξημένα, δηλαδή, από αυτά των διαβρωμένων αμιγώς συνδετήρων.

Τέλος, κατά την προσομοίωση, με μακροστοιχεία, της ενίσχυσης του φορέα προέκυψαν και εδώ παρατηρήσεις και συμπεράσματα. Από τις δώδεκα σχέσεις της βιβλιογραφίας που εξετάστηκαν, προέκυψε πως η μέθοδος ενίσχυσης του εξωτερικού συνεχούς μανδύα είναι η πιο αποδοτική μέθοδος, σε σχέση με τις ράβδους ενίσχυσης για τα δεδομένα χαρακτηριστικά του πειράματος. Η πρόσθετη συνεισφορά στην ολική τέμνουσα της δοκού, των ράβδων ενίσχυσης κυμάνθηκε από 19,48 kN έως 61 kN, ενώ η συμβολή του μανδύα από 24,05 kN έως 82,16 kN. Στη διάβρωση του 15%, τέσσερις σχέσεις των ράβδων ενίσχυσης αστόχησαν διατμητικά, μία καμπτοδιατμητικά και μία ανέπτυξε κράτυνση. Η αντοχή της δοκού στην υφιστάμενη κατάσταση, σύμφωνα με τις σχέσεις των ράβδων, αυξήθηκε από 17,34% έως 35,29%, ενώ σε σχέση με την αρχική αντοχή υπήρχε απώλεια αντοχής για τρεις σχέσεις από 8,55% έως 6,55%, ενώ οι άλλες τρεις σημείωσαν αύξηση από 5,32% ως 5,44%. Στο ίδιο ποσοστό διάβρωσης, πέντε σχέσεις από τις έξι του μανδύα αρκούν ώστε να την υπεροπλίσουν και να μην αστοχήσει διατμητικά, αλλά να κρατυνθεί. Μόνο μία σχέση αστόχησε διατμητικά. Η αύξηση της αντοχής της υφιστάμενης δοκού είναι από 21,29% έως το όριό της το 35,29%. Ως προς την αρχική αντοχή, μόνο η μία σχέση είχε απώλεια αντοχής 5,38%, ενώ οι υπόλοιπες την αύξησαν κατά 5,44%. Ως προς τη διάβρωση του 35%, όλες οι σχέσεις των ράβδων αστόχησαν διατμητικά. Εδώ, η αντοχή της δοκού αμέσως μετά την επιβολή της ενίσχυσης αυξήθηκε από 23,59% έως 73,3%, ενώ σε σχέση με την αρχική αντοχή, η τωρινή είναι μειωμένη από 30,59% έως 2,64%. Αντίστοιχα, ο μανδύας εμφάνισε δύο σχέσεις με αμιγή διατμητική αστοχία, δύο με καμπτοδιατμητική και άλλες δύο με αυξανόμενη κράτυνση. Η αύξηση της αντοχής στην τωρινή κατάσταση κυμάνθηκε από 29,36% έως 74,24%, ενώ σε σχέση με την αρχική αντοχή της μειώθηκε από 27,34% έως 2,14%. Ποιοτικά, οι μέθοδοι ενίσχυσης είναι αρκετά αποτελεσματικές σε σημείο που επαρκούν να οπλίσουν τη δοκό με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αστοχήσει καν διατμητικά. Στο 15% διάβρωσης υπάρχει και απώλεια και βελτίωση της συμπεριφοράς σε σχέση με την αρχική και από τις δύο μεθόδους ενίσχυσης, ανάλογα τις σχέσεις που εξετάζονται. Στο 35% δεν επιτυγχάνεται από πουθενά η αναπλήρωση της απώλειας.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής επεδίωξε τη διερεύνηση αρκετών θεμάτων και πρότεινε μεθόδους προσομοίωσης, αποτίμησης και ενίσχυσης δοκών έναντι διάβρωσης. Ωστόσο, υπάρχουν και θέματα που δεν εξετάστηκαν ή εναλλακτικές μεθοδολογίες που δεν ακολουθήθηκαν ή υιοθετήθηκαν παραδοχές που δεν έχουν εξεταστεί. Όλα αυτά δύνανται να αποτελέσουν έναυσμα για τη διενέργεια πρόσθετων ερευνών ή μελέτης νέων προβλημάτων. Αρχικά, η φύση της παρούσας προσομοίωσης ήταν η εφαρμογή στατικής pushover. Έτσι, προτείνεται να αντιμετωπιστεί το ίδιο πρόβλημα σε δυναμική ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ώστε να εξεταστεί πως θα

συμπεριφερθούν αυτά τα υλικά με κυκλικούς νόμους με τις ίδιες παραμέτρους, αλλά και να βαθμονομηθούν εκ νέου. Μία δεύτερη πρόταση είναι η εκτενέστερη βιβλιογραφική αναζήτηση σχέσεων ενίσχυσης που να προσεγγίσουν, ενδεχομένως καλύτερα το πείραμα. Μία τρίτη, που έρχεται σε συμφωνία και με τη δεύτερη, είναι η επιχείρηση προσδιορισμού και άλλης σχέσης εύρεσης ενεργού παραμόρφωσης ή τάσης που να βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα μεγαλύτερου εύρους. Αυτές οι σχέσεις που εξετάστηκαν, βασίστηκαν σε στατιστική ανάλυση που ενδεχομένως να απείχε το παρόν πείραμα. Τέταρτο, από την πλευρά του ίδιου του πειράματος, να εκτελεστούν περισσότερες δοκιμές στην ίδια περίπτωση N, R και S της δοκού ώστε να ληφθούν μέσοι όροι του πειράματος και όχι τα δεδομένα από μεμονωμένες δοκιμές. Δηλαδή, να αυξηθούν τα δοκίμια ελέγχου σε κάθε πειραματική απόπειρα. Πέμπτο, να δοκιμαστεί πειραματικά και η διάβρωση του διαμήκους σπλισμού, αλλά και να εξεταστούν περισσότερα επίπεδα διάβρωσης. Τέλος, μία διερεύνηση που θα προτεινόταν, θα ήταν αφενός να εξεταστούν οι ίδιες μέθοδοι ενίσχυσης, αλλά με διαφορετικές διατάξεις, τόσο των ράβδων όσο και του μανδύα και αφετέρου να μελετηθούν και άλλα υλικά ενισχύσεων πέραν του CFRP.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACI. (2008). *ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI. (2015). *ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Andrade, C. (2007). Corrosion of steel reinforcement. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, 28, 185-216. Ανάκτηση από <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/9781845640323/9781845640323006FU1.pdf>
- ASTM. (2009). *ASTM C876-09. Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. West Conohocken: ASTM International.
- Bastidas-Arteaga, E. (2018). Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Corrosion-Fatigue and Climate Change. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(10). doi: 10.1186/s40069-018-0235-x
- Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair* (2nd εκδ.). London: Taylor and Francis.
- Bui, L., Stitmannathum, B., & Ueda, T. (2020). Experimental Investigation of Concrete Beams Strengthened with Embedded Through-Section Steel and FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, 24(5), 04020052. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001055
- Bukhari, I., Vollum, R., Ahmad, S., & Sagaseta, J. (2013). Shear Strengthening of Short Span Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3), 523–536. doi:10.1007/s13369-012-0333-z
- Chajes, M., Rollins, T., Dai, H., & Murphy, T. (2019). *Report on Techniques for Bridge Strengthening: Main Report*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Choe, D.-E., Gardoni, P., Rosowsky, D., & Haukaas, T. (2008). Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(3), 383-393. doi:10.1016/j.ress.2006.12.015.
- CNR. (2004). *CNR-DT 200/2004: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. Rome: Consiglio Nazionale delle Ricerche.

- Dias, S., & Barros, J. (2013). Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates: Experimental research and analytical formulation. *Composite Structures*, 99, 477-490. doi:10.1016/j.compstruct.2012.09.026.
- Dong, B., Fang, G., Liu, Y., Dong, P., Zhang, J., Xing, F., & Hong, S. (2017). Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking by X-ray microcomputed tomography method. *Cement and Concrete Research*, 100, 311-321. doi:10.1016/j.cemconres.2017.07.009.
- El-Maaddawy, T., & Chekfeh, Y. (2013). Shear Strengthening of T-Beams with Corroded Stirrups Using Composites. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, 110(5), 779-790. doi:https://doi.org/10.14359/51685831
- El-Maaddawy, T., & Soudki, K. (2003). Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 14-47. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(41)
- European Committee, f. S. (2002). *EN 1990: Eurocode - Basis of structural design*. Brussels: CEN.
- European Committee, f. S. (2004). *EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. Brussels: CEN.
- fib, I. F. (2010). *Model Code 2010*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib).
- Fragiadakis, M. (2020). *Lecture Notes: Nonlinear Analysis of Frame Structures under Seismic Loading*. Athens: National Technical University of Athens.
- Genikomsou, A., & Polak, M. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering Structures*, 98, 38-48. doi:10.1016/j.engstruct.2015.04.016
- Hillerborg, A., Mod er, M., & Petersson, P.-E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6(6), 773-781. doi:10.1016/0008-8846(76)90007-7
- impact.nace.org. (2013). *ECONOMIC IMPACT*. Retrieved March 7, 2021, from impact.nace.org: <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>
- Islam, A. (2009). Effective methods of using CFRP bars in shear strengthening of concrete girders. *Engineering Structures*, 31(3), 709-714. doi:10.1016/j.engstruct.2008.11.016.
- Jacobson, G. (2016). *NACE International's IMPACT Study Breaks New Ground in Corrosion Management Research and Practice*. Washington, DC: National Academy of Sciences.

- Koch, G., Brogers, P., Thompson, N., Virmani, Y., & Payer, J. (2002). *Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States, FHWA Report*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Lee, J., & Fenves, G. (1998). Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892-900. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)
- Lorenzis, L., & Nanni, A. (2001). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods. *Aci Structural Journal*, 98(1), 60-68. Ανάκτηση από <https://www.researchgate.net/publication/247509705>
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299-326. doi:10.1016/0020-7683(89)90050-4
- Mazzoni, S., & McKenna, F. (2006). *OpenSees Example 2c. Nonlinear Cantilever Column: Inelastic Uniaxial Materials in Fiber Section*. Ανάκτηση από OpenSeesWiki: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_Example_2c._Nonlinear_Cantilever_Column:_Inelastic_Uniaxial_Materials_in_Fiber_Section
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., Fenves, G., & et al. (2006). *OpenSees Command Language Manual*. Berkeley: University of California, Berkeley.
- Mercan, B., Schultz, A., & Stolarski, H. (2010). Finite element modeling of prestressed concrete spandrel beams. *Engineering Structures*, 32(9), 2804-2813. doi:10.1016/j.engstruct.2010.04.049
- Mofidi, A., & Chaallal, O. (2011). Shear Strengthening of RC Beams with Externally Bonded FRP Composites: Effect of Strip-Width-to-Strip-Spacing Ratio. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 732-742. doi:doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000219
- Mofidi, A., & Chaallal, O. (2014). Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 117-128. doi:10.1007/s40069-013-0060-1
- Monti, G., & Liotta, M. (2007). Tests and design equations for FRP-strengthening in shear. *Construction and Building Materials*, 21(4), 799-809. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006180600122X>
- Ou, Y.-C., Fan, H.-D., & Nguyen, N. (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. doi:10.1002/eqe.2316
- Ouzaa, K., & Oucif, C. (2019). Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures. *Underground Space*, 4(1), 72-77. doi:10.1016/j.undsp.2018.06.002.

- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583-599. doi:10.1016/0008-8846(73)90096-3
- Qin, S., Dirar, S., Yang, J., Chan, A., & Elshafie, M. (2015). CFRP Shear Strengthening of Reinforced-Concrete T-Beams with Corroded Shear Links. *Journal of Composites for Construction*, 19(5), 04014081. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000548
- Scott, M. (2011, January 26). Numerical Integration Options for the Force-Based Beam-Column Element in OpenSees. Corvallis, Oregon, United States of America. Ανάκτηση από <https://opensees.berkeley.edu/wiki/images/a/ab/IntegrationTypes.pdf>
- Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9*. Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Stephen, N. (1980). Timoshenko's Shear Coefficient From a Beam Subjected to Gravity Loading. *Journal of Applied Mechanics*, 47(1), 121-127. doi:<https://doi.org/10.1115/1.3153589>
- Taucer, F., Spacone, E., & Filippou, F. (1991). *A FIBER BEAM-COLUMN ELEMENT FOR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES*. Berkeley: University of California, Berkeley.
- Triantafyllou, T. (1998). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. *ACI Structural Journal*, 95(2), 107-115.
- Triantafyllou, T., & Antonopoulos, C. (2000). Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP. *Journal of Composites for Construction*, 4(4), 198-205. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(198)
- Valerio, P., Ibell, T., & Darby, A. (2009). Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening. *Structures and Buildings*, 162(5), 311-321. doi:10.1680/stbu.2009.162.5.311
- Vieira, A. d. (2020). *Strengthening of Existing Reinforced Concrete Structures*. Nottingham: The University of Nottingham.
- Washington, D. C. (2021). *Field Listing-Coastline*. Ανάκτηση από The World Factbook: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/coastline/>
- Παπαδρακάκης, Μ. (1998). *Μη Γραμμικά Πεπερασμένα Στοιχεία*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Παπαδρακάκης, Μ. (2001). *Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Παπαδρακάκης, Μ. (2013). *Μαθήματα Στατικής V Πλαστική ανάλυση ραβδωτών φορέων*. Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ.