



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ & ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Ω/Σ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Καφεντζής Λάμπρος**

Επιβλέπων Καθηγητής : Τριανταφύλλου Σάββας

Αθήνα, Ιούλιος 2023

---



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η εργασία αυτή σηματοδοτεί το πέρας των σπουδών μου στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και την αρχή της πορείας μου πλέον ως Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός.

Θέλω να ευχαριστήσω ειλικρινά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Τριανταφύλλου Σάββα. Καθοδηγητικός από την πρώτη στιγμή, αμεσότατος στον χαρακτήρα και στις ανταποκρίσεις του και καταρτισμένος με αξιοσημείωτες γνώσεις και εμπειρία με βοήθησε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον ζήτημα.

Φυσικά, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κατερίνα και Στέφανο, τις αδερφές μου Μαρία και Κωνσταντίνα και όλη την υπόλοιπη οικογένεια μου για την απεριόριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους που με εμπύχωναν και τους συμφοιτητές που γνώρισα και με τους οποίους είχαμε άριστη συνεργασία, συναδελφικότητα και εποικοδομητικές συζητήσεις είτε εντός είτε εκτός της σχολής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. που προσπάθησαν και προσπαθούν να καλλιεργήσουν Πολιτικούς Μηχανικούς του αύριο σύμφωνα με σωστά γνωστικά πρότυπα και ηθικές.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Όσο σημαντική είναι η σωστή μελέτη και κατασκευή ενός έργου πολιτικού μηχανικού, άλλο τόσο σημαντική είναι η σωστή συντήρησή του για ανθεκτικότητα στον χρόνο.

Στην Ελλάδα του 21<sup>ου</sup> αιώνα, σε σημαντικό ποσοστό των υφιστάμενων κτιρίων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα έχει ξεπεραστεί το συμβατικό όριο διάρκειας ζωής (περί τα 50 έτη). Είναι αυτονόητη λοιπόν η επέμβαση στα κτίρια αυτά και η ενίσχυσή τους προκειμένου να δύνανται να ανταπεξέλθουν στις επερχόμενες σεισμικές απαιτήσεις είτε ως προς των διατμητικές και των καμπτικές καταπονήσεις είτε ως προς απαιτούμενες μετακινήσεις δηλαδή πλαστιμότητα.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση δύο σχετικά σύγχρονων μεθόδων για ενίσχυση υποστυλωμάτων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Οι μέθοδοι αυτές είναι η NSM και η TRM. Η προσομοίωση έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πιο συγκεκριμένα με το λογισμικό ABAQUS. Απώτερος σκοπός ήταν αφενός η διαπίστωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων από το λογισμικό σε σύγκριση με αποτελέσματα πραγματικού πειράματος και αφετέρου η περαιτέρω διερεύνηση ώστε να εξακριβωθεί η αποδοτικότητα των μεθόδων και σαν αποτελέσματα να δοθούν εμπειρικά διαγράμματα γενικής εποπτείας για την απόκριση των ενισχυμένων υποστυλωμάτων.

Το σκυρόδεμα προσομοιώθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα Concrete Damage Plasticity και η διακριτοποίηση του έγινε με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Για τους οπλισμούς από χάλυβα και τις ενισχύσεις από Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRPs) ή Ανοξείδωτο Χάλυβα, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δικτυώματος ενσωματωμένα πλήρως στο σκυρόδεμα και γραμμικά ελαστικά υλικά είτε με κράτυνση είτε με ψαθυρή αστοχία – θραύση είτε με πλάστιμη αστοχία. Η ανάλυση έγινε με την μέθοδο των μετατοπίσεων με χρήση του ABAQUS/Explicit. Πέραν των παραμετρικών αναλύσεων, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε να γίνει η τελική επιλογή των διαφόρων χαρακτηριστικών του μοντέλου, παρουσιάζονται αποτελέσματα ως προς:

- (α) κυκλική φόρτιση των υποστυλωμάτων καθώς και
- (β) μονοτονική φόρτιση υπό την μορφή διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης.

*Λέξεις Κλειδιά:* « Καμπτική Ενίσχυση, Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Υποστυλώματα, Πεπερασμένα Στοιχεία, ABAQUS/Explicit, NSM, TRM, Concrete Damage Plasticity, Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης, Κυκλική Φόρτιση, Μονοτονική Φόρτιση, Ινοπλισμένα Πολυμερή – FRP, Ανοξείδωτος Χάλυβας, Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας »



## ABSTRACT

Maintenance after the implementation of a civil engineering project is as crucial as the planning and construction of it, securing the resistance over time.

Currently in Greece a significant percentage of existing reinforced concrete buildings has exceeded its conventional lifetime (about 50 years). Thus, strengthening vis-a-vis shear and/or flexural resistance is mandatory so that they can cope with the increased plasticity demands that current design standards.

This diploma thesis deals with the simulation of two relatively modern techniques for flexural strengthening of Reinforced Concrete columns. These two methods are known as NSM (near surface mounted) reinforcement and TRM (textile reinforced mortar). For the simulation, the finite element method was used via the ABAQUS 2018 software. The goal was on the one hand to establish the validity of the results from the software in comparison with real experiment results and on the other hand to further investigate the efficiency of the strengthening methods that were used and as a result to create empirical diagrams about the response of retrofitted columns.

To simulate the constitutive response of concrete, the Concrete Damage Plasticity model and 3D continuum solid elements were used. The steel (Carbon or Stainless) and FRPs reinforcement, were simulated with 1D truss elements and elastic materials with hardening slope, brittle or ductile damage. All the analyses were carried out with the ABAQUS/Explicit solver. In addition to the parametric analyses during the simulation in order to make the final choices of the various characteristics of the model, results are presented in terms of:

- (a) cyclic loading of the columns as well as
- (b) monotonic loading in the form of Interaction Diagrams.

**Keywords:** « *Flexural Strengthening, Reinforced Concrete, Columns, Finite Elements, ABAQUS/Explicit, NSM, TRM, Concrete Damage Plasticity, Interaction Diagrams, Cyclic Reverse Loading, Monotonic Loading, Fiber Reinforced Polymers – FRP, Stainless Steel, Textile Reinforced Mortar* »



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	III
ABSTRACT .....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XVI
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	5
1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	7
1.4 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	7
<b>2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....</b>	<b>9</b>
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	9
2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ NSM.....	10
2.2.1 ΥΛΙΚΑ.....	10
2.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	15
2.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ TRM .....	18
<b>3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....</b>	<b>23</b>
3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	23
3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	28
3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	32
<b>4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕΛΟΥΣ.....</b>	<b>35</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ABAQUS.....	35
4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	37
4.2.1 ABAQUS/Standard .....	37
4.2.2 ABAQUS/Explicit .....	40
4.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ vs ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ .....	44
4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	48
4.3.1 ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	48
4.3.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ .....	54
4.3.2.1 ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ .....	58
4.3.2.2 ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ.....	64
4.3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	67

4.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ .....	72
4.4.1	ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	72
4.4.2	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ .....	75
4.5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ .....	83
4.5.1	NSM .....	83
4.5.2	TRM.....	86
<b>5</b>	<b>ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MODEL VALIDATION) .....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ .....</b>	<b>113</b>
6.1	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ Ν ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ NSM ΑΝΑ ΠΛΕΥΡΑ .....	117
6.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΙ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ NSM ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ .....	120
6.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ Σ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ TRM .....	121
6.4	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ NSM-CFRP/TRM.....	124
6.5	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ .....	126
<b>7</b>	<b>ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....</b>	<b>135</b>
7.1	ΣΥΝΟΨΗ .....	135
7.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	136
<b>8</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>139</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Στατιστικά στοιχεία χρονολογίας κατασκευής των κατοικιών στην Ελλάδα και εκάστοτε ισχύοντος Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2011).....	2
Σχήμα 1.2 : Στατιστικά στοιχεία υλικού κατασκευής κατοικιών (ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2011).....	3
Σχήμα 1.3: α) Διατμητική αστοχία υποστύλωματος β) Αστοχία οπλισμών στην πλαστική άρθρωση γ) Αποφλοιώση σκυροδέματος - Διάβρωση οπλισμών.....	4
Σχήμα 2.1: Ράβδοι οπλισμού από ινοπλισμένα πολυμερή.....	14
Σχήμα 2.2: Σύγκρισή μηχανικής συμπεριφοράς FRPs – χάλυβα .....	15
Σχήμα 2.3: Κατασκευαστικές διατάξεις εγκοπών.....	16
Σχήμα 2.4: Τυπική διαδικασία ενίσχυσης υποστύλωματος με NSM .....	16
Σχήμα 2.5: Συνήθεις περιπτώσεις αστοχίας λόγω συνάφειας .....	17
Σχήμα 2.6: Τυπική διαδικασία ενίσχυσης υποστύλωματος με TRM .....	19
Σχήμα 2.7: Μικροσκοπική θεώρηση για την συμπεριφορά του συστήματος TRM σε επίπεδο τάσεων – παραμορφώσεων (C. Filippou, C. Chrysostomou).....	20
Σχήμα 2.8: Συνδυαστική εφαρμογή NSM και TRM σε υποστύλωμα .....	21
Σχήμα 3.1: Διατομές επιλεγμένων δοκιμίων.....	26
Σχήμα 3.2: Λεπτομέρειες τοποθέτησης των μέσων ενίσχυσης.....	27
Σχήμα 3.3: Όψη και τομή υποστύλωματος - Διάταξη πειράματος.....	28
Σχήμα 3.4. Μορφές αστοχίας του οπλισμού στο πείραμα, α)Θραύση της λωρίδας CFRP β)Λυγισμός της λωρίδας CFRP γ)Ολίσθηση οπλισμών NSM δ)Λυγισμός ράβδου ε)Θραύση ράβδου .....	30
Σχήμα 3.5: Μορφές αστοχίας του σκυροδέματος στο πείραμα, (α) Καμπτικές ρηγματώσεις (β) Αποσύνθεση και σύνθλιψη του σκυροδέματος .....	30
Σχήμα 3.6: Περιβάλλουσες καμπύλων F (kN) – drift (%).....	31
Σχήμα 4.1: Ενιαία συστήματα μονάδων μέτρησης.....	37
Σχήμα 4.2: Τετραγωνική ταχύτητα σύγκλισης.....	38
Σχήμα 4.3: Επαυξητική – Επαναληπτική Διαδικασία με έλεγχο των δυνάμεων α)Αρχική μέθοδος Newton-Raphson β)Τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson ..	39
Σχήμα 4.4: Επαυξητική Διαδικασία της Newton Raphson με έλεγχο των μετατοπίσεων .....	39
Σχήμα 4.5: Χρονική επαυξητική διαδικασία για την άμεση και την έμμεση μέθοδο .	41
Σχήμα 4.6: Υπολογιστικό κόστος συναρτήσει του αριθμού των βαθμών ελευθερίας.	44
Σχήμα 4.7: Implicit vs Explicit για μονοτονική φόρτιση χωρίς μη-γραμμικότητες ....	46
Σχήμα 4.8: Implicit vs Explicit για μονοτονική φόρτιση με μη-γραμμικότητες .....	46
Σχήμα 4.9: Implicit vs Explicit για ανακυκλιζόμενη φόρτιση με μη-γραμμικότητες..	47
Σχήμα 4.10: Μέθοδος Δυνάμεων vs Μέθοδος Μετατοπίσεων για μονοτονική φόρτιση με μη-γραμμικότητες .....	48

Σχήμα 4.11: Εξαεδρικό στοιχείο 1ης (αριστερά) και 2ης (δεξιά) τάξης.....	49
Σχήμα 4.12: Επιλογές τροποποίησης των τρισδιάστατων στοιχείων .....	50
Σχήμα 4.13: Επίπεδα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (1 <sup>ης</sup> και 2 <sup>ης</sup> τάξης).....	51
Σχήμα 4.14: Επίπεδα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης (1 <sup>ης</sup> και 2 <sup>ης</sup> τάξης).....	51
Σχήμα 4.15: Shear locking σε στοιχεία 1ης τάξης πλήρους ολοκλήρωσης.....	52
Σχήμα 4.16: Hourglassing σε στοιχεία 1ης τάξης μειωμένης ολοκλήρωσης .....	53
Σχήμα 4.17: Ονοματολογία των τρισδιάστατων συμπαγών στοιχείων .....	53
Σχήμα 4.18: Μοντέλο με βάση (a)την πλαστιμότητα (b)την βλάβη (c) την πλαστιμότητα και την βλάβη .....	54
Σχήμα 4.19: Αντοχή σε διαξονική θλίψη και επιφάνεια διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο (deviatory plane).....	55
Σχήμα 4.20: Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού στο αποκλίνον επίπεδο, γωνία διάδοσης $\psi$ και εκκεντρότητα $\varepsilon$ .....	55
Σχήμα 4.21: Συμπεριφορά του μοντέλου CDP υπό κυκλική φόρτιση.....	56
Σχήμα 4.22: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σε θλίψη (ABAQUS manual) .....	58
Σχήμα 4.23: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη (Poronics, 1973).....	59
Σχήμα 4.24: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων (με και χωρίς περίσφιγξη) υπό θλίψη (Mander et al, 1988).....	60
Σχήμα 4.25: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη (EK8/MC2010) .....	60
Σχήμα 4.26: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη (Alfarah et al, 2017).....	62
Σχήμα 4.27: Συγκριτικές καμπύλες σύμφωνα με τις προτάσεις των Alfarah et al για την επιρροή του μεγέθους του πεπερασμένου στοιχείου.....	63
Σχήμα 4.28: Συγκριτικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των προτεινόμενων μοντέλων για $f_{cm}=25.8$ MPa.....	63
Σχήμα 4.29: Καμπύλη παραμόρφωσης – βλάβης .....	64
Σχήμα 4.30: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σε εφελκυσμό (ABAQUS manual) .....	64
Σχήμα 4.31: Συγκριτικές καμπύλες συμπεριφοράς στον εφελκυσμό (Genikomsou A, 2015) .....	65
Σχήμα 4.32: Καμπύλη συμπεριφοράς υπό μονοαξονικό εφελκυσμό (Hordijk,1992) .....	66
Σχήμα 4.33: Καμπύλη βλάβης υπό μονοαξονικό εφελκυσμό (Alfarah et al, 2017) ....	66
Σχήμα 4.34: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μοντέλο υπό θλίψη.....	67
Σχήμα 4.35: Παραμετρική διερεύνηση ως προς τον τύπο στοιχείου.....	68
Σχήμα 4.36: Παραμετρική διερεύνηση ως προς την ενέργεια θραύσης $G_F$ (N/mm)...	68
Σχήμα 4.37: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέτρο ελαστικότητας $E$ (MPa)....	69
Σχήμα 4.38: Παραμετρική διερεύνηση ως προς την γωνία διάδοσης $\psi$ ( $^{\circ}$ ) .....	69
Σχήμα 4.39: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το $K_c$ .....	70



Σχήμα 4.40: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος στοιχείου (mm) για στοιχεία C3D8R-Enhanced (mesh sensitivity analysis) (1 σημείο Gauss).....	70
Σχήμα 4.41: Σχέση τύπου και μεγέθους στοιχείου με τον χρόνο ανάλυσης και την μέση απόκλιση από το πείραμα .....	71
Σχήμα 4.42: Προσομοίωση ράβδου οπλισμού (A) ως δικτύωμα (B) ως στοιχείο δοκού, ενσωματωμένος σε εξαεδρικό στοιχείο σκυροδέματος .....	72
Σχήμα 4.43: Τυχαία ενσωμάτωση στοιχείων οπλισμού στα στοιχεία σκυροδέματος .	74
Σχήμα 4.44: Στοιχεία δικτύωματος στον χώρο με 2 ή 3 κόμβους .....	74
Σχήμα 4.45: Διάγραμμα τάσεων $\sigma$ – παραμορφώσεων $\epsilon$ για ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό.....	75
Σχήμα 4.46: Διάγραμμα τάσεων $\sigma$ – παραμορφώσεων $\epsilon$ για ελαστικό- γραμμικώς κρατυνόμενο υλικό.....	75
Σχήμα 4.47: Καμπύλη τάσης συνάφειας $t_b$ – ολίσθησης $s$ (Model Code 2010).....	77
Σχήμα 4.48: Παράμετροι τάσης συνάφειας $t_b$ – ολίσθησης $s$ (Model Code 2010) ....	77
Σχήμα 4.49: Τροποποιημένο μοντέλο χάλυβα οπλισμού (Belarbi&Hsu).....	78
Σχήμα 4.50: Ισοτροπική κράτυνση χάλυβα (διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων και μεταβολή επιφάνειας διαρροής) .....	79
Σχήμα 4.51: Κινηματική κράτυνση χάλυβα (διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων και μεταβολή επιφάνειας διαρροής) .....	79
Σχήμα 4.52: Μοντέλα χάλυβα οπλισμού που εξετάστηκαν.....	80
Σχήμα 4.53: Αναλυτική διερεύνηση των μοντέλων χάλυβα οπλισμού που επιλέχθηκαν (Μονοτονική Φόρτιση).....	80
Σχήμα 4.54: Ανάλυση των μοντέλων του χάλυβα οπλισμού με ανακυκλιζόμενη φόρτιση .....	81
Σχήμα 4.55: Σύγκριση των μοντέλων χάλυβα οπλισμού που επιλέχθηκαν (Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση) .....	82
Σχήμα 4.56: Προσομοίωση λωρίδας CFRP με 4 στοιχεία δικτύωματος ( $b=16\text{mm}$ )...	83
Σχήμα 4.57: Προσομοίωση ράβδου GFRP με στοιχείο δικτύωματος ( $\Phi 8$ ).....	83
Σχήμα 4.58: Προσομοίωση ράβδου ανοξειδωτού χάλυβα με στοιχείο δικτύωματος ( $\Phi 12$ ).....	83
Σχήμα 4.59: Μοντέλο brittle cracking: συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση (αριστερά) και στην διάτμηση (δεξιά) .....	85
Σχήμα 4.60: Εισαγωγή δεδομένων για το brittle cracking model στο ABAQUS/CAE .....	85
Σχήμα 4.61: Ductile damage model με ενσωματωμένη την βλάβη $D$ του χάλυβα.....	86
Σχήμα 4.62: Εισαγωγή δεδομένων για το ductile damage model στο ABAQUS/CAE .....	86
Σχήμα 4.63: Rebar Layers σε στοιχείο κελύφους-shell για 4 στρώσεις ινοπλέγματος	87
Σχήμα 5.1: Δοκίμιο Control – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – Πυρήνας σκυροδέματος – Επικάλυψη σκυροδέματος .....	90

Σχήμα 5.2: Δοκίμιο G – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – NSM/GFRP ράβδοι - Πυρήνας σκυροδέματος με τα τμήματα ρητίνης– Επικάλυψη σκυροδέματος με αυλακώσεις και οπλισμούς GFRP .....	90
Σχήμα 5.3: Δοκίμιο C_Per – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – NSM-CFRP λωρίδες και ρητίνη – Πυρήνας σκυροδέματος με τα τμήματα ρητίνης– Επικάλυψη σκυροδέματος με αυλακώσεις και οπλισμούς CFRP.....	91
Σχήμα 5.4: Δοκίμιο S_R – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – NSM-ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα και ρητίνη – Πυρήνας σκυροδέματος με τα τμήματα ρητίνης– Επικάλυψη σκυροδέματος με αυλακώσεις και οπλισμούς από ανοξείδωτο χάλυβα...	91
Σχήμα 5.5: Δοκίμιο Control_J – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – Ενίσχυση TRM .....	92
Σχήμα 5.6: Δοκίμιο C_Par_J – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – Ενίσχυση NSM CFRP λωρίδες / TRM .....	92
Σχήμα 5.7: Δοκίμιο C_Par_R (με τμήματα ρητίνης) και C_Par_C (χωρίς ρητίνη).....	93
Σχήμα 5.8: Διατομές Δοκιμίων στο περιβάλλον του ABAQUS/CAE.....	94
Σχήμα 5.9: Επιβολή θλιπτικού φορτίου Nd.....	95
Σχήμα 5.10: Επιβολή μετακινήσεων μέσω SMOOTH STEP amplitude.....	96
Σχήμα 5.11: Σχέση Κινητικής (ALLKE) και Εσωτερικής (ALLIE) Ενέργειας με επιβολή μέσω SMOOTH STEP amplitude .....	96
Σχήμα 5.12: Επιβολή μετακινήσεων μέσω TABULAR amplitude .....	97
Σχήμα 5.13: Σχέση Κινητικής (ALLKE) και Εσωτερικής (ALLIE) Ενέργειας με επιβολή μέσω TABULAR amplitude.....	97
Σχήμα 5.14: Τελική μορφή υποστυλώματος στην μέγιστη μετατόπιση u=100mm με επιβολή μέσω SMOOTH STEP amplitude .....	98
Σχήμα 5.15: Τελική μορφή υποστυλώματος στην μέγιστη μετατόπιση u=100mm με επιβολή μέσω TABULAR amplitude.....	98
Σχήμα 5.16: SMOOTH STEP AMPLITUDE vs TABULAR AMPLITUDE : Υστερητική καμπύλη F (kN) – drift (%).....	99
Σχήμα 5.17: Υστερητικές καμπύλες για το Control δοκίμιο με περίσφιγξη ή μη.....	100
Σχήμα 5.18: Υστερητικές καμπύλες για το Control δοκίμιο με 2 διαφορετικές διακριτοποιήσεις → ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους.....	100
Σχήμα 5.19: Συγκριτικές υστερητικές καμπύλες για το Control δοκίμιο για τέλεια σύνδεση σκυροδέματος - χάλυβα και για τροποποιημένο μοντέλο του χάλυβα οπλισμού κατά Belarbi & Hsu .....	101
Σχήμα 5.20: Δοκίμιο Control → Αστοχία σε θλίψη → Finer Mesh vs Πείραμα vs Coarse Mesh.....	101
Σχήμα 5.21: Δοκίμιο Control → Αστοχία σε εφελκυσμό → Finer Mesh vs Πείραμα vs Coarse Mesh (Τονίζονται οι ρηγματώσεις και η διόγκωση-αποκόλληση της επικάλυψης) .....	102
Σχήμα 5.22: Ρηγματώσεις στις πλευρές και σύνθλιψη στις γωνίες του κάτω τμήματος .....	102

Σχήμα 5.23: Τμήμα διαμήκων ράβδων που έχουν υποστεί διαρροή και πλαστικοποίηση Σημεία οπλισμού με αρνητικές τάσεις στα τμήματα πλαστικοποίησης → πιθανότητα λυγισμού (συμβαδίζει με το πείραμα) .....	103
Σχήμα 5.24 : Μέγεθος μετατοπίσεων .....	103
Σχήμα 5.25: Υστερητικές καμπύλες για το δοκίμιο G με θεώρηση του υλικού είτε ως γραμμικώς ελαστικό είτε με εισαγωγή του μοντέλου brittle cracking .....	104
Σχήμα 5.26: Μορφές αστοχίας για το δοκίμιο G μέσω του ABAQUS: θλίψη, εφελκυσμός, θραύση NSM .....	104
Σχήμα 5.27: Υστερητικές καμπύλες για το δοκίμιο C_Per με χρήση ή όχι του brittle cracking μοντέλου.....	105
Σχήμα 5.28: Μορφές αστοχίας για το δοκίμιο C_Per-brittle μέσω του ABAQUS ...	105
Σχήμα 5.29: Συγκριτικές υστερητικές καμπύλες μεταξύ πειράματος και μοντέλου για το δοκίμιο C_Per.....	106
Σχήμα 5.30: C_Per-R (brittle): Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη (αριστερά) και σε εφελκυσμό (δεξιά) και θραύση των CFRP λωρίδων .....	107
Σχήμα 5.31: C_Per-C (brittle): Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη (αριστερά) και σε εφελκυσμό (δεξιά) και θραύση των CFRP λωρίδων .....	107
Σχήμα 5.32: Υστερητικές καμπύλες πειράματος και λογισμικού για το δοκίμιο S_R .....	108
Σχήμα 5.33: Δοκίμιο S_R: Σύνθλιψη επικάλυψης - (πιθανότητα) λυγισμού των ράβδων ανοξειδωτου χάλυβα λόγω θλίψης πλαστικοποιημένου τμήματος, u=85mm .....	108
Σχήμα 5.34: Σύγκριση καμπύλων Control_J και Control.....	109
Σχήμα 5.35: Control_J: Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό – πλαστική περιοχή διαμήκους οπλισμού στο πέρας ενίσχυσης με TRM – Φορτία στις ίνες και ρηγμάτωση του μανδύα IAM.....	109
Σχήμα 5.36: Υστερητικές καμπύλες πειράματος και ABAQUS για το C_Per_J.....	110
Σχήμα 5.37:Δοκίμιο C_Per_J : Αστοχία σε θλίψη και εφελκυσμό σχεδόν μόνο πέραν του σημείου ενίσχυσης με TRM – ρηγμάτωση, σε αρχικό στάδιο, του κατώτερου μη ενισχυμένου τμήματος (10 mm) .....	110
Σχήμα 5.38: Δοκίμιο C_Per_J : Πλαστικοποίηση διαμήκους οπλισμού και θραύση λωρίδων CFRP ακριβώς στο πέρας (και έπειτα) της ενίσχυσης με TRM – Φορτία στις ίνες άνθρακα .....	111
Σχήμα 5.39: Υστερητική καμπύλη για το δοκίμιο S_R_J σε σύγκριση με το πειραματικό αποτέλεσμα .....	111
Σχήμα 6.1:Παραλλαγές του δοκιμίου G (n=1 και n=3 για Φ8 και n=2 για Φ6 και Φ10 αντίστοιχα).....	115
Σχήμα 6.2:Παραλλαγές του δοκιμίου C_Per (n=1 και n=3 για 2*16 και n=2 για 1.5*12 και 3*16 αντίστοιχα).....	115
Σχήμα 6.3:Παραλλαγές του δοκιμίου S_R (n=1 και n=3 για Φ12 και n=2 για Φ9 και Φ15 αντίστοιχα).....	115

Σχήμα 6.4: Δοκίμια με $s=2$ στρώσεις ενίσχυσης TRM (Control_J, S_R_J και C_Par_J)	116
Σχήμα 6.5: Μορφή και μετακίνηση αστοχίας για το μη ενισχυμένο - Control - δοκίμιο υπό μονοτονική φόρτιση	116
Σχήμα 6.6: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για $n=1,2$ ή 3 ράβδους GFRP ανά ενισχυμένη πλευρά	117
Σχήμα 6.7: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για $n=1,2$ ή 3 λωρίδες CFRP ανά ενισχυμένη πλευρά	117
Σχήμα 6.8: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για $n=1,2$ ή 3 ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα ανά ενισχυμένη πλευρά	118
Σχήμα 6.9: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση με $n=1$ στοιχείο NSM (GFRP/CFRP/ Stainless Steel) ανά ενισχυμένη πλευρά	118
Σχήμα 6.10: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση με $n=2$ στοιχεία NSM (GFRP/CFRP/Stainless Steel) ανά ενισχυμένη πλευρά	119
Σχήμα 6.11: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση με $n=3$ στοιχεία NSM (GFRP/CFRP/ Stainless Steel) ανά ενισχυμένη πλευρά	119
Σχήμα 6.12: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση NSM-GFRP με διατομές $\Phi 6, \Phi 8, \Phi 10$	120
Σχήμα 6.13: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση NSM-CFRP με διατομές $1.5 \times 12, 2 \times 16, 3 \times 16$	120
Σχήμα 6.14: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση NSM-Stainless Steel με διατομές $\Phi 9, \Phi 12, \Phi 15$	121
Σχήμα 6.15: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-TRM με $s=2$ στρώσεις	121
Σχήμα 6.16: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-TRM με $s=3$ στρώσεις	122
Σχήμα 6.17: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-TRM με $s=4$ στρώσεις	122
Σχήμα 6.18: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-CFRP/TRM	123
Σχήμα 6.19: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-Stainless Steel/TRM	123
Σχήμα 6.20: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-GFRP/TRM	124
Σχήμα 6.21: Συγκριτικά Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για NSM-CFRP με $n=1,2$ και TRM με $s=2, 4$	124
Σχήμα 6.22: Συγκριτικά Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για NSM-CFRP με $n=2,3$ και TRM με $s=2, 4$	125
Σχήμα 6.23: Συγκριτικά Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για 3 διαφορετικούς συνδυασμούς ενίσχυσης με NSM-CFRP και TRM	125
Σχήμα 6.24: Αστοχίες σε δοκίμια ενισχυμένα μόνο με NSM	130

Σχήμα 6.25: Αστοχία δοκιμίων μόνο με ενίσχυση TRM ( $u_{max}=120mm$ ).....	131
Σχήμα 6.26: Αστοχία δοκιμίου με NSM- Ανοξείδωτο Χάλυβα 2Φ12 και TRM-s=4 ( $u=209mm$ ) .....	131
Σχήμα 6.27: Αστοχία δοκιμίου με NSM-Ανοξείδωτο Χάλυβα 2Φ12 και TRM-s=2 ( $u=172mm$ ) .....	131
Σχήμα 6.28: Αστοχία δοκιμίου με NSM-1 λωρίδα CFRP 3x16 και TRM-s=2 ( $u=95mm \rightarrow$ θραύση NSM).....	132
Σχήμα 6.29: Αστοχία δοκιμίου με NSM-2 λωρίδες CFRP 2x16 και TRM-s=3 ( $u=108mm \rightarrow$ θραύση NSM).....	132
Σχήμα 6.30: Αστοχία δοκιμίου με NSM-3 λωρίδες CFRP 1.5x12 και TRM-s=4 ( $u=106mm \rightarrow$ θραύση NSM).....	132

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

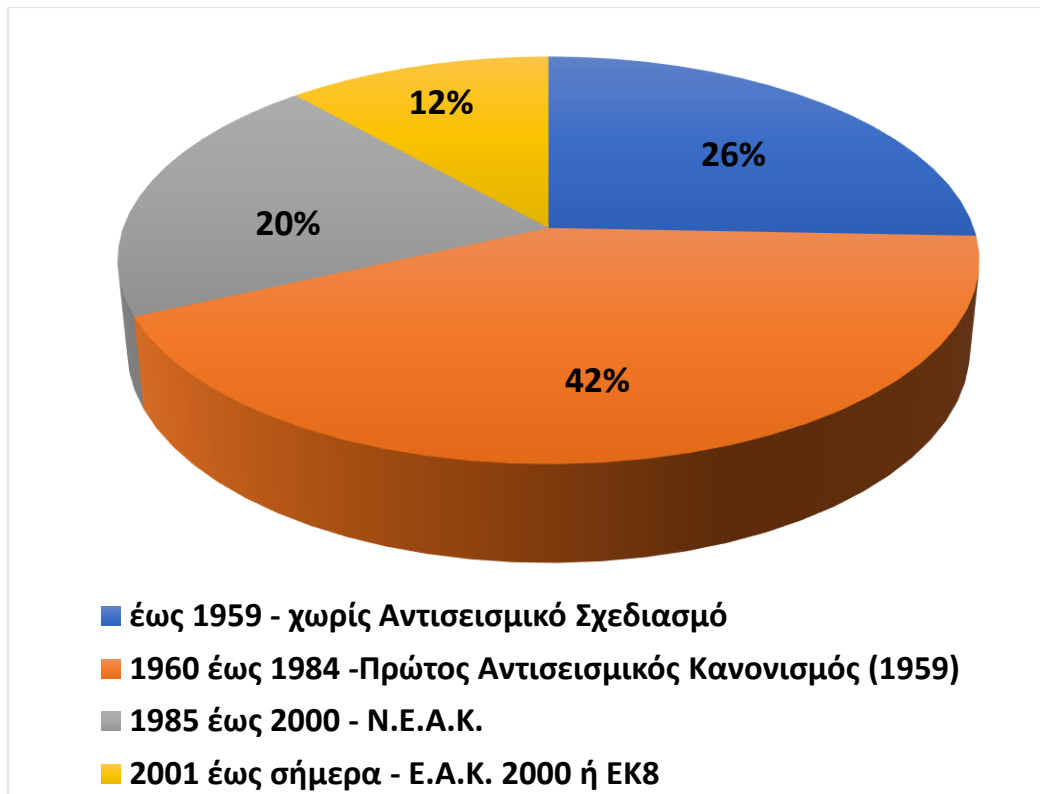
Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες ινών .....	12
Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες ρητινών.....	13
Πίνακας 3.1: Πληροφορίες σπλισμών NSM.....	25
Πίνακας 3.2: Πληροφορίες για κάθε δοκίμιο.....	26
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών.....	29
Πίνακας 3.4: Τάσεις συνάφειας και παραμορφώσεις σπλισμού NSM.....	31
Πίνακας 4.1: Στοιχεία συγκριτικών καμπύλων implicit vs explicit.....	48
Πίνακας 4.2: Κατηγορίες στοιχείων ως προς τα σημεία ολοκλήρωσης-Gauss .....	51
Πίνακας 4.3: Χρόνοι ανάλυσης κατά την παραμετρική διερεύνηση .....	71
Πίνακας 4.4: Βαθμονομημένες τιμές για τις παραμέτρους του CDP και επιλογή διακριτοποίησης.....	71
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων από τις υστερητικές συγκριτικές καμπύλες.....	112
Πίνακας 6.1: Σχέσεις μηχανικών ιδιοτήτων για τις αρχικές διατομές των στοιχείων NSM.....	114
Πίνακας 6.2: Μεταβολές στις διατομές για τα στοιχεία NSM, στην παραμετρική ανάλυση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης.....	114
Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων Διαγραμμάτων Αλληλεπίδρασης.....	133

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η συνεχής εξέλιξη των κανονισμών αντισεισμικού σχεδιασμού, αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν λιγότερο καταστροφική επίδραση του σεισμού στα υπό κατασκευή και μελλοντικά κτίρια. Η εξέλιξη αυτή είναι επακόλουθο συνήθως της αξιοποίησης των γνώσεων από έρευνες και των επιπτώσεων από σημαντικά σεισμικά γεγονότα. Όμως, ένα σημαντικό πρόβλημα είναι πως οι ίδιοι αυτοί σεισμοί καταπονούν ταυτόχρονα και τα ήδη υπάρχοντα κτίρια, και αυτό ελλοχεύει σοβαρούς κινδύνους ειδικά αν αναλογιστεί κάποιος τον τρόπο και την σημασία που δινόταν από παλαιότερους κανονισμούς στα σεισμικά φορτία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί ο πρώτος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (1959) σύμφωνα με τον οποίο, τα κτίρια κατασκευάζονταν λαμβάνοντας υπόψη τα σεισμικά φορτία ως ένα ποσοστό των κατακόρυφων, αμελώντας έτσι την δυναμική φύση του φαινομένου. Σε προγενέστερες του κανονισμού αυτού εποχές, δεν λαμβανόταν καθόλου υπόψη στον σχεδιασμό η σεισμική καταπόνηση.

Σύμφωνα με σχετική έρευνα, περίπου 1 στις 2 κατοικίες στην Ελλάδα, είναι κατασκευασμένες πριν την δεκαετία του 1970 και περίπου 1 στις 4. Στο σχήμα 1.1, αποτυπώνονται τα χρήσιμα αποτελέσματα που προέκυψαν από σχετική έρευνα της ΕΛ.ΣΤΑΤ, 2011. Πέραν των κατοικιών όμως, πολλά είναι και εκείνα τα κτιριακά έργα των οποίων η ανέγερση συνέβη αρκετές δεκαετίες πριν την αρχή του 21ου αιώνα. Σε ένα πολύ σημαντικό ποσοστό των κτιρίων σήμερα λοιπόν, η μέση διάρκεια ζωής, που για συνήθεις κατασκευές ορίζεται ως τα 50 έτη, έχει ξεπεραστεί. Γι' αυτό, πολύ συχνά διατυπώνεται η εξής απορία: είναι αυτές οι κατασκευές (κατοικίες ή μη) ασφαλείς και ικανές για περαιτέρω σεισμική φόρτιση; Η απάντηση δεν είναι απαραίτητα αρνητική, όμως θα πρέπει πάντα να συνυπολογίζονται, πέραν της χρονολογίας κατασκευής, οι βλάβες που έχουν υποστεί, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο/α υλικό/ά, καθώς και τα πιθανά σενάρια απαίτησης αντοχής. Η επιστημονικά εμπειριστατωμένη αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης (seismic risk) γίνεται σύμφωνα με σενάρια τα οποία βασίζονται αφενός στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (seismic Hazard), και αφετέρου στον προσδιορισμό της τρωτότητας των κατασκευών, προκειμένου, πέραν της ασφάλειας, να υπηρετείται και ο σκοπός της οικονομικότητας (Ο.Α.Σ.Π.).

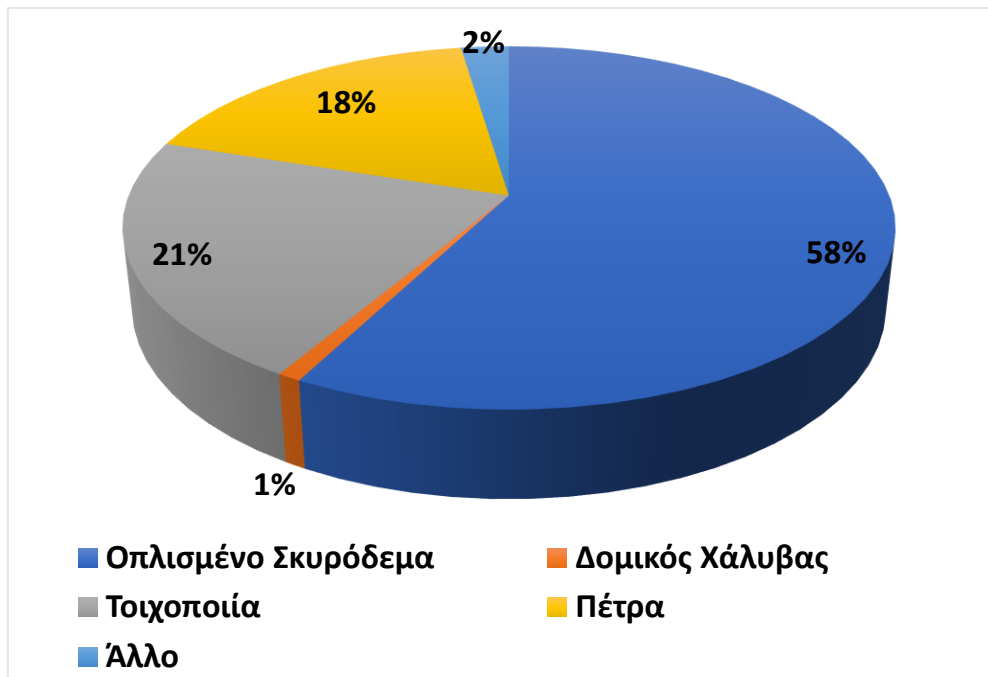


Σχήμα 1.1: Στατιστικά στοιχεία χρονολογίας κατασκευής των κατοικιών στην Ελλάδα και εκάστοτε ισχύοντος Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2011)

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υλικό φέροντα οργανισμού στις παλαιότερες αλλά και σύγχρονες κατασκευές. Υπερτερεί, έως και σήμερα, ειδικά σε κατασκευές μετά το 1960, έναντι των υπολοίπων υλικών κυρίως λόγω κόστους μεγάλης θλιπτικής αντοχής, αντοχής έναντι φωτιάς και ευκολίας στη δημιουργία πολύπλοκων σχημάτων, και αυτό αποτυπώνεται έμπρακτα στα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2 (ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2011), όπου διαφαίνεται το πολύ μεγάλο ποσοστό των κατοικιών στην Ελλάδα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό αυτομάτως σημαίνει πως είναι πολύ σημαντική η έρευνα πάνω σε θέματα αντισεισμικής αποτίμησης και επεμβάσεων στο υλικό του σκυροδέματος και στους οπλισμούς αυτού. Οι βλάβες που παρατηρούνται στις υφιστάμενες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, οφείλονται είτε στον παράγοντα του χρόνου είτε στην αδυναμία ανάληψης φορτίων και τοπικής ή γενικής αστοχίας από τα φορτία. Με την πάροδο του χρόνου, επέρχεται αποσάθρωση των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και χάνεται η επικάλυψη αυτών (σχήμα 1.3). Οι οπλισμοί πλέον, μένουν εκτεθειμένοι στις περιβαλλοντικές συνθήκες και το νερό, σε οποιασδήποτε μορφή του, και προσβάλλονται από το φαινόμενο της διάβρωσης με άμεσο επακόλουθο την κατακόρυφη απομείωση της ενεργούς διατομής τους και άρα της



αντοχής τους. Επίσης, οι εντεινόμενες περιβαλλοντικές δράσεις σε συνδυασμό με τα αυξανόμενα φορτία και τους αυξημένους κύκλους κόπωσης, οδηγούν στην ρηγματώση του σκυροδέματος και σε καμπτικές αστοχίες συμβάλλοντας στην σταδιακή μείωση της ανθεκτικότητάς του. Τέλος, κυρίως λόγω σεισμικών διεγέρσεων όπου η δράση υπερτερεί της αντοχής, ψαθυρές αστοχίες (αστοχία των αγκυρώσεων, διατμητική αστοχία τοιχίων και υποστυλωμάτων κ.α.) μπορούν να συμβούν, με αποτέλεσμα την απότομη κατάρρευση ενός κτιρίου χωρίς καμία προειδοποίηση.



Σχήμα 1.2 : Στατιστικά στοιχεία υλικού κατασκευής κατοικιών (ΕΛ.ΣΤΑΤ., 2011)  
 Όλα τα αναφερθέντα στην προηγούμενη παράγραφο τονίζουν την σημασία της αποτίμησης και ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών για τον περιορισμό των βλαβών και την προστασία της ζωής. Τι σημαίνει όμως ενίσχυση σε γενικότερο επίπεδο μίας κατασκευής ή σε ειδικότερο επίπεδο συγκεκριμένων μελών αυτής; Με ποιους τρόπους και πως θα εξασφαλιστεί η απόδοση των τρόπων αυτών; Αυτά, επιχειρήθηκαν από την επιστημονική κοινότητα στην Ελλάδα να απαντηθούν με τη δημιουργία ενός κανονιστικού πλαισίου για τον έλεγχο και την επέμβαση σε υπάρχοντα κτίρια γνωστού και ως ΚΑΝ.ΕΠΕ ο οποίος στηρίζεται στον εκάστοτε ισχύοντα Αντισεισμικό Κανονισμό. Μέσω του ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιχειρείται η θέσπιση οδηγιών για την ασφάλειας όσων κτιρίων χρίζουν επεμβάσεων. Σύμφωνα με τις διατάξεις του, συγκεκριμένα κριτήρια πρέπει να ικανοποιούνται κατόπιν του ανασχεδιασμού, όμως, εφόσον ακολουθείται πιστά η προτεινόμενη μεθοδολογία και ο

τρόπος επέμβασης, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δεν επιβάλλει περιορισμούς στον μελετητή για αναλύσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην παγκόσμια βιβλιογραφία, υπάρχουν επίσης θεσμοθετημένοι κανονισμοί για τις υφιστάμενες κατασκευές (ΕΚ8-3) όμως, πολλές επίσης είναι οι μελέτες και έρευνες που ασχολούνται διεξοδικά με τις μεθόδους ενίσχυσης και την αποδοτικότητα αυτών.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1.3: α) Διατμητική αστοχία υποστυλώματος β) Αστοχία οπλισμών στην πλαστική άρθρωση γ) Αποφλοίωση σκυροδέματος - Διάβρωση οπλισμών

Ενίσχυση λοιπόν, είναι τον εγχείρημα συμμόρφωσης όλων των παλαιών κτιρίων με τις απαιτήσεις που ορίζουν οι σύγχρονοι μηχανισμοί. Η ασφάλεια πλέον μέσω των σύγχρονων κανονισμών έναντι σεισμού, προϋποθέτει την ικανοποίηση αυστηρών ελέγχων και καταστάσεων που σε καμία περίπτωση δεν επιβάλλονταν από τους παλαιότερους κανονισμούς. Οπότε, η ενίσχυση των κατασκευών συνήθως γίνεται με

επέμβαση στα προ υπάρχοντα υποστυλώματα ή δοκάρια ή γενικότερα στον φέροντα οργανισμό, π.χ. με την προσθήκη μελών (τοιχώματα), ώστε αυτές να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις επιπλέον αντοχής αλλά και μετακίνησης.

Οι ενισχύσεις διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, αρχικά, ανάλογα με τον μηχανισμό αστοχίας έναντι του οποίου επιχειρείται η θωράκιση του στοιχείου-κτιρίου. Γενικά, μέλη όπως υποστυλώματα και δοκάρια, ενισχύονται έναντι κάμψης, οπότε η ενίσχυση ονομάζεται καμπτική ,ή/και διάτμησης οπότε η ενίσχυση ονομάζεται διατμητική. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με προσθήκη, επιπλέον των ράβδων χάλυβα οπλισμού, στοιχείων οπλισμού, κυρίως στις περιοχές του μέλους που καταπονούνται από εφελκυστικές δυνάμεις. Εδώ επίσης διακρίνονται κατηγορίες επεμβάσεων των οποίων η ειδοποιός διαφορά έγκειται στα χρησιμοποιούμενα στοιχεία και υλικά για την ενίσχυση. Σε πληθώρα περιπτώσεων έχουν χρησιμοποιηθεί είτε φύλλα είτε λωρίδες είτε ράβδοι ενώ τα υλικά από τα οποία παρασκευάζονται αυτά είναι συνήθως χάλυβας άνθρακα, ανοξείδωτος χάλυβας και ινοπλισμένα πολυμερή. Τελευταία διάκριση μεταξύ των μεθόδων μπορεί να γίνει από τον τρόπο τοποθέτησης των επιπρόσθετων στοιχείων δηλαδή είτε ενσωμάτωσής τους στο εσωτερικό μέσω οπών είτε περιτύλιξη αυτών γύρω από το υπό ενίσχυση μέλος.

## **1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Τα υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελούν ίσως το σημαντικότερο στοιχείο του φέροντος οργανισμού ενός κτιρίου για την ομαλή και σωστή μεταφορά των φορτίων, σεισμικών και μη, από τις πλάκες και τα δοκάρια στα θεμέλια και από εκεί στο έδαφος. Υποβάλλονται σε πολύμορφες και πολύπλοκες, λόγω εκκεντρότητας, φορτίσεις επομένως, η εξασφάλιση της απαιτούμενης φέρουσας ικανότητάς τους συνεπάγεται την εξασφάλιση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Όμως, πέραν των παραπάνω, το γεγονός πως σε παλαιότερες εποχές, δινόταν μεγαλύτερη βάση στην αντοχή των δοκών σε σχέση με τα υποστυλώματα σε συνδυασμό με την εισαγωγή, από τους σύγχρονους κανονισμούς, του ικανοτικού σχεδιασμού δηλαδή εξασφάλιση αστοχίας πρώτα των δοκών έναντι των υποστυλωμάτων, και μάλιστα αυστηρά με καμπτική μορφή αστοχίας, καθιστά ακόμα πιο έντονη τη σημαντικότητα επεμβάσεων για ενίσχυση των τελευταίων (υποστυλώματα).

Το αντικείμενο λοιπόν, που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, σχετίζεται με την χρήση δύο εκ των νεότερων μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση στοιχείων από Ο.Σ. έναντι καμπτικών μορφών αστοχίας. Οι μέθοδοι αυτές, βέβαια, είναι ευρέως διαδεδομένες τόσο σε υποστυλώματα όσο και σε δοκούς. Ωστόσο, στην εργασία αυτή θα γίνει παρουσίαση και μελέτη τους σε υποστυλώματα αποκλειστικά. Πρόκειται για την μέθοδο ενίσχυσης με NSM (Near Surface Mounted) στοιχεία δηλαδή τοποθετούμενα κοντά στην επιφάνεια των πλευρών του υποστυλώματος αλλά και την TRM (Textile-Reinforced Matrix) ή αλλιώς Ινοπλέγματα Ανόργανης μήτρας (I.A.Π.). Η μελέτη των μεθόδων θα γίνει με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Υπάρχουν πολλά λογισμικά που χρησιμοποιούν την μεθοδολογία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία εκ των οποίων τα πιο σημαντικά που αναφέρονται συχνά στην βιβλιογραφία είναι τα: ANSYS, LS DYNA, ATENA, OpenSees και ABAQUS. Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθεί το υπολογιστικό πακέτο της Dassault Systèmes, ABAQUS 2018.

Οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι ακόλουθοι:

1. Η μελέτη της ικανότητας ενός υπολογιστικού πακέτου όπως το ABAQUS να προσεγγίσει με ακρίβεια (λαμβάνοντας υπόψη συντελεστές σφαλμάτων λόγω αβεβαιοτήτων και παραδοχών) τις μη γραμμικότητες που διέπουν ένα πρόβλημα ανάλυσης με το υλικό του οπλισμένου σκυροδέματος.
2. Η δημιουργία ενός μοντέλου μέσω του λογισμικού ABAQUS το οποίο να εναρμονίζεται και να αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά την συμπεριφορά των, ενισχυμένων και μη, υποστυλωμάτων έναντι σεισμικών φορτίων. Αυτό, όπως συμβαίνει σε παρόμοιες περιπτώσεις, θα γίνει με σύγκριση δεδομένων του μοντέλου σε σχέση με πραγματικά πειράματα που έχουν ήδη διεξαχθεί.
3. Δε θα πρέπει να παραληφθεί πως, όπως πάντα σε προβλήματα του επαγγέλματος του Πολιτικού Μηχανικού, έτσι και τώρα, τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων αξιολογούνται όχι μονοδιάστατα, δηλαδή αποκλειστικά με την επιτυχημένη ακρίβεια που προσδίδουν σε σχέση με την πραγματικότητα, αλλά τουλάχιστον με μία παραπάνω διάσταση, η οποία είναι αυτή του υπολογιστικού κόστους. Επομένως, μεγάλη σημασία θα δοθεί και σε τρόπους αντιμετώπισης και μείωσης του υπολογιστικού κόστους με την ελάχιστη δυνατή επίπτωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων ώστε πέραν της αποτελεσματικότητας το μοντέλο να αποκτήσει και χρησιμότητα.

4. Η διερεύνηση της αποδοτικότητας των μεθόδων NSM και TRM είτε με χρήση αποκλειστικά της πρώτης είτε σε συνδυασμό της πρώτης με την δεύτερη υπό συγκεκριμένες συνθήκες και παραμέτρους καθώς και η πρόταση ορισμένων διαγραμμάτων για την εμπειρική εποπτεία της αποδοτικότητας που προσφέρουν οι ενισχύσεις.

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε τέτοιου είδους εργασίες, είναι σημαντική η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου που δημιουργείται, με αντίστοιχα πραγματικά πειράματα. Η επιστημονική βιβλιογραφία σήμερα βρίθει τέτοιων ερευνών. Για τη συγκεκριμένη εργασία, οδηγό αποτέλεσε το πείραμα των Δ. Μπουρνά και Θ. Τριανταφύλλου με τίτλο «*Flexural Strengthening of RC Columns with NSM FRP or Stainless Steel*». Αρχικά, μέσω του ABAQUS/CAE δημιουργήθηκε μοντέλο υποστυλώματος ικανό να προσομοιώσει το παραπάνω πείραμα. Για την ανάλυση του υποστυλώματος αυτού, χρησιμοποιήθηκε το ABAQUS/Explicit για οριζόντια στατική φόρτιση με την μέθοδο ελέγχου των μετατοπίσεων, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη μη γραμμικότητες των υλικών και του προβλήματος. Η μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση ήταν 100mm. Οι τελικές καμπύλες συγκρίθηκαν με τις καμπύλες στις οποίες κατέληξαν οι συγγραφείς και διαπιστώθηκε η εγκυρότητα του μοντέλου. Γι' αυτό χρειάστηκαν παραμετρικές αναλύσεις κυρίως για την σωστή προσομοίωση των υλικών, οι οποίες παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Έπειτα ακολούθησε η ανάλυση μέσω μονοτονικής φόρτισης των υποστυλωμάτων για τα σημεία μέγιστης εφελκυστικής και θλιπτικής αξονικής δύναμης (καθαρή θλίψη και καθαρός εφελκυσμός), μέγιστης και καθαρής κάμψης όπως και ορισμένα ενδιάμεσα προκειμένου να κατασκευαστούν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης. Αυτά έγιναν με βασικές παραμέτρους: (**α**) τον αριθμό  $n$  των στοιχείων ενίσχυσης (για την μέθοδο NSM) (**β**) την διατομή των στοιχείων ενίσχυσης (για την μέθοδο NSM) (**γ**) τον αριθμό  $s$  των στρώσεων (για την μέθοδο TRM).

### 1.4 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάστηκε η γενικότερη θεματολογία στην οποία εντάσσεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Δόθηκε η ευρύτερη έννοια της ενίσχυσης των κατασκευών, οι λόγοι που την καθιστούν απαραίτητη στην σημερινή εποχή και πολύ συνοπτικά ο τρόπος που επιχειρείται να επιτευχθεί ή που ήδη επιτυγχάνεται αυτό.

Αναλύθηκαν οι στόχοι της εργασίας, περιεγράφηκε η δομή της και δόθηκε περιεκτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 2, συζητούνται περιληπτικά οι μέθοδοι ενίσχυσης. Δίνεται ιδιαίτερη βάση στην NSM και την TRM, για τις οποίες γίνεται εκτενής παρουσίαση, παραθέτοντας την διαδικασία που ακολουθείται, τα πλεονεκτήματα και τα τυχόν μειονεκτήματα, τα χρησιμοποιούμενα υλικά αλλά και τους συχνότερους τύπους αστοχίας τους.

Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται αρχικά, περιγραφή του πειράματος. Παρουσιάζονται τα δεδομένα για την γεωμετρία των δοκιμίων, τα υλικά, τα στοιχεία και ο τρόπος των ενισχύσεων. Δίνεται η διάταξη και η μέθοδος με την οποία επιχειρήθηκε να ελεγχθεί το κάθε υποστύλωμα ενώ τελικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 4, παρέχονται οι τρόποι και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την ρεαλιστική προσομοίωση του πειράματος σε επίπεδο μέλους. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό μοντέλο του Concrete Damage Plasticity για το οποίο χρειάστηκαν παραμετρικές καμπύλες για την σύγκλιση με την πραγματικότητα.

Στο Κεφάλαιο 5 δίνονται για κάθε τύπο δοκιμίου, η γεωμετρία του μέσα από το περιβάλλον του ABAQUS/CAE και έπειτα αποτυπώνονται οι καμπύλες του μοντέλου έναντι αυτών του πειράματος για διαπίστωση της συμφωνίας. Επίσης καταγράφονται οι μορφές αστοχίας που παρατηρούνται από το λογισμικό και σχολιάζεται η εγκυρότητα τους ή όχι.

Στο Κεφάλαιο 6, για τα υποστυλώματα, παρουσιάστηκαν, μετά από αναλύσεις, τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για αξονική και καμπτική αντοχή τους κάτω υπό συγκεκριμένες μεταβαλλόμενες περιπτώσεις. Μαζί με όλα τα παραπάνω, δίνονται και οι τυπικές μορφές αστοχίας σε ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία (N,M).

Στο Κεφάλαιο 7, καταλήγοντας, παρουσιάζονται συνοπτικά, τα αποτελέσματα και τα σημεία/συμπεράσματα που πρέπει να τονισθούν έπειτα από το πέρας της εργασίας αυτής.

Στο Κεφάλαιο 8, καταγράφεται το βιβλιογραφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατανόηση του ζητήματος της διπλωματικής και την κατάλληλη εκπόνησή της.

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Κατά καιρούς, πολλές είναι οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί σε κτιριακά έργα και μία από τις πλέον διαδεδομένες στα υποστυλώματα είναι η αύξηση της διατομής του μέλους με νέες επιστρώσεις από σκυρόδεμα και τοποθέτηση επιπλέον ράβδων οπλισμού για την τελικά δημιουργία ενός στρώματος μανδύα. Η τεχνική αυτή όσον αφορά στα υποστυλώματα όμως πολλές φορές μπορεί να γίνει πολύπλοκη καθώς ιδιαίτερα στα σημεία των κόμβων υπάρχει συχνά η απαίτηση επέκτασης της ενίσχυσης και σε γειτονικά μέλη της κατασκευής. Αυτό πρακτικά σημαίνει εκτράχυνση πολλών επιφανειών, διάτρηση πλακών για την αγκύρωση οπλισμών και χρήση μεγάλου όγκου υλικών.

Πολλοί ερευνητές αλλά και μελετητές πολιτικοί μηχανικοί έχουν στρέψει το βλέμμα τους στην αναζήτηση εναλλακτικών τεχνικών, μία εκ των οποίων είναι και η χρήση στοιχείων από χάλυβα, από πολυμερή ή από ανοξείδωτο χάλυβα με σκοπό την αύξηση της φέρουσας ικανότητας ενός κτιρίου. Παρόλο που, και στις 3 περιπτώσεις η αύξηση της φέρουσας ικανότητας είναι σημαντική, ο ανθρακούχος χάλυβας είναι πολύ ευάλωτος στο φαινόμενο της διάβρωσης. Τα ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs – Fiber Reinforced Polymers) είναι συστήματα που δημιουργούνται με τον εμποτισμό πλεγμάτων – υφασμάτων – από ίνες διαφόρων υλικών μέσα σε θερμοσκληρυνόμενο μητρικό υλικό, την εποξειδική ρητίνη. Ο τρόπος παραγωγής και η σύστασή τους λοιπόν, έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλή συμπεριφορά τους στην έκθεση σε σχεδόν κάθε τύπου περιβάλλον, χωρίς να είναι επιρρεπή στην διάβρωση. Ένα ακόμα πλεονέκτημα, κυρίως των πολυμερών, έναντι του χάλυβα είναι η μεγάλη διαφορά στον λόγο αντοχής προς βάρος. Αφενός τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι πολύ ελαφρύτερα και αφετέρου με πολύ μεγαλύτερη τάση αντοχής. Βέβαια, το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι η ψαθυρότητα που διέπει τις μορφές αστοχίας τους (θραύση) λόγω μη ύπαρξης ουσιαστικής μετελαστικής – πλαστικής περιοχής. Τέλος, τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τον χάλυβα, όμως γενικά θεωρείται πως λόγω του πλεονεκτήματος στον λόγο αντοχής / βάρους, το μειονέκτημα αυτό ως ένα σημείο ισοσταθμίζεται.

Για την ενίσχυση της ικανότητας των υποστρωμάτων έναντι κάμψης, συχνά αναφέρεται ως πολύ αποδοτική η μέθοδος NSM-FRP ή αλλιώς ΠΟΕ-ΙΟΠ δηλαδή Πρόσθετος Οπλισμός σε Εγκοπές με Ινο-Οπλισμένα Πολυμερή (Δ. Μπουρνάς, 2008). Η μέθοδος αυτή επίσης συνδυάζεται με το σύστημα TRM για την μέγιστη εκμετάλλευση της φέρουσας ικανότητας των πρόσθετων οπλισμών από πολυμερή (ή και ανοξείδωτο χάλυβα). Στη βιβλιογραφία υπάρχει μία πληθώρα ερευνών που ασχολούνται με τις δύο παραπάνω μεθόδους. Πολλές από αυτές έχουν ερευνητικό χαρακτήρα, εξετάζοντας πειραματικά διάφορες πρακτικές χρήσης των μεθόδων και την απόδοση αυτών. Άλλες, πάλι, ασχολούνται περισσότερο με την αριθμητική ανάλυση και την προσομοίωση κατασκευών καθώς το αυξημένο κόστος συνεχών πειραματικών διεργασιών, ιδίως για προσομοιώσεις πλήρους κλίμακας (full scale simulations) όπως και ο χρονικός περιορισμός, δεν επιτρέπουν πάντα την πλήρη εμβάθυνση σε κρίσιμα θέματα ή προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, γίνονται αντί-οικονομικές.

## **2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ NSM**

### *2.2.1 ΥΙΚΑ*

Η μέθοδος NSM είναι μέθοδος τόσο τοπικής όσο και γενικής επέμβασης καθώς είναι δυνατή η χρήση της ακόμα και σε κάποιο τμήμα ενός μέλους (αν και αυτό δεν προτείνεται). Χρησιμοποιείται κυρίως σε δοκούς και υποστρώματα με σκοπό είτε την διατμητική είτε την καμπτική ενίσχυσή τους. Περιλαμβάνει την ενσωμάτωση στοιχείων οπλισμού κοντά στις εφελκυστικές (για μονοτονικές φορτίσεις) ή σε όλες (ανακυκλιζόμενες φορτίσεις) τις παρειές ενός μέλους (Near Surface Mounted). Τα στοιχεία αυτά χωρίζονται σε κατηγορίες ως προς το υλικό από το οποίο αποτελούνται αλλά και την διατομή τους. Μπορεί να είναι είτε από ινοπλισμένα πολυμερή είτε από ανοξείδωτο χάλυβα ενώ οι χρησιμοποιούμενες διατομές τους είναι είτε ράβδοι είτε λωρίδες.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον ανθρακούχο χάλυβα, όμως με μεγαλύτερη οριακή τάση εφελκυσμού και, κυρίως, με μεγάλη ανθεκτικότητα έναντι ενανθράκωσης και διάβρωσης. Ωστόσο, είναι πιο σκληροί από τους κοινούς χάλυβες και πιο δυσκατέργαστοι.



Όσον αφορά στα πολυμερή, καθώς είναι σύνθετα υλικά, η συμπεριφορά τους εξαρτάται από την σύστασή τους. Με απλά λόγια, τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι πλαστικά που έχουν ενισχυθεί με ίνες με σκοπό την αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας τους. Αποτελούνται από ένα σκληρυνόμενο μητρικό υλικό στο οποίο εμποτίζονται ίνες προκειμένου να βελτιωθούν οι κακές και ψαθυρές κατά τα άλλα ιδιότητες, κυρίως όσον αφορά στην αντοχή, της μήτρας. Επομένως, όπως είναι ευκόλως κατανοητό, το υλικό της μήτρας αναλαμβάνει κυρίως τον ρόλο προστασίας, μεταφοράς των τάσεων και συνάφειας, ενώ στις ίνες ουσιαστικά οφείλεται η αντοχή και η ελαστικότητα του σύνθετου υλικού.

Οι ίνες, που ουσιαστικά αποτελούν τον οπλισμό των σύνθετων υλικών, καθορίζουν στην διαμήκη διεύθυνση τόσο την αντοχή (σε εφελκυσμό), όσο και το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών. Τα συχνότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις ίνες είναι: ύαλος (GFRPs), αραμίδιο (AFRPs), βασάλτης (BFRPs) και άνθρακας (CFRPs). Μεταξύ τους, εκτός από το υλικό, διαφέρουν και στις βασικές τους μηχανικές ιδιότητες (πίνακας 2.1) δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , την οριακή τάση  $f_u$ , την οριακή παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_{fu}$  καθώς και την πυκνότητα  $\rho$ .

Οι ίνες γυαλιού διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: 1) σε ίνες τύπου “E-Glass” (electrical) οι οποίες είναι κυρίως μονωτικά υλικά με μεγάλη ανθεκτικότητα έναντι διαβροχής και συνεχούς έκθεσης σε υγρασία, 2) σε ίνες τύπου “S-Glass” με πολύ μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία καθώς επίσης υψηλή θερμική αντίσταση και μέτρο ελαστικότητας. και 3) σε ίνες τύπου “AR-Glass” (alkali resistant) με παρόμοιες ιδιότητες με τις S. Γενικότερα, οι ίνες γυαλιού έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά αν και ζυγίζουν περισσότερο από τις ίνες άνθρακα και το αραμίδιο.

Οι ίνες άνθρακα έχουν μεγαλύτερο κόστος από αυτό των ινών γυαλιού ωστόσο προσφέρουν ένα εξαιρετικό συνδυασμό αντοχής και χαμηλού βάρους ενώ συγχρόνως έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Η εφελκυστική αντοχή των ινών άνθρακα είναι περίπου ίση με αυτή των ινών γυαλιού αλλά παρουσιάζουν 3 με 4 φορές μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τις ίνες γυαλιού. Αν και πιο ψαθυρές παρουσιάζουν μικρότερες παραμορφώσεις κατά την θραύση.

Οι ίνες από αραμίδιο, γνωστές επίσης και με την εμπορική ονομασία τους Kevlar, έχουν μικρή σχετικά πυκνότητα και ταυτόχρονα προσφέρουν μεγάλες μηχανικές ιδιότητες με χαρακτηριστικό πλεονέκτημά τους την μεγάλη ανθεκτικότητα σε βλάβες

από εξωγενείς παράγοντες και περιβάλλον έκθεσης. Έχουν υψηλή εφελκυστική αντοχή, ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας και χαμηλή πυκνότητα σε σύγκριση με το γυαλί και τον άνθρακα. Η εφελκυστική αντοχή των ινών αραμιδίου είναι υψηλότερη από αυτή των ινών γυαλιού και το μέτρο ελαστικότητας είναι 50% υψηλότερο από αυτό του γυαλιού. Ωστόσο, υποβαθμίζονται όταν εκτεθούν σε υπεριώδεις ακτίνες, υδρολύονται εύκολα, ακόμα και σε ξηρό περιβάλλον, λόγω εύκολης απορρόφησης υγρασίας από τον αέρα. Η αντοχή τους σε θλιπτικά φορτία δεν είναι σημαντική ενώ, ιδίως για μακροπρόθεσμη έκθεση σε περιβάλλοντα με ισχυρή υπεριώδη ακτινοβολία και υγρασία, μειώνεται σημαντικά την προστατευτική τους απόδοση και η διάρκεια ζωής.

Ίνες	E GPa	fu MPa	εfu %	ρ gr/cm <sup>3</sup>
Ύαλος	70 - 90	2000 - 4800	3.0 - 5.5	2.5
Άνθρακας	200-700	2100 - 6800	0.2 - 2.5	3.48
Αραμίδιο	120 - 210	3500 - 4100	2.5 - 5.0	1.44

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες ινών

Λόγω της φύσης της ενίσχυσης αλλά και του τρόπου και της τελικής της θέσης, είναι μεγάλης σημασίας η σωστή επίτευξη της συνάφειας μεταξύ του προ υπάρχοντος και του/των νέου/ων υλικού/ών. Όπως προαναφέρθηκε, η ιδιότητα της συνάφειας του σύνθετου υλικού αλλά και της σύνδεσης με εξωτερικά υλικά και επιφάνειες, όπως επίσης και η προστασία και η μεταφορά των τάσεων, οφείλονται στο υλικό της μήτρας. Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Συνήθως τα χρησιμοποιούμενα υλικά της μήτρας είναι ρητίνες: α) εποξικές, που θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν, β) πολυεστερικές, που αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών, γ) βινυλεστερικές, που είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές όμως δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές (πίνακας 2.2).

Είδος Ρητίνης	E GPa	fu MPa	εu %	ρ gr/cm <sup>3</sup>
Εποξική	2.0 – 4.5	55 - 130	4.0 - 14.0	1.25
Πολυεστερική	2.1 – 4.1	35 - 104	0 - 5.0	1.32
Βινυλεστερική	3.0 – 3.6	73 - 81	3.5 - 5.5	1.22

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες ρητινών

Τελικά, το ινοπλισμένο πολυμερές, ως σύνθετο υλικό έχει χαρακτηριστικά και ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού που καθορίζονται από τα αντίστοιχα των συστατικών του. Έτσι, ευκόλως εννοείται πως η συμμετοχή των ρητινών στο τελικό προϊόν έχει σοβαρές επιδράσεις σε αρκετά μηχανικά χαρακτηριστικά του συνθέτου υλικού, όπως στην εφελκυστική αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας στην εγκάρσια διεύθυνση. Παρά τις πολύ μειωμένες μηχανικές ιδιότητες τους όμως, σε σχέση με τις ίνες, και την εντονότερη ερπυστική συμπεριφορά σε σχέση με άλλα δομικά υλικά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες.. Επίσης, καθορίζουν τη διατμητική και τη θλιπτική συμπεριφορά του συνθέτου υλικού. Από τη σκοπιά της μικρομηχανικής, προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι γνωστό το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν. Ο Νόμος της Σύνθεσης (Rule of Mixtures) χρησιμοποιεί τα ποσοστά συμμετοχής ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού (Θ. Τριανταφύλλου). Καταγράφονται οι άμεσα χρησιμοποιούμενοι τύποι για την τελική πρόβλεψη των ιδιοτήτων ενός πολυμερούς:

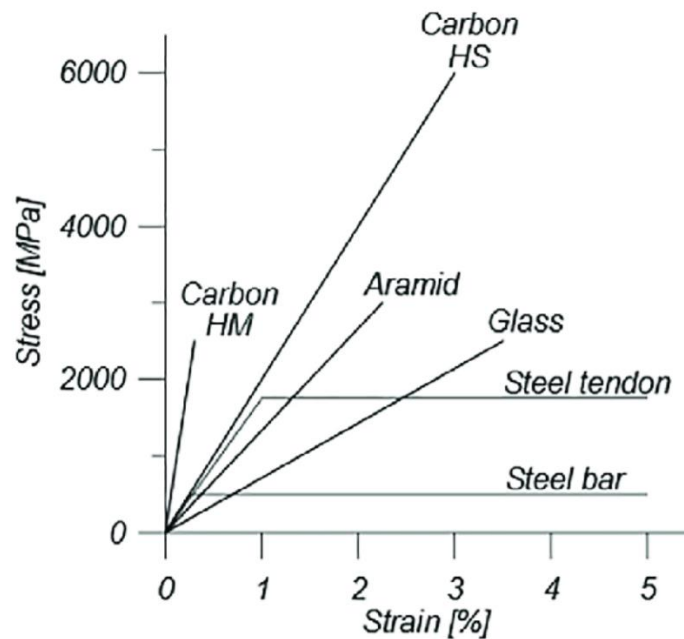
- $v_f + v_m + v_u = 1$ , όπου  $v_f$ ,  $v_m$  και  $v_u$  είναι οι λόγοι όγκου των ινών, της ρητίνης και των κενών
- $\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m$ , όπου  $\rho_f$ ,  $\rho_m$  και  $\rho_c$  είναι οι πυκνότητες των ινών, της ρητίνης και η συνολική του σύνθετου υλικού, αντίστοιχα
- $E = E_f v_f + E_m v_m$ , η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού  $E$  με το μέτρο ελαστικότητας των ινών  $E_f$  και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας  $E_m$
- $s = s_f v_f + s_{mf} (1 - v_f)$ , όπου  $s$ ,  $s_f$  και  $s_{mf}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, η εφελκυστική αντοχή της ίνας και η εφελκυστική τάση της μήτρας

Τα τελικά προϊόντα συνήθως αποτελούνται από την εποξική ρητίνη και από ίνες είτε ύαλου είτε άνθρακα, καθώς αυτά τα δύο υλικά είναι ιδιαίτερος διαδομένα σήμερα. Η τελική μορφή των ινοπλισμένων πολυμερών προκύπτει είναι ράβδοι (σχήμα 2.1), λωρίδες ή πολύ λεπτά φύλλα επιστρώσεως. Για την μέθοδο NSM, χρησιμοποιούνται εξίσου οι 2 πρώτες επιλογές:

- ✓ Οι ράβδοι μπορεί να είναι τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής με επιφάνεια είτε λεία (smooth) τύπου αμμοβολής (sand-blasted) είτε επικαλυμμένη με στρώση άμμου (sand-coated), με σπειροειδή στρώση ινών (spirally wound), με νευρώσεις (ribbed) ή πλεγμένης μορφής (braided). Πέραν των ενισχύσεων βέβαια, οι ράβδοι συνθέτων υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατα του συμβατικού χαλύβδινου οπλισμού όμως μόνο σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες όπου το υψηλό κόστος τους δικαιολογήθηκε από την ανάγκη ανθεκτικότητας σε διάβρωση.
- ✓ Οι λωρίδες είναι δύσκαμπτα ελάσματα προ-εμποτισμένα με ρητίνη, τα οποία σε αντίθεση με τα απλά φύλλα επιστρώσεων, μπορούν να εφαρμοστούν τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά στο ενισχυόμενο μέλος.



Σχήμα 2.1: Ράβδοι οπλισμού από ινοπλισμένα πολυμερή

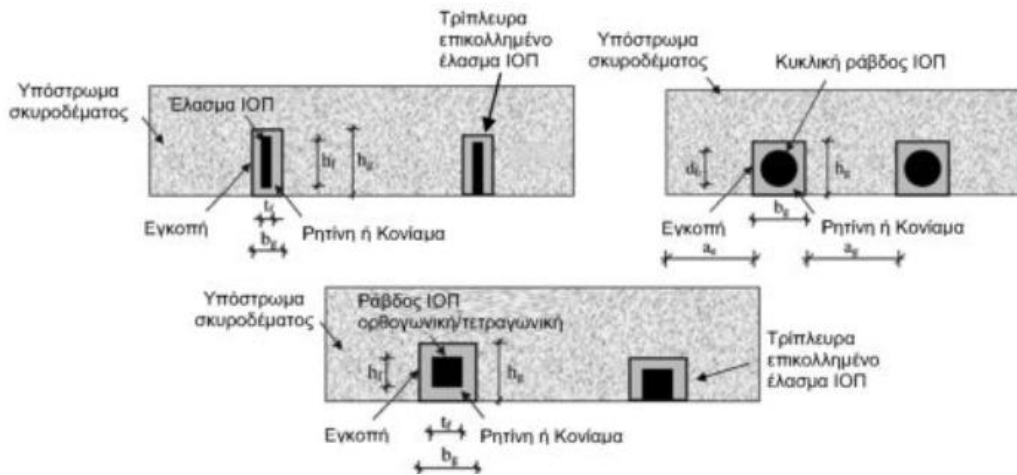


Σχήμα 2.2: Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς FRPs – χάλυβα

### 2.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η μέθοδος ενσωμάτωσης Πρόσθετων Οπλισμών σε Εγκοπές με χρήση Ινοπλισμένων Πολυμερών, περιγράφεται άρτια στην εργασία του Δ. Μπουρνά «Ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών ή ανοξειδωτου χάλυβα σε εγκοπές». Άλλες σημαντικές αναφορές στην συγκεκριμένη τεχνική έχουν γίνει από L. De Lorenzis (2000), Barros et al (2009), D.A. Bournas, T.C. Triantafillou (2009), A. Rizzo και L. De Lorenzis (2009), IA Sharaky και L Torres et al (2015) κ.α.

Στην αρχή, δημιουργούνται οι εγκοπές, σύμφωνα με συγκεκριμένα πρότυπα (σχήμα 2.3), στις πλευρές ενίσχυσης με διεύθυνση κάθετη στη διάσταση του ύψους (για τα υποστυλώματα) ή του μήκους (για τις δοκούς) εφόσον πρόκειται για διατμητική ενίσχυση ενώ η διεύθυνση αυτή γίνεται παράλληλη εφόσον πρόκειται για καμπτική ενίσχυση. Οι εγκοπές, γεμίζονται έως ένα ποσοστό τους (περί το  $\frac{1}{2}$ ) με την εποξειδική ρητίνη, τοποθετείται η ράβδος ή η λωρίδα σε κάθε μία από αυτές και τέλος πληρούνται με ρητίνη μέχρι την πλήρη ομοιομορφία με την επιφάνεια του προ υπάρχοντος μέλους (σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.3: Κατασκευαστικές διατάξεις εγκοπών



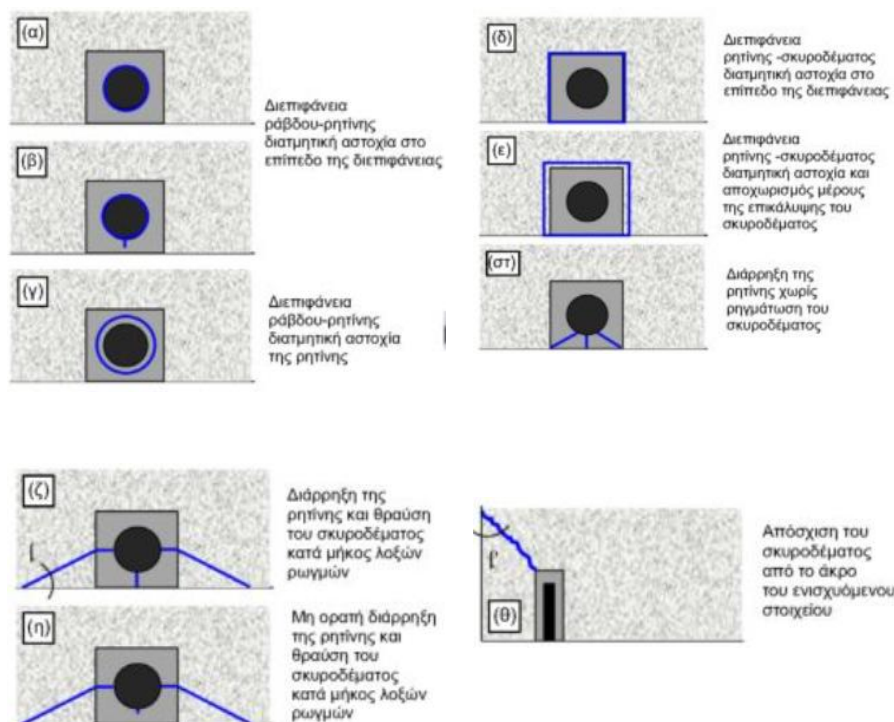
Σχήμα 2.4: Τυπική διαδικασία ενίσχυσης υποστυλώματος με NSM

Πολύ μεγάλης σημασίας στη μέθοδο αυτή είναι η επίτευξη της απαιτούμενης συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και υλικού πλήρωσης γι' αυτό άλλωστε σχεδόν πάντα το υλικό αυτό είναι η εποξειδική ρητίνη. Επηρεάζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος, την ποιότητα και τη σύσταση της ρητίνης, την προετοιμασία καθώς και την γεωμετρία των εγκοπών όπως επίσης και το σχήμα και τις διαστάσεις των επιπρόσθετων οπλισμών. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η συνάφεια που επιτυγχάνεται σε σχέση με τεχνικές επικόλλησης στοιχείων στην επιφάνεια θεωρείται καλύτερη ενώ η δυνατότητα αγκύρωσης πέραν της κρίσιμης διατομής ως προς τις ροπές των καινούργιων οπλισμών είτε σε θεμέλια είτε σε άλλα γειτονικά μέλη μειώνει ακόμα



περισσότερο τις πιθανότητες αστοχίας της επέμβασης λόγω ανεπαρκούς μήκους για την ανάληψη των τάσεων. Παρόλα αυτά, η αστοχία της συνάφειας είναι ζήτημα που έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα λόγω της κρισιμότητάς της. Οι ερευνητές έχουν καταλήξει σε τρεις πιθανές μορφές αστοχίας (σχήμα 2.5):

1. Αστοχία στην διεπιφάνεια οπλισμού – ρητίνης, διατμητική αστοχία είτε στο επίπεδο της διεπιφάνειας είτε του ίδιου του υλικού συγκόλλησης
2. Αστοχία στην διεπιφάνεια ρητίνης – σκυροδέματος, είτε λόγω αποκόλλησης άρα κακής προετοιμασίας είτε λόγω διατμητικής αστοχίας του σκυροδέματος με αποχωρισμό τμήματος της επικάλυψης.
3. Αστοχία λόγω διάρρηξης της ρητίνης, κυρίως όταν αναπτύσσονται πολύ μεγάλες τάσεις δεσμού μεταξύ οπλισμού και ρητίνης (συνηθισμένη σε περιπτώσεις οπλισμών με νευρώσεις)



Σχήμα 2.5: Συνήθειες περιπτώσεις αστοχίας λόγω συνάφειας

Η μέθοδος που συζητήθηκε, έχει αποτελέσει θέμα σε πολλά άρθρα και διατριβές καθιστώντας έτσι σαφή τα πλεονεκτήματά της. Πέραν της συνάφειας, άλλα σημαντικά οφέλη της μεθόδου είναι η δυνατότητα προέντασης των οπλισμών, η μειωμένη απαιτούμενη εργασία εφαρμογής, η προφύλαξή τους εντός του μέλους και

του υλικού πλήρωσης έναντι μηχανικών βλαβών ή βλαβών από φωτιά και το αισθητικό αποτέλεσμα καθώς δεν γίνεται προσαύξηση της διατομής ή προσθήκη στοιχείων εξωτερικά που πρόκειται να αλλάξουν τις διαστάσεις και την μορφή των μελών. Στην δημοσίευσή τους οι T. D'Antino και M.A. Pisani παρουσιάζουν ορισμένα αναλυτικά μοντέλα που προτείνουν οι κανονισμοί ACI 440.2R-08, TR 55, CSA S806-12 και CNR-DT 200 R1/2013 με σκοπό τον προσεγγιστικό υπολογισμό της νέας φέρουσας ικανότητας σε κάμψη ενισχυμένων μελών. Μέσα από πειραματικούς ελέγχους 155 δοκιμίων δοκών οπλισμένων με την μέθοδο NSM, συμπεραίνουν πως , σε γενικές γραμμές τα ACI 440.2R-08 και CSA S806-12 προσεγγίζουν αρκετά καλά την πραγματικότητα εκτός από την περίπτωση αστοχιών στο μήκος αγκύρωσης ενώ κατά το TR 55 η προσέγγιση ήταν αρκετά συντηρητική. Αν και τελικά, τονίζουν πως είναι σημαντική η περαιτέρω ενίσχυση των ερευνών για τον ακριβέστερο ορισμό αναλυτικών μοντέλων, η χρήση ενός εκ των τριών αυτών μοντέλων παρέχει μία αρχικά καλή προσέγγιση των μεγεθών.

### **2.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ TRM**

Πολύ συχνά, κατά την μέθοδο NSM, παράγοντες όπως η πολύ μικρή διαθέσιμη επικάλυψη σε παλαιού τύπου υποστυλώματα ή δοκάρια ή/και η πολύ χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος, μπορεί να συντελέσουν σε γρήγορη αποκόλληση του εγκαθισταμένου οπλισμού και άρα μη αποδοτικότητα, τουλάχιστον την αναμενόμενη, της μεθόδου. Γι' αυτό, σε τέτοιες περιπτώσεις συνηθίζεται να γίνεται συνδυασμός της μεθόδου NSM με άλλες όπως είναι η μέθοδος TRM (σχήμα 2.8). Η μέθοδος αυτή, έχει ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά με την NSM σχετικά με τα υλικά χρήσης. Το τελικό προϊόν της TRM μπορεί εύκολα να παρομοιαστεί με τα ινοπλισμένα πολυμερή. Στη πραγματικότητα, η μόνη διαφορά των δύο τελευταίων είναι η αντικατάσταση του υλικού της μήτρας των πολυμερών με ανόργανη μήτρα συνήθως από τσιμεντοειδή κονία. Γι' αυτό άλλωστε στην ελληνική βιβλιογραφία αναφέρεται και ως Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (I.A.M.).

Κατά την μέθοδο TRM, αρχικά γίνεται προετοιμασία με εκτράχυνση της περιοχής εφαρμογής, η επιφάνεια καλύπτεται με το υλικό της ανόργανης μήτρας και σε αυτό γίνεται εμποτισμός υφάσματος ινών ενώ έπειτα ακολουθεί μία ακόμα στρώση κονιάματος ώστε να διασφαλιστεί η προστασία και σωστή ενσωμάτωση του ινοπλέγματος (σχήμα 2.6). Η συγκεκριμένη διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την εφαρμογή των απαιτούμενων για την περίπτωση στρώσεων. Τα υφάσματα ινών



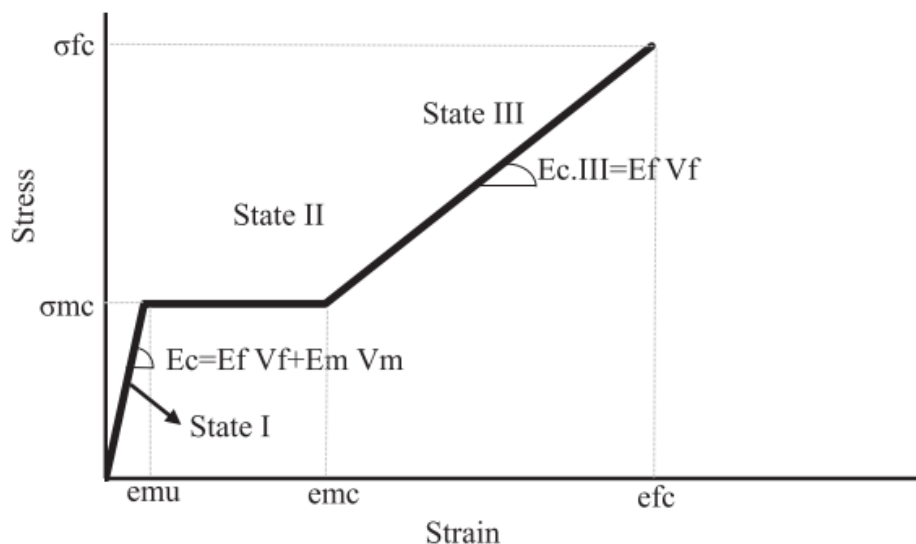
μπορεί να είναι διαφόρων υλικών όπως αναφέρθηκαν νωρίτερα (π.χ. ίνες ύαλου, άνθρακα κ.α.) και με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυρίως ως προς τον προσανατολισμό των ινών. Το υλικό της μήτρας επιλέγεται καταρχάς τέτοιο ώστε να είναι εύκολη και σωστή η ενσωμάτωση του ινοπλέγματος. Σε αυτό συμβάλλει η χρήση αδρανών με πολύ μικρό κόκκο ( $<2 \mu\text{m}$ ) κάτι που χαρακτηρίζει τα υλικά αυτά ως κονιάματα. Υπάρχουν τα συνήθη κονιάματα με χρήση τσιμέντου Portland ενώ αρκετές φορές προστίθενται σε αυτά κλάσματα πολυμερών (0.1 έως 0.2  $\mu\text{m}$ ). Πέραν του εμποτισμού, τα κονιάματα είναι υπεύθυνα για την ανάπτυξη της απαιτούμενης συνάφειας με το ινόπλεγμα. Κατά τον Bartos (1987) η συνάφεια του συστήματος οφείλεται στο γεγονός πως οι εξωτερικές ίνες που είναι πλήρως ενσωματωμένες στην μήτρα, αστοχούν, με αποτέλεσμα την υπαρκτή αλλά ελεγχόμενη ολίσθηση των εσωτερικών κλώνων.



Σχήμα 2.6: Τυπική διαδικασία ενίσχυσης υποστυλώματος με TRM

Αρκετές έρευνες έχουν αποδείξει την ευνοϊκότερη συμπεριφορά χρήσης του συστήματος TRM έναντι απλής εφαρμογής φύλλων FRP. Η παρόμοια σε σχέση με τα ΙΟΠ αποδοτικότητα της στην ενίσχυση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής αλλά και στην περίσφιγξη συνδυάζεται με την απαλλαγή από τον οργανικό χαρακτήρα της μήτρας των FRPs.

Η αστοχία των μανδύων από ΙΑΜ είναι σταδιακή και όχι ψαθυρή σε σχέση με τα ΙΟΠ. Η συμπεριφορά της περιλαμβάνει προοδευτικά: (I)την ελαστική συμπεριφορά μέχρι την πρώτη ρωγμή της μήτρας, κατά την οποία η συμμετοχή του ινοπλέγματος θεωρείται αμελητέα, (II)την περιοχή επέκτασης και αύξησης των ρωγμών στην μήτρα που έχει ως αποτέλεσμα την θραύση μικρού αριθμού ιών και την ενεργοποίηση της ολίσθησή τους στο κονίαμα, διατηρώντας σταθερή τάση με αυξανόμενη παραμόρφωση (μη γραμμικότητα), (III)την τελική κατάσταση, όπου έχουμε πλήρης λειτουργία του συστήματος ουσιαστικά με τις ιδιότητες του ινοπλέγματος έως την αστοχία (εξ ου και η μορφή του διαγράμματος με τις 3 χαρακτηριστικές περιοχές συμπεριφοράς, σχήμα 2.7). Αυτό σημαίνει πως με την κατάλληλη επιλογή κονιάματος, επιτρέπεται η πλήρης εκμετάλλευση του υλικού του ινοπλέγματος. Τέλος, όπως ακριβώς στα ΙΟΠ, οι ιδιότητες της ενίσχυσης προκύπτουν από τον συνδυασμό των χαρακτηριστικών του κάθε υλικού ξεχωριστά, μέσω της μικρομηχανικής, και επηρεάζονται θετικά από τον αριθμό των στρώσεων.



Σχήμα 2.7: Μικροσκοπική θεώρηση για την συμπεριφορά του συστήματος TRM σε επίπεδο τάσεων – παραμορφώσεων (C. Filippou, C. Chrysostomou).



Σχήμα 2.8: Συνδυαστική εφαρμογή NSM και TRM σε υποστύλωμα



### 3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

#### 3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται περιεκτικά, το πείραμα αναφοράς πάνω στο οποίο βασίζεται η συγκεκριμένη εργασία. Το πείραμα αυτό, διερευνά τον τρόπο και την αποδοτικότητα της καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, με την χρήση στοιχείων (είτε ράβδους είτε λωρίδες) από Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRPs). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης είναι γνωστός ως NSM και συχνά, όπως και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, υποβοηθείται και από την χρήση του συστήματος TRM.

Αρχικά, έγινε έλεγχος σε ένα δοκίμιο χωρίς να έχει προηγηθεί η ενίσχυση του (Μη Ενισχυμένο Δοκίμιο-Control Specimen) ώστε έπειτα να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ενισχυμένων με αυτό. Καθώς ήταν σκόπιμο να ερευνηθεί η ανάλυση σε τύπους υποστυλώματος που χρήζουν αποτίμησης της ικανότητας τους και ενίσχυσης, τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με τρόπο τέτοιο ώστε να αντιπροσωπεύουν τύπους παλαιότερης σχεδίασης όσον αφορά στα υλικά, την γεωμετρία καθώς και τις λεπτομέρειες κατασκευής. Τέτοια στοιχεία κατασκευής είναι ιδιαίτερα επιρρεπή υπό τις σεισμικές φορτίσεις σε ψαθυρές αστοχίες όπως διατμητική αστοχία ή αστοχία οπλισμών λόγω θραύσης ή τοπικού λυγισμού. Επομένως, το δοκίμιο Control, όπως και τα υπόλοιπα, είχε τετραγωνική διατομή με διαστάσεις 250mm\*250mm. Το ύψος ήταν 1600mm (ουσιαστικό ύψος σε σχέση με το ολικό ύψος όπου υπάρχει διαφορά 200mm για λόγους ομαλής προσομοίωσης τα φόρτισης) δηλαδή από την στάθμη της βάσης του υποστυλώματος έως την στάθμη φόρτισης του, περίπου όσο το ½ ενός μέσου ορόφου κτιρίου. Σχετικά με το χρησιμοποιούμενο σκυρόδεμα, σύμφωνα με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αυτό υπολογίστηκε ότι έχει μέση αντοχή σε θλίψη, σύμφωνα με όλα τα δοκίμια,  $f_{cm} = 25.8$  MPa και θεωρήθηκε, για τους υπολογισμούς, αμελητέα η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων με χρήση της μέσης αυτής τιμής σε σχέση με την χρήση της εκάστοτε τιμής αντοχής του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά. Τέλος, όσον αφορά στον οπλισμό του σκυροδέματος, κατά μήκος τοποθετήθηκαν 4 ράβδοι είτε με διάμετρο Φ14 και όριο διαρροής 372 MPa , όριο θραύσης 433 MPa και οριακή παραμόρφωση 17% είτε με διάμετρο Φ12 και όριο διαρροής 330 MPa , όριο θραύσης 412 MPa και οριακή παραμόρφωση 23%. Εγκαρσίως, χρησιμοποιήθηκαν δί-τμητοι συνδετήρες με διάμετρο Φ8 ανά 200mm κατακόρυφη απόσταση (τυπική ελάχιστη απαίτηση) με όριο διαρροής 372 MPa , όριο

θραύσης 433 MPa και οριακή παραμόρφωση 17%. Και στις 3 περιπτώσεις, οι ράβδοι οπλισμού ήταν λείες. Η ελεύθερη απόσταση μεταξύ της εξωτερικής πλευράς του υποστρώματος και του συνδετήρα ήταν 20mm. Για την επαρκή στήριξη του κάθε δοκιμίου κατά την διάρκεια του πειράματος αλλά και την σωστή αγκύρωση των οπλισμών σκυροδετήθηκε επίσης ένα μεγάλο θεμέλιο στην βάση, σημαντικά οπλισμένο ώστε να θεωρηθεί πως δεν θα συμβάλλει στην αστοχία του δοκιμίου. Για την ρεαλιστική προσομοίωση της κατάστασης, υποστύλωμα και θεμέλιο κατασκευάστηκαν με διαφορετικούς ξυλότυπους και, άρα, με χρονική διαφορά μεταξύ τους για την ύπαρξη του αρμού σκυροδέτησης. Οι ράβδοι οπλισμού αγκυρώθηκαν μέσα στο θεμέλιο με μήκος αγκύρωσης τουλάχιστον 300mm και με χρήση αγκυρίου ακτίνας 50mm.

Η ενίσχυση των υπόλοιπων δοκιμίων έγινε με την μέθοδο NSM και TRM. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, είναι η ίδια με αυτήν που περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνοπτικά περιλαμβάνει την διάνοιξη των οπών καθ' ύψος των υποστρωμάτων αλλά και σε συγκεκριμένο βάθος στο θεμέλιο για την επαρκή αγκύρωσή του οπλισμού NSM (300mm), τοποθέτηση των οπλισμών NSM και σύνδεσή τους με το προ υπάρχον τμήμα μέσω είτε εποξειδικής ρητίνης είτε τσιμεντοκονίας (λεπτομερής γεωμετρία των NSM στο σχήμα 3.2). Επιπρόσθετα, σε απόσταση 10 mm από την βάση του υποστρώματος και για ύψος 590 mm, χρησιμοποιήθηκε, σε τρία δοκίμια το σύστημα TRM, κυρίως για υποστήριξη και αποφυγή φαινομένων τοπικού λυγισμού των στοιχείων ενίσχυση, για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν ινοπλέγματα άνθρακα με ίδια κατανομή στις 2 διευθύνσεις και τσιμεντοειδής μήτρα -κονίαμα- της οποίας τα χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω. Κάθε ίνα άνθρακα είχε πλάτος 3 mm και η καθαρή απόσταση μεταξύ 2 ινών ήταν 7 mm ενώ όριο θραύσης και μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκαν πως ήταν 3800 MPa και 225 GPa αντίστοιχα. Απλοϊκά, αναφέρεται το ισοδύναμο πάχος της κάθε στρώσης υφάσματος πως ήταν 0.095 mm. Συνολικά, για την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν 5 στρώσεις μήτρας συνολικού πάχους 10mm και 4 στρώσεις υφάσματος σε κάθε πλευρά.

Τα ενισχυμένα δοκίμια ήταν 10 επιπλέον του αρχικού μη ενισχυμένου. Χρησιμοποιήθηκαν είτε ράβδοι από οπλισμένα πολυμερή με ίνες ύαλου με διάμετρο Φ8 είτε λωρίδες από ινοπλισμένα πολυμερή άνθρακα με διατομή 16mm \* 2 mm είτε ράβδοι ανοξειδωτου χάλυβα με διάμετρο Φ12 (πίνακας 3.1). Η ονομασία του κάθε

ένα δοκίμιου υποδήλωνε κατά σειρά: 1)το στοιχείο ενίσχυσης, 2)Είτε τον τρόπο τοποθέτησης την ενίσχυσης στις πλευρές, εφόσον η ενίσχυση αυτή είναι με λωρίδες CFRP είτε, στην περίπτωση ενίσχυσης με ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα, το υλικό πλήρωσης της πλευρικής κατά μήκος οπής (ρητίνη ή κονία), 3)σε περίπτωση χρήσης και του συστήματος TRM επιπλέον του συστήματος NSM, η ονομασία περιλαμβάνει και τον όρο «J». Επομένως, για παράδειγμα: α) ένα δοκίμιο με ενίσχυση μόνο NSM με ράβδους πολυμερών με ίνες ύαλου (GFRP bars) κωδικοποιείται με την ονομασία “G” β) ένα δοκίμιο με ενίσχυση NSM με λωρίδες πολυμερών με ίνες άνθρακα (CFRP strips) κωδικοποιείται με την ονομασία C\_Per ή C\_Par , ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των λωρίδων της μεγαλύτερης διάστασης της διατομής είτε κάθετα είτε παράλληλα στην πλευρά του υποστυλώματος, αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση αυτή εδώ, έρχεται να καλύψει και τις ,όχι σπάνιες, περιπτώσεις όπου η διαθέσιμη ελεύθερη επικάλυψη που υπάρχει στο σκυρόδεμα είναι τόσο περιορισμένη που δεν επιτρέπει την τοποθέτηση των NSM οπλισμών με την διάταξη που επιβάλλεται στα δοκίμια C\_Per δηλαδή με την μεγάλη διάσταση της διατομής του CFRP κάθετη στην πλευρά του στύλου (όλες οι πληροφορίες για την ενίσχυση κάθε δοκίμιου δίνονται στον πίνακα 3.2)

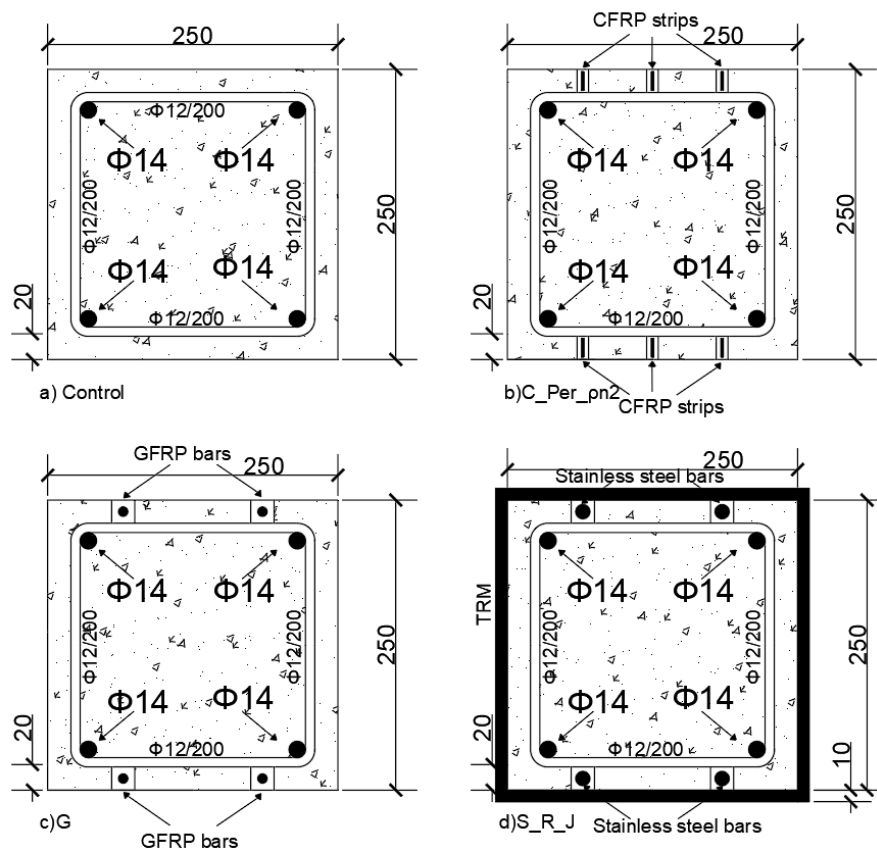
Μετά από τους απαραίτητους σύμφωνα με το EN 1015-11 ελέγχους σε δοκίμια 40 \* 40 \* 115 για το κονίαμα, υπολογίστηκαν 17.5 MPa και 6.31 MPa αντοχή έναντι θλίψης και κάμψης αντίστοιχα καθώς και μέτρο ελαστικότητας 8 GPa. Για τη ρητίνη, οι πληροφορίες που αντλήθηκαν από τον κατασκευαστή ανέφεραν αντοχή σε εφελκυσμό 30 MPa και μέτρο ελαστικότητας 4.5 GPa.

τύπος NSM	Διατομή mm <sup>2</sup>	E GPa	fy MPa	fu MPa	εμ %
CFRP strips	16*2 = 32	144.9	---	2173	1.83
GFRP bars	Φ8 = 50	65.2	---	1491	3.18
Stainless Steel bars	Φ12 = 113	200	668.94	761	19.15

Πίνακας 3.1: Πληροφορίες οπλισμών NSM

Όλα τα ενισχυμένα δοκίμια είχαν ίδια γεωμετρία και ποσοστά οπλισμών εκτός από δύο. Το C\_Per\_rs2 διέφερε από τα άλλα σχετικά με τον διαμήκη οπλισμού καθώς τοποθετήθηκαν ράβδοι με Φ12 αντί για Φ14 διάμετρο, ενώ το C\_Per\_rn2 είχε 1 παραπάνω στοιχείο οπλισμού NSM σε κάθε ενισχυμένη πλευρά σε σχέση με τα

υπόλοιπα. Η διατομή των δοκιμίων όπως και τα στοιχεία και ο τρόπος εφαρμογής των ενισχύσεων κάθε δοκιμίου παρέχονται παρακάτω στο σχήμα 3.1:

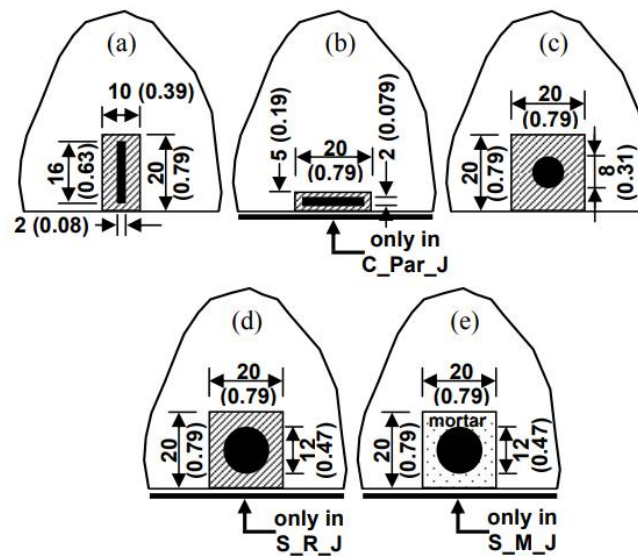


Σχήμα 3.1: Διατομές επιλεγμένων δοκιμίων

Δοκίμιο	Διαμήκης Οπλισμός	NSM	Τοποθέτηση	Υλικό Πλήρωσης	TRM
Control	4Φ14	---	---	---	---
C_Per	4Φ14	CFRP trips	Κάθετα	Ρητίνη	ΌΧΙ
C_Per_pn2	4Φ14	CFRP strips	Κάθετα	Ρητίνη	ΌΧΙ
C_Per_ps2	4Φ12	CFRP strips	Κάθετα	Ρητίνη	ΌΧΙ
C_Par	4Φ14	CFRP strips	Παράλληλα	Ρητίνη	ΌΧΙ
C_Par_J	4Φ14	CFRP strips	Παράλληλα	Ρητίνη	ΝΑΙ
G	4Φ14	GFRP bars	---	Ρητίνη	ΌΧΙ
S_R	4Φ14	Stainless Steel bars	---	Ρητίνη	ΌΧΙ
S_R_J	4Φ14	Stainless Steel bars	---	Ρητίνη	ΝΑΙ
S_M	4Φ14	Stainless Steel bars	---	Κονίαμα	ΌΧΙ
S_M_J	4Φ14	Stainless Steel bars	---	Κονίαμα	ΝΑΙ

Πίνακας 3.2: Πληροφορίες για κάθε δοκίμιο

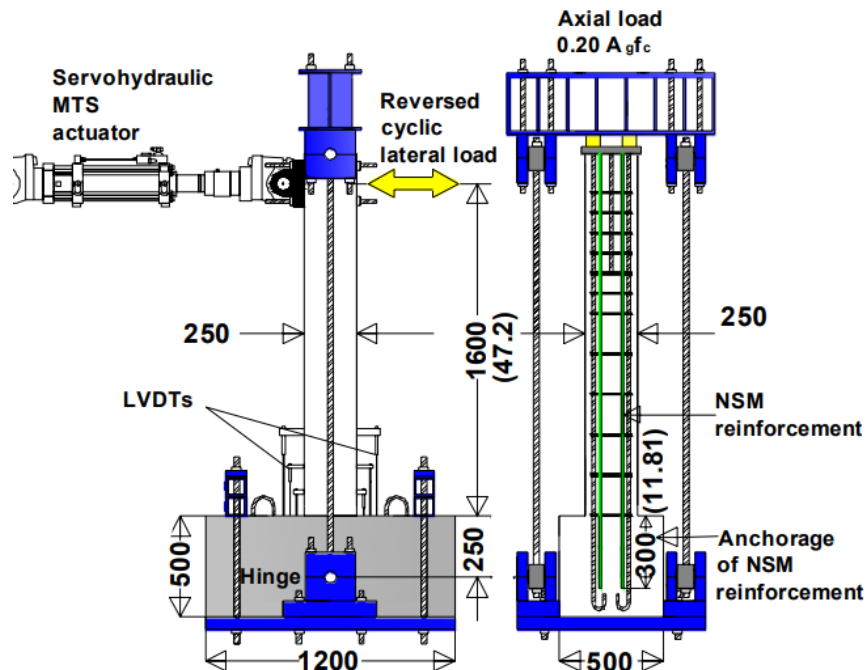




Σχήμα 3.2: Λεπτομέρειες τοποθέτησης των μέσων ενίσχυσης

Ο τρόπος ελέγχου των δοκιμίων ήταν μία προσπάθεια προσομοίωσης όσο το δυνατόν καλύτερα της επίδρασης των σεισμικών φορτίων παράλληλα με τα οριζοντιοστά μόνιμα φορτία που επιδρούν στις κατασκευές κατά τη διάρκεια των σεισμών. Οπότε, επιλέχθηκε ο συνδυασμός κατακόρυφης σταθερής αξονικής δύναμης στη διατομή του υποστυλώματος με ταυτόχρονη μεταβαλλόμενη πλευρική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε δοκίμιο επιβλήθηκαν αξονικά φορτία σταθερά και ίσα περίπου με το 20% της φέρουσας ικανότητάς τους σε θλίψη δηλαδή τιμή  $N_{ed} = 0.20 \cdot A_g \cdot f_{cm}$  όπου  $A_g$  είναι το γεωμετρικό εμβαδόν της διατομής. Αυτό έγινε με την βοήθεια τεσσάρων υδραυλικών κυλίνδρων με ικανότητα προσαρμοζόμενης πίεσης που δρούσαν πάνω σε μεταλλική πλάκα. Οι διαφορές εν μέσω του πειράματος και μεταξύ των διαφορετικών δοκιμίων θεωρήθηκαν αμελητέες. Για την πλευρική φόρτιση, χρησιμοποιήθηκε διάταξη με έμβολο MTS με μέγιστη ικανότητα φόρτισης 250 kN το οποίο συνδέθηκε μέσω μεταλλικής πλάκας πάνω στην 1 από τις 2 κρίσιμες πλευρές ενίσχυσης του υποστυλώματος. Η διαδικασία ελέγχου εμπεριείχε φόρτιση του εμβόλου είτε με θετικές είτε με αρνητικές τιμές που μεταφραζόταν σε ανακυκλιζόμενη πλευρική μετατόπιση του δοκιμίου. Η μετατόπιση αυτή ήταν ανά διαστήματα αυξανόμενη κατά 5 mm και επιβαλλόταν με σχετικές ταχύτητες 0.2 mm/sec έως 1.1 mm/sec. Οι μετρήσεις των απαραίτητων χαρακτηριστικών και αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση έξι μετατροπέων μετατόπισης καθ' ύψος των πλευρών ενώ επίσης τοποθετήθηκαν αισθητήρες πάνω στις ράβδους

ενίσχυσης για την μέτρηση της τάσης τους κατά τη φόρτιση, της παραμόρφωσης καθώς και της συνάφειας με το υλικό πλήρωσης των οπών. Η επιβαλλόμενη δύναμη παρέχεται μέσω του ίδιου του εμβόλου. Στο σχήμα 3.3 παρακάτω φαίνεται η γενική διάταξη για την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 3.3: Όψη και τομή υποστυλώματος - Διάταξη πειράματος

### 3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών σε όλα τα δοκίμια, καταγράφηκαν τα αποτελέσματα σε συγκριτικά διαγράμματα και πίνακες. Τα δεδομένα που ήταν καίριας σημασίας ήταν η μέγιστη τιμή (peak) του πλευρικού επιβαλλόμενου από το έμβολο φορτίου, η τιμή της στροφής χορδής (drift) στο σημείο αυτό καθώς και η στρόφη χορδής στο σημείο όπου παρατηρήθηκε σημαντική πτώση της φέρουσας ικανότητας δηλαδή αστοχία. Σημειώνεται πως, ως drift λαμβάνεται ο λόγος της σχετικής μετατόπισης του υποστυλώματος λόγω της πλευρικής επιβολής μετακινήσεων προς το ύψος του υποστυλώματος το οποίο είναι 1600mm καθώς όπως τονίστηκε προηγουμένως, ενδιέφερε η απόσταση της βάσης από το σημείο φόρτισης. Όλα τα παραπάνω, όπως είναι λογικό, είχαν διαφορές μεταξύ τους ανάλογα με την διεύθυνση μετατόπισης. Επομένως, στον πίνακα 3.3, φαίνονται και για τις δύο διευθύνσεις (+ και -) το μέγιστο φορτίο και η αντίστοιχη στρόφη χορδής, η στρόφη χορδής στην αστοχία όπως και τα ποσοστά που επιτεύχθηκαν μέσω της κάθε περίπτωσης ενίσχυσης όσον αφορά την αύξηση ή όχι των τιμών μέγιστου φορτίου

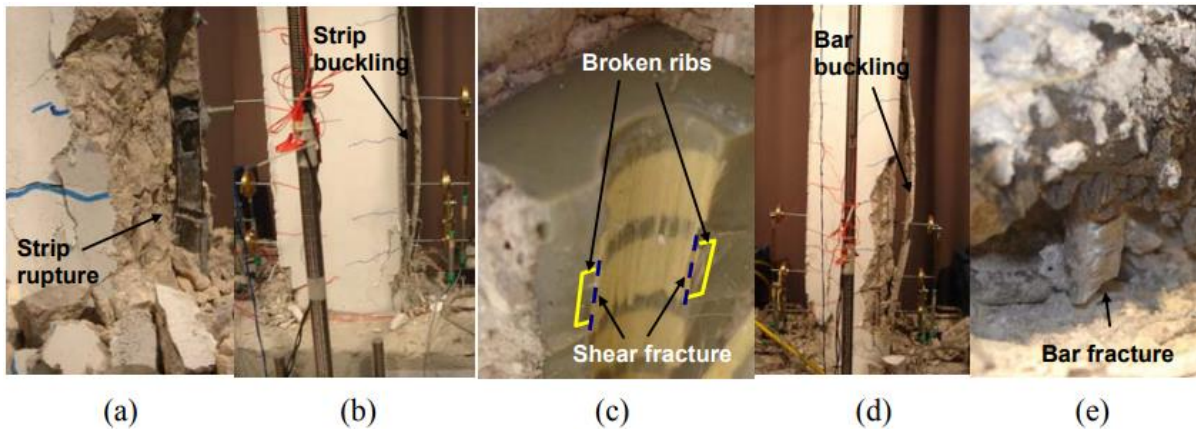
$F_{max.R} / F_{max.C}$  (όπου  $F_{max.R}$  και  $F_{max.C}$  είναι τα μέγιστα φορτία που επιτεύχθηκαν για το ενισχυμένο και το μη ενισχυμένο δοκίμιο αντίστοιχα) και του drift στο σημείο αστοχίας ( $drift.R / drift.C$  όπου  $drift.R$  και  $drift.C$  είναι οι τιμές της στροφής χορδής στο σημείο αστοχίας για το ενισχυμένο και το η ενισχυμένο δοκίμιο αντίστοιχα). Επιπροσθέτως, σημειώνεται ο τρόπος-μορφή της αστοχίας που παρατηρήθηκε (από τα σχήματα 3.4 και 3.5) και οδήγησε στην ολοκλήρωση της φόρτισης. Οι αστοχίες αυτές αναφέρονται ως:

- (i) B δηλαδή τοπικός λυγισμός ράβδου χάλυβα ή NSM οπλισμού,
- (ii) F δηλαδή θραύση του οπλισμού
- (iii) D δηλαδή αποκόλληση λωρίδας CFRP
- (iv) PO δηλαδή αστοχία στην αγκύρωση του οπλισμού.

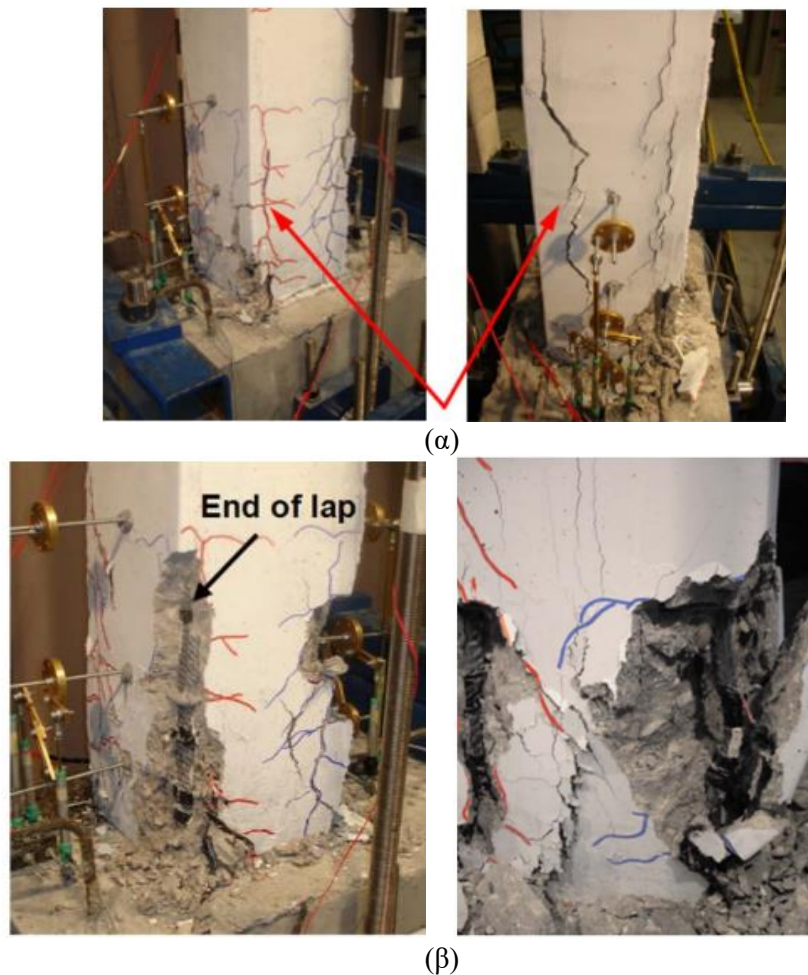
Οι υστερητικές καμπύλες μετατράπηκαν σε καμπύλες ικανότητας που περιείχαν την περιβάλλουσα κάθε περίπτωσης για τον σκοπό της εύκολης σύγκρισης των αποτελεσμάτων (σχήμα 3.6).

Δοκίμιο	Fmax kN		drift %		drift % στην αστοχία		Fmax.C / Fmax.R		drift.R / drift.C		Τρόπος Αστοχίας
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
Control	33.08	33.69	2.81	4.68	6.25	6.25	1	1	1	1	B
C_Per	41.5	42.72	2.81	3.44	3.75	4.68	1.25	1.27	0.6	1	F
C_Per_pn2	46.26	43.82	2.81	2.81	4.06	3.13	1.40		0.65	1	F
C_Per_ps2	36.25	33.94	1.87	2.81	3.75	3.75	--	--	--	--	F
C_Par	34.55	35.03	1.87	1.87	3.44	4.38	1.04	1.04	0.55	1	D
C_Par_J	48.2	42.45	4.38	2.5	6.87	5.93	1.46	1.26	1.1	1	F+D
G	39.58	42.03	3.75	3.75	5.31	5.31	1.20	1.25	0.85	1	B
S_R	52.73	56.52	4.38	3.75	5.31	5.31	1.59	1.68	0.85	1	B
S_R_J	59.24	67.7	5.31	6.25	>7.81	7.81	1.79	2.01	>1.25	1	F
S_M	41.31	41.45	2.18	2.18	5	5	1.25	1.23	0.8	1	PO
S_M_J	42.03	44.32	2.18	2.18	7.81	7.81	1.27	1.31	1.25	>1.25	PO

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών



Σχήμα 3.4. Μορφές αστοχίας του οπλισμού στο πείραμα, α)Θραύση της λωρίδας CFRP β)Λυγισμός της λωρίδας CFRP γ)Ολίσθηση οπλισμών NSM δ)Λυγισμός ράβδου ε)Θραύση ράβδου



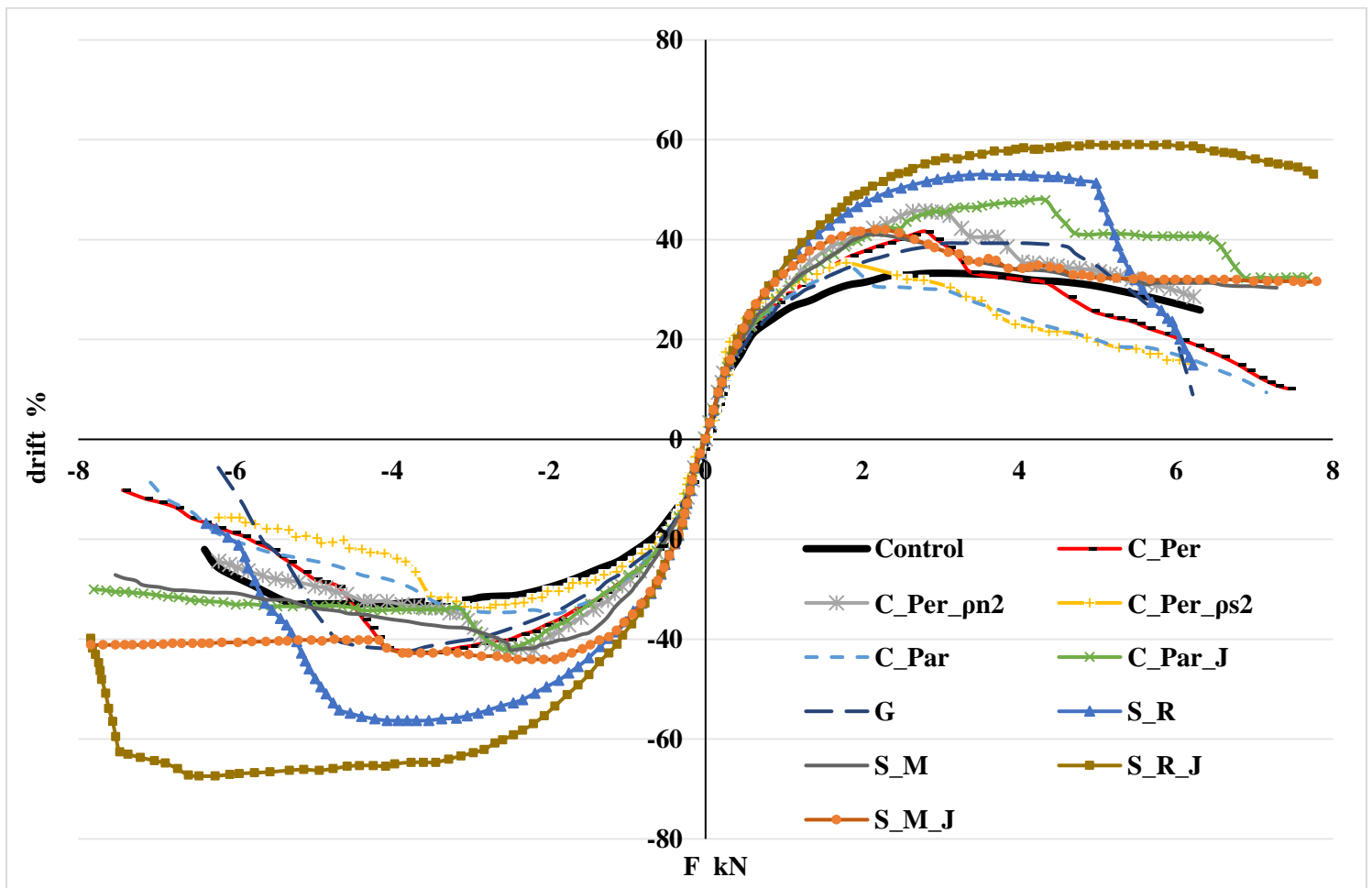
Σχήμα 3.5: Μορφές αστοχίας του σκυροδέματος στο πείραμα, (α) Καμπτικές ρηγματώσεις (β) Αποσύνθεση και σύνθλιψη του σκυροδέματος

Παράλληλα με τον υπολογισμό των φορτίων, μεγάλη σημασία δόθηκε στην συνάφεια (τάση συνάφειας  $\tau_{b,max}$  και  $\tau_b$ , μέγιστη και μέση αντίστοιχα) μεταξύ του νέου τοποθετούμενου οπλισμού και του υλικού πλήρωσης όπως και στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις  $\epsilon_{f,eff}$  στα στοιχεία NSM (πίνακας 3.4). Ο λόγος της επιβαλλόμενης

προς την μέγιστη δυνατή παραμόρφωση του NSM οπλισμού  $\epsilon_{f,eff} / \epsilon_{f,max}$ , δείχνει αδρομερώς το ποσοστό εκμετάλλευσης της αντοχής του οπλισμού ενίσχυσης.

Δοκίμιο	Μέγιστη τάση συνάφειας $\tau_{b,max}$ MPa	Μέση τάση συνάφειας $\tau_b$ MPa	Μέγιστη τάση $\epsilon_{f,eff}$ %	$\epsilon_{f,eff} / \epsilon_{f,max}$
C_Per	8.25	4.07	0.95	0.52
C_Per_pn2	9.75	3.91	0.93	0.51
C_Per_ps2	--	--	0.85	0.46
C_Par	4.57	2.01	0.5	0.27
C_Par_J	11.75	5.93	1.23	0.67
G	11.56	5.61	1.1	0.35
S_R	--	--	1.68	0.09
S_R_J	16.94	10.57	10.12	0.53
S_M	7.59	6.02	0.18	0.009
S_M_J	5.77	4.21	0.26	0.014

Πίνακας 3.4: Τάσεις συνάφειας και παραμορφώσεις οπλισμού NSM



Σχήμα 3.6: Περιβάλλουσες καμπύλων F (kN) – drift (%)

### 3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, διαπιστώνονται τα εξής σημαντικά σημεία:

- Σε όλες τις περιπτώσεις, η αστοχία ήταν καμπτικής μορφής, κάτι που επιδιώχθηκε εξ αρχής προκειμένου να είναι σαφής η αποδοτικότητα των επεμβάσεων κατά βάση στην καμπτική ενίσχυση των στοιχείων.
- Γενικότερα, σε επίπεδο αύξησης της αντοχής, η ενίσχυση με ράβδους ανοξειδώτου χάλυβα είχε σαν αποτέλεσμα φορτία κατά ,τουλάχιστον 20% μεγαλύτερα σε σχέση με τις άλλες προτεινόμενες μεθόδους ενίσχυσης. Σε όρους παραμόρφωσης, μικρότερη επίδραση σε αυτή είχαν οι λωρίδες CFRP κυρίως λόγω μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τις GFRP ράβδους, και λόγω μη ύπαρξης μετελαστικής-πλάστιμης συμπεριφοράς (παρά το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας) σε σχέση με τον ανοξειδωτο χάλυβα.
- Σε όλες τις περιπτώσεις, πέραν αυτών όπου τα δοκίμια ενισχύθηκαν και με TRM, παρατηρήθηκε αποσύνθεση του κατώτερου τμήματος της επικάλυψης του δοκιμίου καθώς και ενός τμήματος του πυρήνα στο Control ενώ καμπτικές ρηγματώσεις σχηματίστηκαν από τα αρχικά στάδια της φόρτισης και διαδόθηκαν και μεγιστοποιήθηκαν με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων.
- Αστοχία από λυγισμό του χάλυβα οπλισμού, παρατηρήθηκε στο μη ενισχυμένο - control- δοκίμιο, καθώς στα υπόλοιπα η ελαστική και με μεγάλη αντοχή, συμπεριφορά του οπλισμού NSM δεν επέτρεψε τον λυγισμό του εσωτερικού οπλισμού. Βέβαια, στα ενισχυμένα δοκίμια, η αστοχία του νέου οπλισμού NSM ακολουθούταν από λυγισμό του εσωτερικού οπλισμού.
- Σε όλες τις περιπτώσεις, πέραν αυτής του C\_Par, παρατηρήθηκε αύξηση στο μέγιστο φορτίο επιβολής από 25% έως και 100%.
- Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5, σε καμία των περιπτώσεων ενίσχυσης με CFRP λωρίδες, δεν επετεύχθη η μέγιστη παραμόρφωση του NSM οπλισμού. Παρ' όλα αυτά όμως, η αστοχία επήλθε λόγω θραύσης του οπλισμού αυτού ενίσχυσης, υποδεικνύοντας έτσι την επιβλαβή επίδραση της κυκλικής μορφής φορτίσεων στους οπλισμούς και τις κατασκευές.



- Η ρητίνη έναντι της τσιμεντένιας μήτρας είχε σημαντικό πλεονέκτημα. Στα δοκίμια με την τσιμεντοκονία παρατηρήθηκε είτε αποκόλληση του NSM οπλισμού είτε αστοχία της αγκύρωσής του.
- Στα δοκίμια που ενισχύθηκαν ταυτόχρονα, στο κάτω τμήμα τους, με TRM σύστημα, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στην αντίστασή τους σε καμπτικό λυγισμό των NSM οπλισμών, καταλήγοντας έτσι, σε μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης του μέγιστου πλευρικού φορτίου. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελεί το δοκίμιο C\_Par\_J, όπου σε σχέση με το αντίστοιχο αλλά χωρίς TRM ενίσχυση δοκίμιο C\_Par, σημειώθηκαν στις δύο διευθύνσεις αυξήσεις του μέγιστου φορτίου κατά 22% και 40% αντίστοιχα.

Γενικότερα, το ποσοστό εκμετάλλευσης της μέγιστης δυνατής παραμόρφωσης των οπλισμών ενίσχυσης συμβάδιζε με την συνολική συμπεριφορά του δοκιμίου σε όρους αντοχής και ικανότητας μετατοπίσεων. Δηλαδή, στις περιπτώσεις όπου δεν υπήρξε αστοχία του NSM οπλισμού από τα πρώτα κιόλας στάδια, κυρίως λόγω αποκόλλησης ή λυγισμού, η βελτίωση στην απόκριση του ενισχυμένου υποστυλώματος ήταν δεδομένη και σημαντική, πράγμα που αποτελεί και ένα από τα σημαντικά συμπεράσματα του πειράματος αυτού. Από παρατηρήσεις σχετικά με την δυσκαμψία του στύλου μετά τις επεμβάσεις, αυτή θεωρήθηκε αυξημένη όμως σε κάθε περίπτωση δε θα πρέπει αυτό να αποτελέσει αρνητικό αντεπιχείρημα στην ενίσχυση των υποστυλωμάτων (με την σκέψη πως μεγαλύτερη δυσκαμψία συνεπάγεται και μεγαλύτερα σεισμικά φορτία) καθώς το σημαντικότερο εγχείρημα είναι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων σε σχέση με τις δοκούς και αυτό αποτελεί επίσης σημαντικό αποτέλεσμα του πειράματος. Τέλος το σημαντικότερο συμπέρασμα είναι πως, με τον κατάλληλο συνδυασμό της μεθόδου NSM με FRPs ή με ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα με την μέθοδο TRM αποδείχθηκε πως είναι δυνατή η επίτευξη μεγαλύτερων αντοχών ως προς την πλευρική φόρτιση και άρα την καμπτική ενίσχυση ενός υποστυλώματος χωρίς όμως ταυτόχρονα την καθήλωση της ικανότητας παραμόρφωσης και της πλαστιμότητάς του.





## 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕΛΟΥΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ABAQUS

Παρά την καλύτερη ακρίβεια και τα σημαντικά ευρήματα της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού μέσω των πειραματικών ερευνών, αυτές κυρίως λόγω υπολογιστικού αλλά και υλικού κόστους πολλές φορές είναι αδύνατον να συμβούν ή/και να διευρυνθούν σε μεγάλες διαστάσεις για την μελέτη διαφόρων σεναρίων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιείται πλέον για την εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία προσέγγιση αριθμητικής μεθόδου, για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων διαφορικών εξισώσεων. Μέσω αυτής, γίνεται φυσική προσέγγιση του προβλήματος διαμερίζοντας τον χώρο σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία ορίζονται εξισώσεις που έχουν ακριβή λύση. Από το 1960 και μετά η ανάπτυξη της μεθόδου και η εφαρμογή της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων του μηχανικού συμβαδίζει με την τεχνολογία των Η/Υ. Κι αυτό γιατί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, που δεν είναι δυνατό να επιλυθεί χωρίς τη χρήση του Η/Υ. Η αύξηση της υπολογιστικής ικανότητας των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών (Η/Υ) δίνει τη δυνατότητα μελέτης και ανάλυσης όλο και συνθετότερων προβλημάτων.

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου προβλήματος με ένα σύνολο απλών υπό-πεδίων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Η διαδεδομένη χρήση της μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες. Πολλά είναι τα υπολογιστικά πακέτα που συμπεριλαμβάνουν ή χρησιμοποιούν αποκλειστικά την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ένα από αυτά είναι το ABAQUS/CAE 2018.

Το ABAQUS/CAE είναι ένα διαδραστικό λογισμικό σχεδίασης που επιτρέπει την σχεδίαση ή/και την εισαγωγή γεωμετρίας από εξωτερικά σχεδιαστικά προγράμματα καθώς και την διακριτοποίηση σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Η διαφορά του σε

σχέση με άλλα προγράμματα (π.χ. LS DYNA, ANSYS κ.α.) έγκειται στην πολύ ικανοποιητική του ανάλυση και επεξεργασία σε προβλήματα που χαρακτηρίζονται από έντονη μη γραμμικότητα στη γεωμετρία ή/και στα υλικά ή/και στις συνοριακές συνθήκες. Ειδικά για την μη γραμμικότητα στα υλικά, παρέχεται πληθώρα δυνατοτήτων δημιουργίας υλικών όπως και η χρήση ρουτίνας UEL για την δημιουργία υλικού προσαρμοσμένο στις ανάγκες του προβλήματος του χρήστη, γεγονός που δικαιολογεί γιατί είναι τόσο δημοφιλές ειδικά σε διατριβές και μελέτες ακαδημαϊκού τύπου. Στην διπλωματική εργασία αυτή, λόγω της μη γραμμικότητας του υλικού του σκυροδέματος, η χρήση του ABAQUS/CAE αποτέλεσε την πρώτη επιλογή. Παρέχονται επίσης, δυνατότητα στατικής και δυναμικής ανάλυσης από το πρόγραμμα, καθώς και εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων με αποτέλεσμα την πολύ καλή προσομοίωση ακόμα και πολύπλοκων γεωμετριών.

Για την ολοκληρωμένη ανάλυση ενός προβλήματος μέσω του ABAQUS, απαιτούνται τρία στάδια. Πρώτο είναι αυτό της προεπεξεργασίας (preprocessing), έπειτα ακολουθεί η επεξεργασία-ανάλυση (processing) και τέλος η προσομοίωση ολοκληρώνεται με τη μετεπεξεργασία (postprocessing). Το περιβάλλον του χωρίζεται σε ορισμένες ομάδες εντολών, κάθε μία από τις οποίες είναι υπεύθυνη για συγκεκριμένο τμήμα της προ- ή μετ- επεξεργασίας. Συγκεκριμένα, οι ομάδες που πάντα χρησιμοποιούνται είναι:

- **Part**, όπου παρέχεται η γεωμετρία του φορέα ή ακόμα καλύτερα των στοιχείων ενός φορέα.
- **Property**, όπου ορίζονται οι ιδιότητες για τα χρησιμοποιούμενα υλικά.
- **Assembly**, όπου στην περίπτωση των στοιχείων, ορίζεται η σχετική τους θέση στο σύστημα συντεταγμένων.
- **Step**, όπου καθορίζεται το είδος της ανάλυσης.
- **Interaction**, δίνεται ο τρόπος και οι ιδιότητες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων του assembly.
- **Load**, όπου καθορίζονται τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες.
- **Mesh**, όπου γίνεται η διακριτοποίηση των στοιχείων
- **Job**, όπου υποβάλλεται το μοντέλο για ανάλυση.
- **Visualization**, όπου γίνεται η μετ-επεξεργασία δηλαδή προβολή αποτελεσμάτων.

Ένα χαρακτηριστικό του ABAQUS είναι το γεγονός ότι ο χρήστης είναι υπεύθυνος για την απόφαση και την τήρηση κοινών μονάδων μέτρησης καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας προ επεξεργασίας καθώς δεν υπάρχουν έτοιμα πακέτα προεπιλογής μονάδων. Για αυτόν το λόγο, πριν γίνει οποιαδήποτε ανάλυση πρέπει να επιλέγονται μονάδες, οι οποίες ανήκουν σε ένα ενιαίο και σταθερό σύστημα μονάδων χωρίς συντελεστές μετατροπής. Τα ενιαία συστήματα που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 <sup>3</sup> kg)	slug	lbf s <sup>2</sup> /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m <sup>2</sup> )	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	lbf/ft <sup>2</sup>	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
Energy	J	mJ (10 <sup>-3</sup> J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m <sup>3</sup>	tonne/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

Σχήμα 4.1: Ενιαία συστήματα μονάδων μέτρησης

Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθούν οι μονάδες του συστήματος SI(mm)

## 4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Μετά την προ- επεξεργασία, ακολουθεί το βήμα της ανάλυσης από το πρόγραμμα. Στο ABAQUS, υπάρχουν δύο χαρακτηριστικές μέθοδοι ανάλυσης που αποτελούν και ξεχωριστά τμήματα από το ABAQUS/CAE. Είναι η Implicit (ABAQUS/Standard) και η Explicit (ABAQUS/Explicit). Και για τις δύο μεθόδους, η ισορροπία του προβλήματος ορίζεται μέσω της εξίσωσης:  $M \cdot \ddot{u} = P - I$ , όπου  $M$  είναι το μητρώο μάζας,  $P$  είναι το σύνολο των φορτίσεων που επιβάλλονται ως εξωτερικά στο προσομοίωμα,  $I$  είναι το σύνολο των εσωτερικών εντάσεων που δημιουργούνται και  $\ddot{u}$  είναι το διάνυσμα των επιταχύνσεων των κόμβων του προσομοιώματος. Η επίλυση γίνεται με την χρήση του διανύσματος των επιταχύνσεων για τον υπολογισμό των εσωτερικών μεγεθών έντασης. Η βασική διαφορά τους έγκειται στον τρόπο χρονικής ολοκλήρωσης κατά την διαδικασία της ανάλυσης προβλημάτων.

### 4.2.1 ABAQUS/Standard

Είναι ένας από τους δύο διαθέσιμους επιλυτές (solvers) του προγράμματος, χρησιμοποιώντας πεπλεγμένο αλγόριθμο για την επίλυση προβλημάτων στατικής ή

δυναμικής ισορροπίας. Με τον πεπλεγμένο αυτόν αλγόριθμο (άρρητο), υποτίθεται μια τιμή της μεταβλητής σε κάθε αρχή βήματος και η τιμή αυτή μεταβάλλεται μετά το τέλος κάθε επαναληπτικής διαδικασίας έως ότου υπάρξει σύγκλιση των τιμών και τελική επίλυση του προβλήματος. Βασίζεται στην μέθοδο Newton-Raphson (σχήματα 4.3-4.4) με την οποία επιχειρείται η ικανοποίηση της δυναμικής εξίσωσης στο πέρας κάθε χρονικού διαστήματος  $t+\Delta t$  και ταυτόχρονα ο υπολογισμός των μετατοπίσεων εκείνη τη χρονική στιγμή. Το χρονικό βήμα,  $\Delta t$ , μπορεί να είναι σχετικά μεγάλο σε σχέση με αυτό που μπορεί να απαιτηθεί από τον ρητό αλγόριθμο (explicit) καθώς στην άρρητη – έμμεση μέθοδο ορίζεται εξ αρχής και παραμένει απολύτως σταθερό. Κάθε βήμα απαιτεί τόσες επαναλήψεις ώστε να καταστεί δυνατή η μείωση των δράσεων εντός επιθυμητού ορίου. Έτσι, σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ , οι εξισώσεις εκφράζονται συναρτήσει των μετατοπίσεων ως εξής:

$$\mathbf{K}_j * \mathbf{C}_j = \mathbf{P}_j - \mathbf{I}_j - \mathbf{M}_j * \ddot{\mathbf{u}}_j$$

Όπου  $\mathbf{K}_j$  είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψία το οποίο επαναπροσδιορίζεται βάσει των νέων χαρακτηριστικών του κάθε πεπερασμένου στοιχείου,  $\mathbf{M}_j$  το μητρώο μάζας,  $\mathbf{C}_j$  η διόρθωση με την οποία η μέθοδος Newton-Raphson υπολογίζει σε κάθε βήμα τις μετακινήσεις  $\Delta u_j$ ,  $\mathbf{P}_j$  το διάνυσμα των επικόμβιων εξωτερικών φορτίσεων,  $\mathbf{I}_j$  το διάνυσμα των εσωτερικών εντάσεων,  $\ddot{\mathbf{u}}_j$  το διάνυσμα των επιταχύνσεων

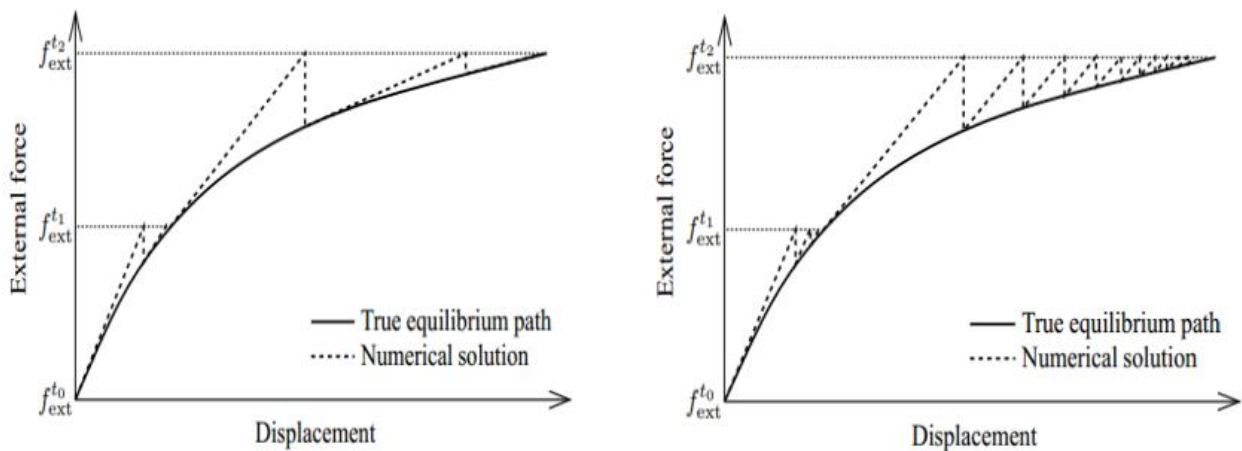
Επαναλήψεις	Σχετικό Σφάλμα
1	1
2	$10^{-2}$
3	$10^{-4}$
.	.
.	.
.	.

Σχήμα 4.2: Τετραγωνική ταχύτητα σύγκλισης

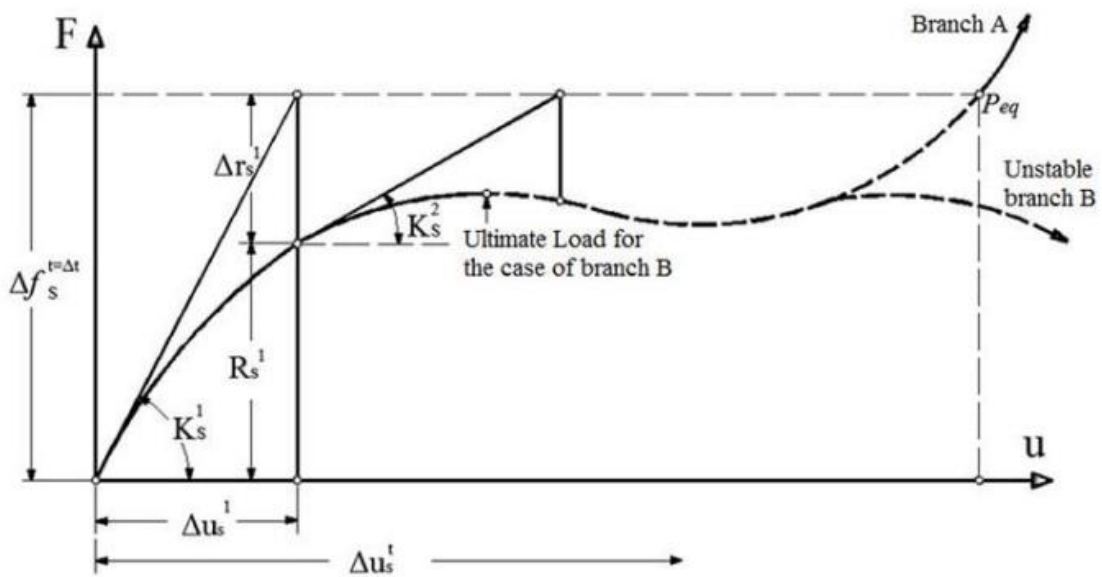
Σε περιπτώσεις ύπαρξης έντονων μη γραμμικοτήτων και α-συνεχειών, όπως επαφή μεταξύ πολλών στοιχείων ή σχετική ολίσθηση τριβής, είναι πιθανόν η τετραγωνική σύγκλιση να μην επιτευχθεί με αποτέλεσμα την απαίτηση επαυξητικών επαναλήψεων προκειμένου να επέλθει σύγκλιση του οποίου προφανές επακόλουθο είναι η συνεχής μείωση του σταθερού χρονικού βήματος οδηγώντας έτσι σε μεγάλο υπολογιστικό

κόστος ενώ πάντα υπάρχει ο κίνδυνος μη τελικής σύγκλισης άρα αδυναμίας ανάλυσης (σχήμα 4.2).

Συνήθως, για στατικής φύσεως προβλήματα, χρησιμοποιείται η Γενική Στατική Ανάλυση (Static, General) η οποία είναι μία παραλλαγή της μεθόδου Newton-Raphson για δυνατότητα επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων. Επίσης, ακόμα ένα είδος στατικής ανάλυσης είναι η Static Riks όπου χρησιμοποιείται κυρίως σε αναλύσεις όπου αναμένονται πολύ έντονες παραμορφώσεις όπως σε προβλήματα που εμπεριέχουν μορφές λυγισμού μελών.



Σχήμα 4.3: Επαυξητική – Επαναληπτική Διαδικασία με έλεγχο των δυνάμεων  
 α) Αρχική μέθοδος Newton-Raphson β) Τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson



Σχήμα 4.4: Επαυξητική Διαδικασία της Newton Raphson με έλεγχο των μετατοπίσεων

#### 4.2.2 ABAQUS/Explicit

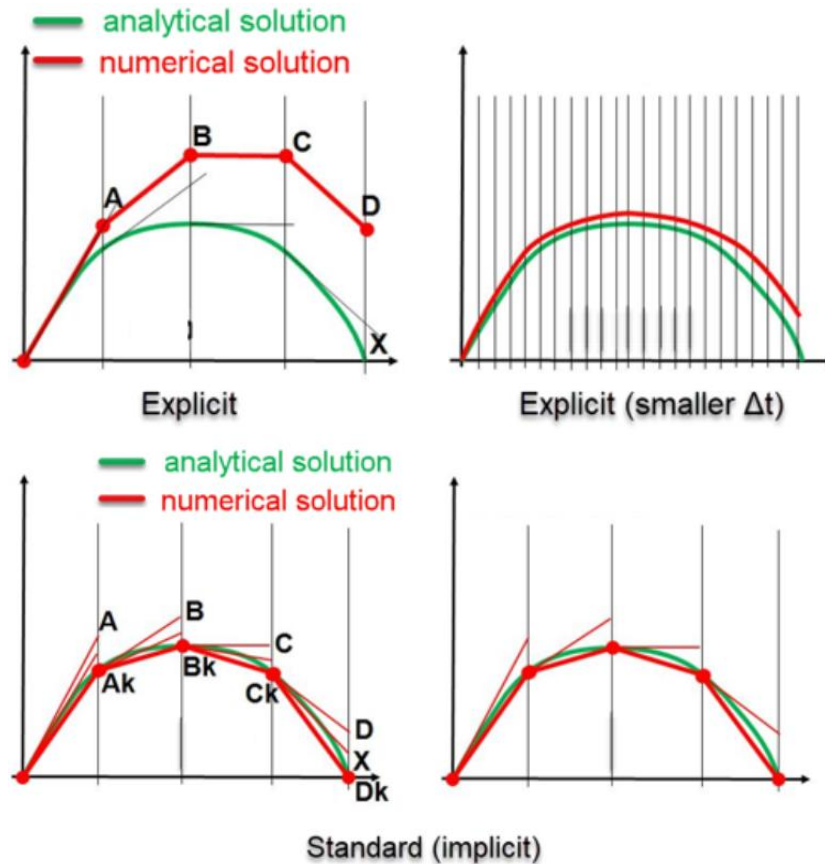
Σε αντίθεση με την έμμεση ανάλυση, όπου πρέπει, όπως τονίσθηκε, να γίνουν επαναληπτικές επιλύσεις στο τέλος κάθε βήματος, προκειμένου να επέλθει σύγκλιση στο πρόβλημα, στην άμεση ανάλυση η λύση προσδιορίζεται χωρίς την χρήση επαναληπτικής διαδικασίας. Αντί αυτού, με προοδευτική διαδικασία, η λύση του επόμενου βήματος επέρχεται από την κινηματική κατάσταση μόνο του ακριβώς προηγούμενου βήματος. Οι κομβικές επιταχύνσεις μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ικανοποιούν το ισοζύγιο των εξωτερικών και των εσωτερικών εντατικών μεγεθών κατά τη διάρκεια της επαφής. Ο αλγόριθμος αυτός, είναι απλούστερος καθώς η σύγκλιση εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του χρονικού βήματος  $\Delta t$  το οποίο πρέπει να είναι πολύ μικρό. Σε κάθε χρονική στιγμή, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να αποτελέσουν τις αρχικές συνοριακές συνθήκες για την ανάλυση του βήματος της επόμενης χρονικής στιγμής.

Στην άμεση (Explicit) δυναμική ανάλυση εκτελείται αποτελεσματικά ένας μεγάλος αριθμός πολύ μικρών χρονικών βημάτων (συγκριτικά σχήματα 4.5). Χρησιμοποιείται ρητή χρονική ολοκλήρωση με κανόνα κεντρικών διαφορών, ενώ κάθε βήμα ολοκληρώνεται γρηγορότερα σε σχέση με την έμμεση ολοκλήρωση δυναμική ανάλυση που χρησιμοποιεί το ABAQUS/Standard, καθώς δεν επιδιώκεται ταυτόχρονη λύση του συστήματος εξισώσεων. Επομένως, η απαίτηση αποθηκευτικού χώρου και μνήμης του H/Y είναι αρκετά μειωμένη για την ανάλυση της ίδιας ακριβώς προσομοίωσης από τον explicit solver σε σχέση με τον implicit. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημά της είναι η έλλειψη του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας που απαιτείται στην μέθοδο άρρητης ανάλυσης. Η υπολογιστική αποδοτικότητα της μεθόδου οφείλεται επίσης στην χρήση διαγώνιου μητρώου μάζας για τα στοιχεία. Έτσι, οι επιταχύνσεις σε κάθε βήμα υπολογίζονται με την εξίσωση:

$$\ddot{\mathbf{u}}^N_{(i)} = (\mathbf{M}^{NJ})^{-1} * (\mathbf{P}^J_{(i)} - \mathbf{I}^J_{(i)}),$$

όπου  $\mathbf{M}^{NJ}$  είναι το μητρώο μάζας,  $\mathbf{P}^J$  είναι το διάνυσμα των επιβαλλόμενων φορτίων στους κόμβους ανά χρονική στιγμή,  $\mathbf{I}^J$  το διάνυσμα των εσωτερικών μεγεθών έντασης και  $\ddot{\mathbf{u}}^N$  το διάνυσμα των επιταχύνσεων στους κόμβους. Χρησιμοποιείται το διαγώνιο μητρώο μάζας αφενός γιατί το αντίστροφο αυτού είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί και αφετέρου καθώς το διάνυσμα πολλαπλασιασμού του αντιστρόφου της μάζας από την

αδρανειακή δύναμη απαιτεί  $n$  πράξεις, όπου  $n$  ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου.



Σχήμα 4.5: Χρονική επαυξητική διαδικασία για την άμεση και την έμμεση μέθοδο

Βέβαια, Explicit solver δε σημαίνει απαραίτητα χρήση μόνο σε προβλήματα δυναμικής φύσεως. Αντιθέτως, λόγω της απλούστερης διαδικασίας επίλυσης, ειδικά σε προβλήματα με έντονες μη γραμμικότητες, μπορεί, και συνήθως επιλέγεται, να χρησιμοποιηθεί η ρητή ανάλυση με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτευχθεί οιονοί-στατική διαδικασία φόρτισης. Για να είναι όμως έγκυρη μια τέτοια μορφή ανάλυσης και να συμβαδίζει με την πραγματικότητα, είναι σημαντικό να τονισθούν ορισμένα σημεία:

1. Με τη δυναμική Explicit ανάλυση προσεγγίζεται μια ουσιαστικά στατική φόρτιση. Παρόλα αυτά είναι απαραίτητος ο καθορισμός της μάζας των υλικών μέσω της πυκνότητας για τη διενέργεια της ανάλυσης
2. Καθώς επιδιώκεται να επιτευχθεί (οιονοί) στατική ανάλυση, κατά την διάρκεια της επιβολής των φορτίσεων, η επιβολή αυτή θα πρέπει να γίνει με

τόσο αργή διαδικασία, ώστε να διασφαλιστεί πως η Κινητική ενέργεια που δημιουργείται, δε θα μεταβάλλει την τελική κατάσταση του μοντέλου, επηρεάζοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Προτείνεται [ABAQUS manual] και είναι κοινώς αποδεκτό πως η Κινητική Ενέργεια δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 5% της Εσωτερικής Ενέργειας του προβλήματος.

Αναφέρθηκε ήδη πως η επίλυση της ρητής μεθόδου βασίζεται στο αρκετό μικρό χρονικό βήμα. Το χρονικό βήμα  $\Delta t$ , βασίζεται στην κατάσταση του μοντέλου κατά την έναρξη του βήματος στην χρονική στιγμή  $t$ . Εάν το βήμα αυτό υπερβεί τον μέγιστο συνολικό χρόνο, τότε θεωρείται υπέρβαση του ορίου ευστάθειας, πιθανόν λόγω αριθμητικής αστάθειας. Γενικότερα, ο ορισμός του ορίου ευστάθειας θεωρείται απίθανος, επομένως κατά την ανάλυση, γίνονται συντηρητικές εκτιμήσεις με όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση.

Το όριο ευστάθειας ορίζεται σε αντιστοιχία με την υψηλότερη συχνότητα του συστήματος ( $\omega_{\max}$ ). Η μαθηματική έκφρασή του είναι :

$$\Delta t_{\text{stable}} = 2 / \omega_{\max}$$

Πρακτικά όμως, η μέγιστη συχνότητα του συστήματος δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Επομένως, προσδιορίζεται η συχνότητα ανά στοιχείο και επιλέγεται η υψηλότερη. Σύμφωνα με αυτό, έχει αποδειχθεί πως το όριο ευστάθειας συνδέεται με τα χαρακτηριστικά του κάθε πεπερασμένου στοιχείου ως εξής:

$$\Delta t_{\text{stable}} = L_e / c_d,$$

(όπου  $L_e$  είναι η μικρότερη διάσταση του πεπερασμένου στοιχείου ενώ  $c_d$  είναι η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος συνεχούς μέσου στο υλικό του στοιχείου) καθιστώντας έτσι εφικτό τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής από την οποία θα εξαρτηθεί το συνολικό τελικό υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης. Η ταχύτητα  $c_d$

ορίζεται ως:

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

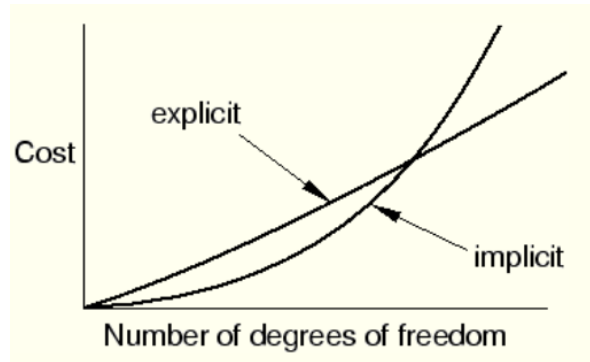
όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $\rho$  η πυκνότητά του. Επομένως, εάν είναι γνωστό το μέγεθος του μικρότερου στοιχείου και η ταχύτητα, μπορεί να εκτιμηθεί το όριο ευστάθειας. Για παράδειγμα, εάν η διάσταση του μικρότερου στοιχείου είναι 5 mm και η ταχύτητα 5000 m/s, το ευσταθές χρονικό βήμα είναι  $1 \cdot 10^{-6}$  s. Είναι κατανοητό, πως το χρονικό όριο ευστάθειας, και επομένως



ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος επίλυσης του προβλήματος μπορεί να εξαρτάται από την συμπεριφορά του υλικού και από το πλέγμα της διακριτοποίησης του φορέα.

- Η γραμμική συμπεριφορά του υλικού συμβάλλει στην σταθερότητα του ορίου ευστάθειας. Η μόνη περίπτωση διαφοροποίησης έγκειται σε αλλαγή της διάστασης του πεπερασμένου στοιχείου. Όμως, σε υλικά όπως το σκυρόδεμα και τον χάλυβα με την ύπαρξη πλαστιμότητας, η ταχύτητα του κύματος μεταβάλλεται.
- Το χρονικό όριο ευστάθειας μεταβάλλεται αναλόγως με την μεταβολή της διάστασης του μικρότερου στοιχείου. Καθώς όμως, πιθανή αρκετά μεγάλη αύξηση μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, προτείνεται η όσο το δυνατόν καλύτερη διατήρηση της ομοιομορφίας της διακριτοποίησης.

Παρότι η σύγκλιση είναι δεδομένη, ο μεγάλος αριθμός των μικρών χρονικών βημάτων οδηγεί σε αρχικά μεγάλο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με τον implicit solver (σχήμα 4.6). Σχεδόν απαραίτητα, για λόγους ελέγχου της υπολογιστικής προσπάθειας, προτείνεται [ABAQUS manual] η χρήση του ορισμού mass scaling factor ώστε να αυξηθεί το κρίσιμο χρονικό βήμα και επομένως να μειωθεί ο συνολικός χρόνος επίλυσης (CPU time). Ουσιαστικά, το ABAQUS πολλαπλασιάζει με έναν ορισμένο από τον χρήστη συντελεστή, την μάζα των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να αυξηθεί η πυκνότητα  $\rho$ . Αυξάνοντας την πυκνότητα, μειώνεται η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων του υλικού με άμεση συνέπεια την αύξηση του κρίσιμου χρονικού βήματος  $\Delta t_{\text{stable}}$  (όριο ευστάθειας). Καθώς όμως το όριο ευστάθειας συμβάλλει σημαντικά στην εξασφάλιση των ακριβών και έγκυρων αποτελεσμάτων, η επιλογή του και άρα η προσπάθεια αύξησής του με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού κόστους, θα πρέπει να γίνεται με συνέπεια. Αύξηση της μάζας σημαίνει και αυξημένη Κινητική ενέργεια των στοιχείων (τονίζεται πάλι πως και σε αυτή την περίπτωση η Κινητική θα πρέπει να περιορίζεται σε ποσοστό έως και 5% της Εσωτερικής ενέργειας). Η αύξηση της πυκνότητας κατά συντελεστή  $f^2$  έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρονικού βήματος κατά συντελεστή  $f$ .



Σχήμα 4.6: Υπολογιστικό κόστος συναρτήσει του αριθμού των βαθμών ελευθερίας

#### 4.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ vs ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Πέραν της επιλογής implicit ή explicit solver, και στις δύο επιλύσεις υπάρχει δυνατότητα να επιλέξουμε σαν βασική μεταβλητή του προβλήματος την επιβολή στους κόμβους είτε μετατοπίσεων είτε φορτίων οπότε αντίστοιχα έχουμε την Μέθοδο των Μετατοπίσεων και την Μέθοδο των Φορτίων. Συνεπώς, υπάρχουν δύο μοντέλα ανάπτυξης της επιλεγμένης μεθόδου επίλυσης, το μοντέλο των μετατοπίσεων ή κινηματικό μοντέλο και το μοντέλο των δυνάμεων ή στατικό μοντέλο, μεταξύ των οποίων προτιμάται το μοντέλο των μετατοπίσεων. Σύμφωνα με το κινηματικό μοντέλο, τίθενται από τον χρήστη μία τελική μετακίνηση – μετακίνηση στόχος – για το προσομοίωμα και η ανάλυση εξελίσσεται έως ότου επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Αντίστοιχα, στο στατικό μοντέλο τίθενται φορτίο στόχος και η ανάλυση σταματάει σε αυτό το σημείο.

Γενικά, η προτίμηση δικαιολογείται από την προγραμματιστική ευκολία που παρέχει η μέθοδος των κομβικών μετατοπίσεων καθώς, σε αντίθεση με τη μέθοδο των δυνάμεων όπου γίνεται χρήση του μητρώου ευκαμψίας, στη μέθοδο των μετατοπίσεων χρησιμοποιείται το μητρώο δυσκαμψίας του φορέα. Η κρίσιμη λοιπόν διαφορά σχετίζεται με το γεγονός ότι το μητρώο ευκαμψίας είναι πλήρες ώστε για την αποθήκευση των δεικτών ευκαμψίας απαιτείται περισσότερη μνήμη σε σχέση με το μητρώο δυσκαμψίας το οποίο έχει αρκετά μηδενικά στοιχεία οπότε για την αποθήκευση των δεικτών δυσκαμψίας απαιτείται πολύ λιγότερη μνήμη. Μάλιστα, λαμβάνοντας υπόψη πως σε προσομοιώματα αληθινών κατασκευών με πολλούς βαθμούς ελευθερίας τα μηδενικά στοιχεία μπορεί να αντιστοιχούν μέχρι και στο 99% του συνολικού αριθμού των δεικτών δυσκαμψίας του μητρώου σίγουρα γίνεται

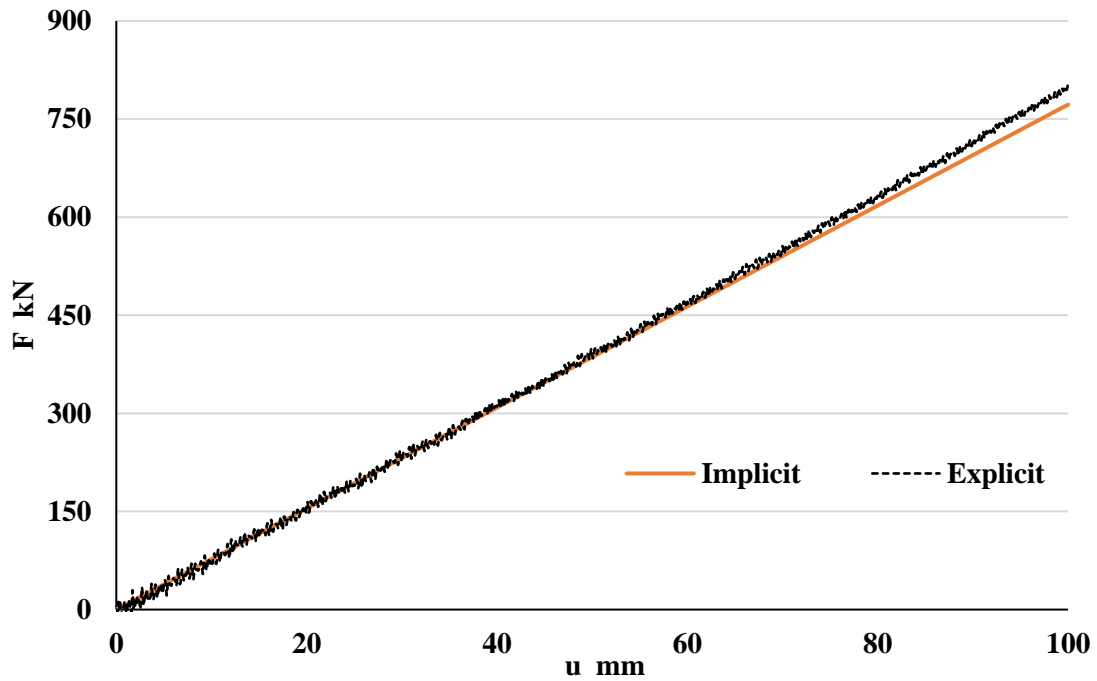
κατανοητό το γιατί προτιμάται η μέθοδος των μετατοπίσεων. Επίσης, η διάρθρωση του μητρώου δυσκαμψίας ευνοεί τον προγραμματισμό της μεθόδου των μετατοπίσεων και την άμεση γενίκευση της σε οποιοδήποτε τύπο φορέα. Αντίθετα, η μέθοδος των δυνάμεων λόγω της πλήρους διάρθρωσης του μητρώου ευκαμψίας απαιτεί προσοχή στη δημιουργία του θεμελιώδους φορέα προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του μοναδιαίου φορτίου.

Πρακτικά βέβαια, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, η συμπεριφορά του προσομοιώματος είναι ίδια σε μία ελαστική ανάλυση. Όμως σε ανάλυση όπου λαμβάνονται υπόψη ρεαλιστικές ιδιότητες υλικών και μη γραμμικότητα, η συμπεριφορά του προσομοιώματος με το κινηματικό μοντέλο φαίνεται πως είναι ομαλότερη και προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική κατάσταση (σχήμα 4.8-σχήμα 4.9)

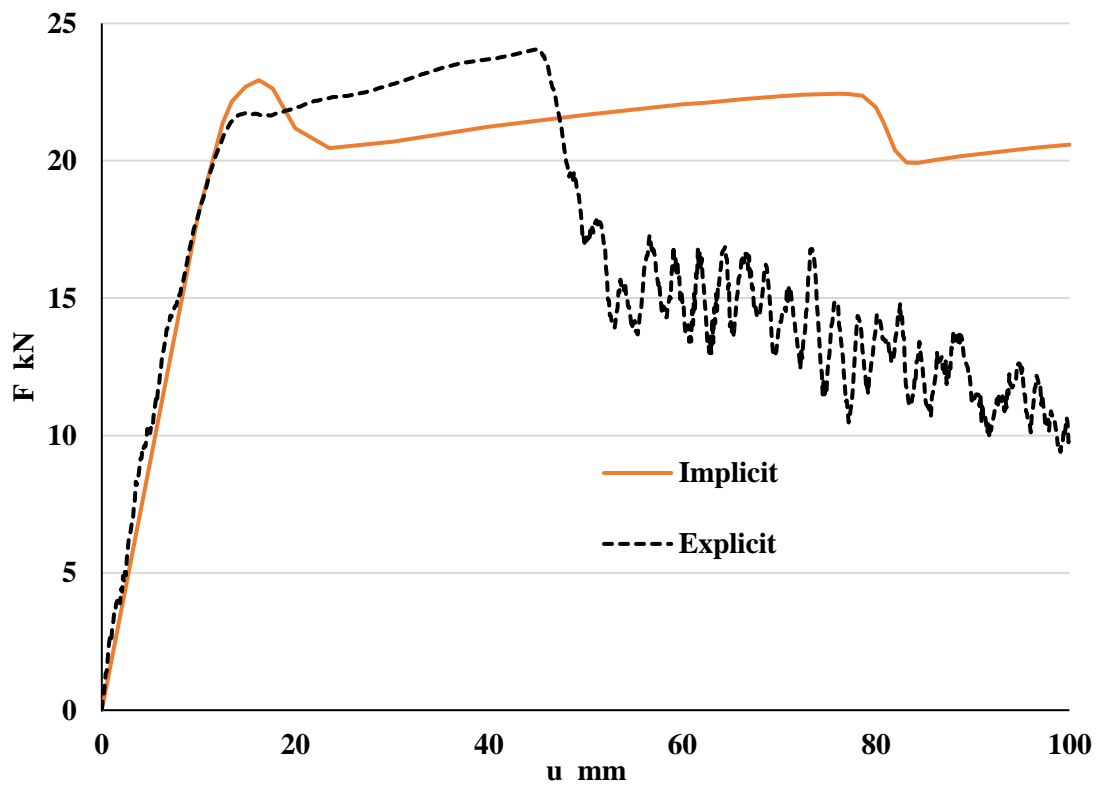
Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκριτικές καμπύλες Φορτίου – Μετατόπισης που έχουν προκύψει με τέτοια σενάρια ώστε να καταστεί αντιληπτή η διαφορά τόσο των δύο διαφορετικών τρόπων επίλυσης του ABAQUS (implicit vs explicit) όσο και των δύο διαφορετικών μεθόδων επιβολής της έντασης (μέθοδος δυνάμεων vs μέθοδος μετατοπίσεων). Για την σύγκριση μεταξύ implicit και explicit χρησιμοποιήθηκαν, κοινώς, η μέθοδος των μετατοπίσεων. Στο 1<sup>ο</sup> διάγραμμα ελήφθησαν υπόψη μόνο οι ελαστικές ιδιότητες-γραμμικότητα υλικών ενώ στο 2<sup>ο</sup> ελήφθησαν υπόψη οι μη γραμμικότητες αναπαριστώντας όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τις ιδιότητες των υλικών. Επίσης, έγινε ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τους implicit και explicit solvers λαμβάνοντας υπόψη τις μη γραμμικότητες των υλικών, προκειμένου να συγκριθούν οι δύο φιλοσοφίες ανάλυσης και σε αντίστοιχο σενάριο φόρτισης (σχήμα 4.9)

Η σύγκριση των μεθόδων των δυνάμεων και των μετατοπίσεων (σχήμα 4.10) έγινε με τον explicit solver ενώ ελήφθησαν υπόψη οι μη γραμμικότητες των υλικών. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η ανάλυση με την μέθοδο των μετατοπίσεων για μέγιστη μετατόπιση  $u = 100\text{mm}$  και ύστερα, θέτοντας ως Δύναμη Στόχο την μέγιστη πλευρική δύναμη που παρατηρήθηκε προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε η μέθοδος των δυνάμεων.

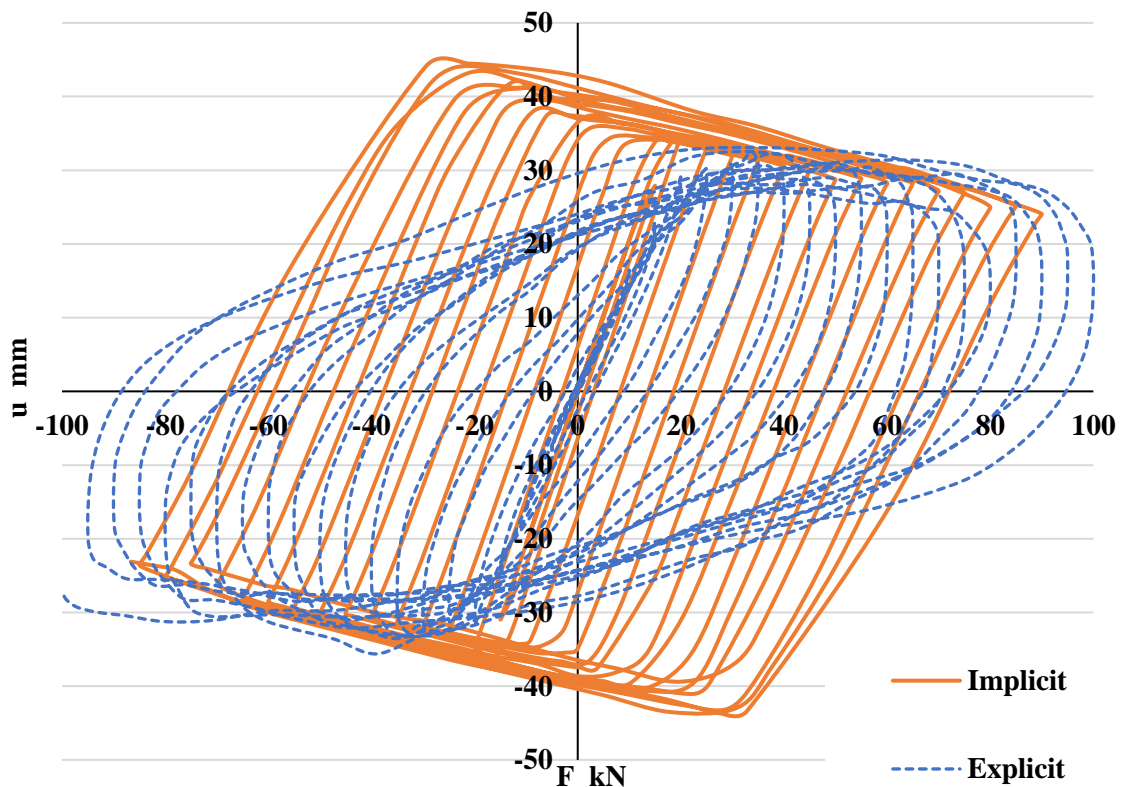
Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές (τύπος και μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων, αντοχές και γεωμετρία των υλικών και των μελών κ.α.) διατηρήθηκαν σταθερές.



Σχήμα 4.7: Implicit vs Explicit για μονοτονική φόρτιση χωρίς μη-γραμμικότητες



Σχήμα 4.8: Implicit vs Explicit για μονοτονική φόρτιση με μη-γραμμικότητες



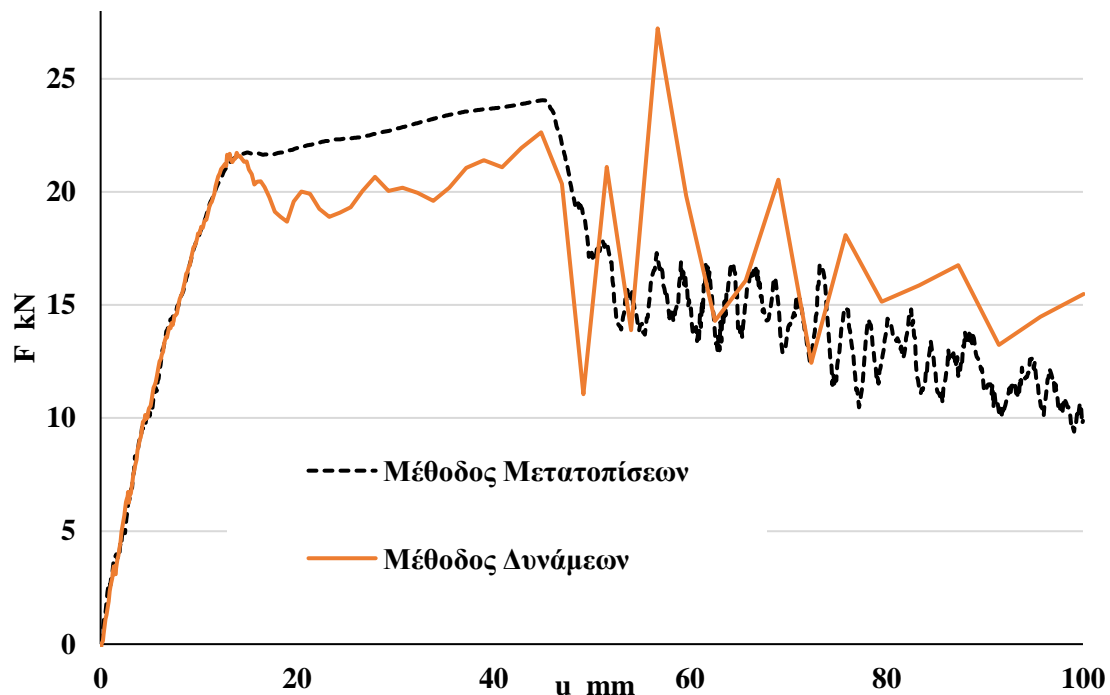
Σχήμα 4.9: Implicit vs Explicit για ανακυκλιζόμενη φόρτιση με μη-γραμμικότητες

Φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9 πως, για ελαστικές αναλύσεις χωρίς μη-γραμμικότητες, οι implicit και explicit αναλύσεις ήταν εξίσου ακριβείς. Μάλιστα, όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.1 παρακάτω, οι αναλύσεις με implicit ολοκληρώθηκαν σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Όμως, όταν ελήφθησαν υπόψη οι μη γραμμικότητες στα υλικά και στο μοντέλο γενικότερα, η explicit ανάλυση, προσομοίωσε καλύτερα την συμπεριφορά του μοντέλου αναδεικνύοντας και την κατάσταση πλήρους αστοχίας.

Όσον αφορά στην κυκλική φόρτιση, με την implicit ανάλυση, δεν επήλθε σύγκλιση και μάλιστα το αποτέλεσμα δεν είναι καθόλου ακριβές σε αντίθεση με την explicit ανάλυση που έφτασε σε σύγκλιση και τα αποτελέσματά της είναι ικανοποιητικά.

Φόρτιση	Solver	Μη Γραμμικότητες	CPU time (s)
Μονοτονική	Implicit	ΌΧΙ	122
Μονοτονική	Explicit	ΌΧΙ	265
Μονοτονική	Implicit	ΝΑΙ	135
Μονοτονική	Explicit	ΝΑΙ	378
Ανακυκλιζόμενη	Implicit	ΝΑΙ	578
Ανακυκλιζόμενη	Explicit	ΝΑΙ	739

Πίνακας 4.1: Στοιχεία συγκριτικών καμπύλων implicit vs explicit



Σχήμα 4.10: Μέθοδος Δυνάμεων vs Μέθοδος Μετατοπίσεων για μονοτονική φόρτιση με μη-γραμμικότητες

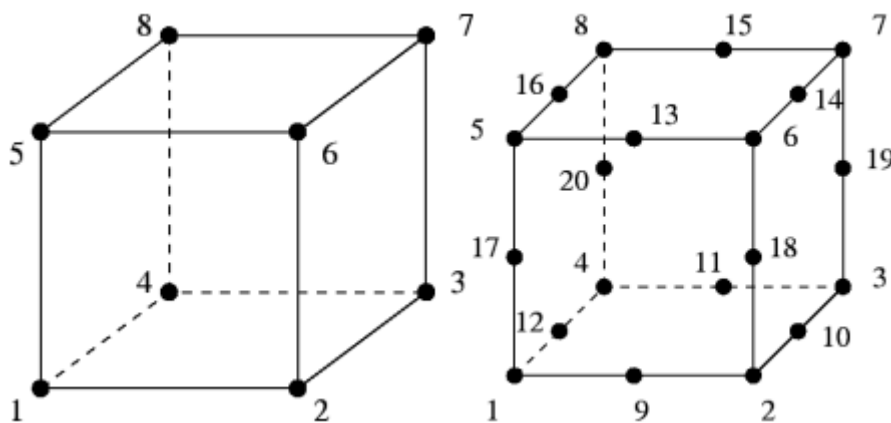
Λαμβάνοντας υπόψη τις έντονες μη γραμμικότητες κυρίως λόγω των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, επιλέχθηκε η ανάλυση με τον Explicit solver με την μέθοδο επιβολής μετατοπίσεων.

### 4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 4.3.1 ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

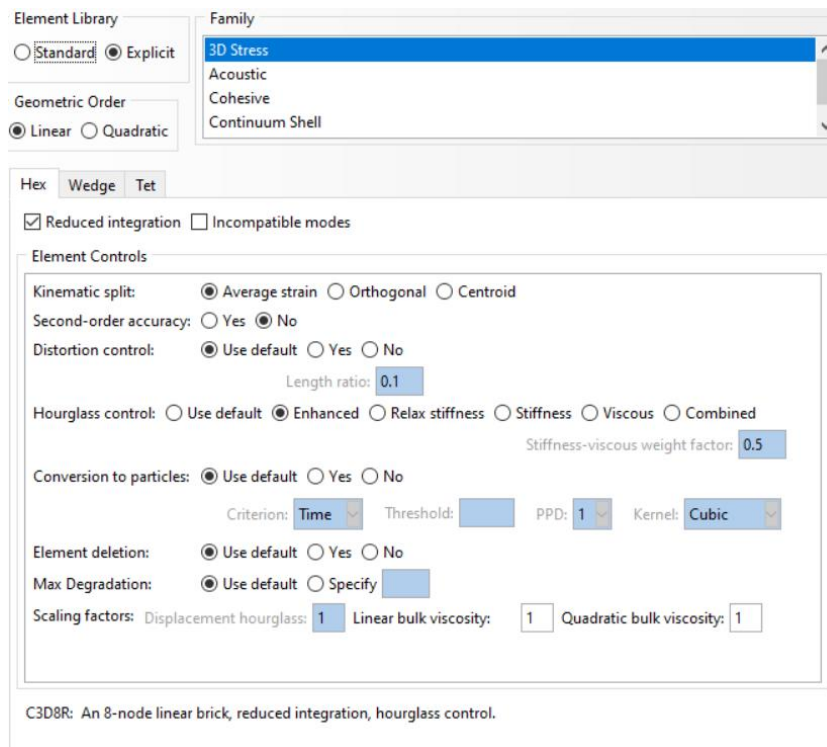
Για την προσομοίωση του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν συμπαγή στοιχεία συνεχούς μέσου στον χώρο (3d continuum solids). Η βιβλιοθήκη του ABAQUS

εμπεριέχει αρκετούς τύπους στοιχείων διακρίνοντάς τα ανάλογα με το σχήμα, τον αριθμό των κόμβων και των βαθμών ελευθερίας όπως και την τάξη ολοκλήρωσης. Όσον αφορά στο σχήμα τους, τα στοιχεία διακρίνονται σε εξαεδρικά (hex), τετραεδρικά (tet) και σφήνες (wedge). Συνηθέστερη είναι η επιλογή των εξαεδρικών στοιχείων ειδικά σε αναλύσεις οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς έντονες γεωμετρικές ασυνέχειες. Σχετικά με την τάξη ολοκλήρωσης, υπάρχουν τα στοιχεία πρώτης τάξης, στα οποία κόμβοι τοποθετούνται μόνο στις γωνίες του στοιχείου και χρησιμοποιείται η γραμμική παρεμβολή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, και δευτέρας τάξης (μόνο για ανάλυση με τον ABAQUS/Standard solver), στα οποία, εκτός των γωνιών, κόμβοι τοποθετούνται και ενδιάμεσα των πλευρών (σχήμα 4.11). Ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου είναι άμεση συνέπεια της τάξης ολοκλήρωσης σε συνδυασμό με το σχήμα άρα τον τύπο του στοιχείου. Για παράδειγμα, ένα εξαεδρικό στοιχείο 1<sup>ης</sup> τάξης αποτελείται από 8 συνολικά κόμβους ενώ αντίστοιχα ένα τετραεδρικό 2<sup>ης</sup> τάξης από 10 κόμβους.



Σχήμα 4.11: Εξαεδρικό στοιχείο 1ης (αριστερά) και 2ης (δεξιά) τάξης

Εκτός από τα παραπάνω, διατίθενται ακόμα κάποιες επιλογές τροποποίησης της συμπεριφοράς του στοιχείου και άρα του συνόλου του μοντέλου οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 4.12, μαζί με όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Δύο σημαντικά σημεία που πρέπει να τονισθούν, αναπτύσσονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 4.12: Επιλογές τροποποίησης των τρισδιάστατων στοιχείων

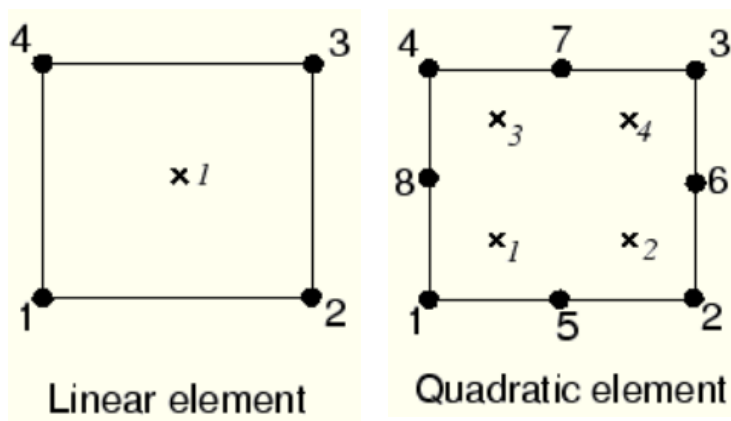
Αρχικά, καθώς η επίλυση ενός προβλήματος πρέπει να συνδυάζει την ακρίβεια αλλά και την αποδοτικότητα σε όρους κόστους χρόνου, διατίθεται η επιλογή χρήσης πλήρους (full) ή μειωμένης (Reduced). Όπως είναι προφανές, η χρήση πλήρους ολοκλήρωσης δίνει κατά βάση ακριβέστερα αποτελέσματα. Όμως, καθώς η χρήση αυτού ειδικά σε πολύπλοκα μοντέλα δυσχεραίνει την διαδικασία της ανάλυσης, συχνά προτείνεται η χρήση μειωμένης ολοκλήρωσης, με την οποία μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων (όχι όμως υπερβολικά σε συνηθισμένες περιπτώσεις) αλλά μειώνεται σημαντικά ο υπολογιστικός φόρτος της ανάλυσης. Η διαφορά αυτή σχετίζεται με τον αριθμό των σημείων που χρησιμοποιούνται στην κατά Gauss ολοκλήρωση της παράστασης  $f$  με σκοπό τον υπολογισμό του μητρώου στιβαρότητας για τα πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι, ένα στοιχείο 1<sup>ης</sup> τάξης και μειωμένης ολοκλήρωσης χρησιμοποιεί μόλις 1 σημείο Gauss ενώ ένα στοιχείο 1<sup>ης</sup> τάξης πλήρους ολοκλήρωσης χρησιμοποιεί  $2*2*2 = 8$  σημεία Gauss. Αντίστοιχα, ένα στοιχείο 2<sup>ης</sup> τάξης και μειωμένης ολοκλήρωσης χρησιμοποιεί 8 σημεία Gauss ενώ ένα στοιχείο 2<sup>ης</sup> τάξης πλήρους ολοκλήρωσης χρησιμοποιεί 27 σημεία Gauss. Στα σχήματα 4.13-4.14 παρατίθενται επίπεδα στοιχεία μειωμένης και πλήρους ολοκλήρωσης. Τελικά, τα



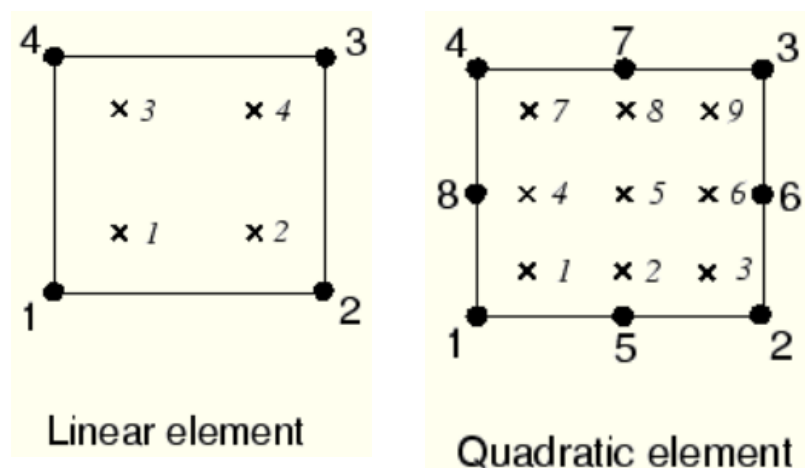
στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς τον αριθμό των σημείων Gauss όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2 .

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	Στοιχείο	Σημεία Gauss
1η	1 <sup>ης</sup> τάξης-μειωμένης ολοκλήρωσης	1
2η	1 <sup>ης</sup> τάξης-πλήρους ολοκλήρωσης , 2ης τάξης-μειωμένης ολοκλήρωσης	8
3η	2ης τάξης-πλήρους ολοκλήρωσης	27

Πίνακας 4.2: Κατηγορίες στοιχείων ως προς τα σημεία ολοκλήρωσης-Gauss



Σχήμα 4.13: Επίπεδα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης)

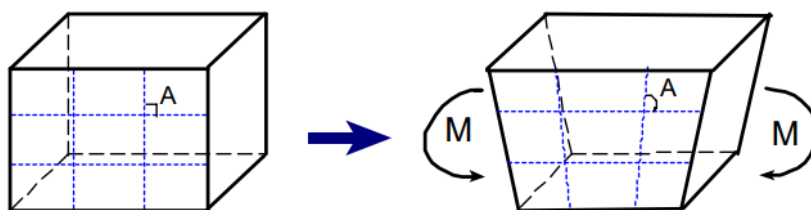


Σχήμα 4.14: Επίπεδα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης (1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης)

Το δεύτερο σημείο που πρέπει να τονισθεί, ουσιαστικά αποτελεί επακόλουθο του πρώτου. Μέσω της χρήσης είτε πλήρους είτε μειωμένης ολοκλήρωσης, έχουν

εισαχθεί ορισμένες έννοιες τεχνητού χαρακτήρα για να είναι δυνατή η επίτευξη του στόχου κάθε επιλογής:

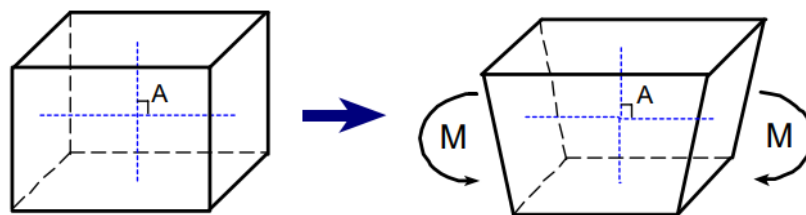
- Η χρήση στοιχείων 1<sup>ης</sup> τάξης πλήρους ολοκλήρωσης σε προβλήματα όπου κυριαρχεί το εντατικό μέγεθος των ροπών κάμψης χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο shear locking. Από το λογισμικό ανάλυσης, δημιουργούνται τεχνητές διατμητικές παραμορφώσεις σε κάθε στοιχείο λόγω της μη ικανοποιητικής δυνατότητας κάμψης των γωνιών (σχήμα 4.15). Αυτό, οδηγεί σε υπερβολική αύξηση της δυσκαμψίας με αποτέλεσμα, κυρίως τα μετακινησιακά μεγέθη να υποεκτιμούνται σημαντικά. Ως άμεση λύση σε αυτό το πρόβλημα, προτείνεται η χρήση στοιχείων 2<sup>ης</sup> τάξης στα οποία λόγω αύξησης των σημείων ολοκλήρωσης δεν παρατηρείται η αδυναμία κάμψης άρα η αυξημένη δυσκαμψία. Όμως, καθώς ήδη με την χρήση πλήρους ολοκλήρωσης, το υπολογιστικό κόστος είναι σημαντικό, η χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης ολοκλήρωσης, δυσχεραίνει την κατάσταση. Επίσης, η χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης, όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν παρέχεται στην βιβλιοθήκη του ABAQUS/Explicit. Μία λύση είναι η χρήση περισσότερων πεπερασμένων στοιχείων (finer mesh). Η χρήση περισσότερων στοιχείων συνεπάγεται την εισαγωγή περισσότερων βαθμών ελευθερίας άρα μείωση της , τεχνητά αυξημένης, δυσκαμψίας. Όμως αυτό θα αυξήσει επίσης το υπολογιστικό κόστος τελικά. Γι' αυτό προτείνεται και υπάρχει η επιλογή της μειωμένης ολοκλήρωσης Gauss (Reduced Integration).



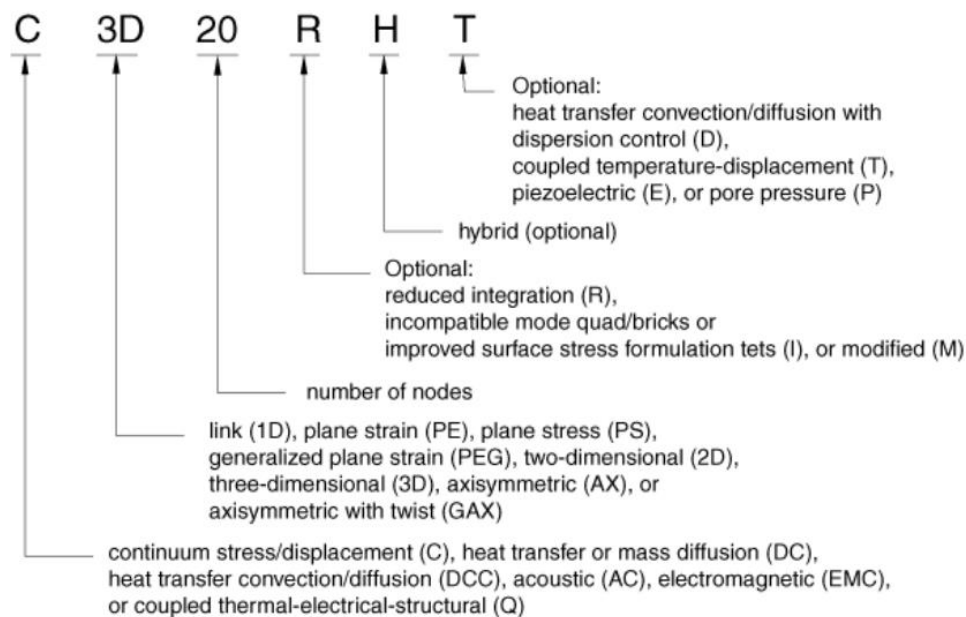
Σχήμα 4.15: Shear locking σε στοιχεία 1ης τάξης πλήρους ολοκλήρωσης

- Η χρήση στοιχείων με μειωμένη ολοκλήρωση, χρησιμοποιείται λόγω της ικανοποιητικής ακρίβειας συνδυασμένη με την ταχύτητα αναλύσεων που προσφέρει, με εφαρμογή σε πληθώρα προβλημάτων. Τα λιγότερα σημεία όμως κατά ολοκλήρωση της συνάρτησης Gauss έχουν ως αποτέλεσμα τα

στοιχεία να παρατηρούνται υπερβολικά εύκαμπτα σε σχέση με την πραγματικότητα. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως hourglassing και είναι στενά συνδεδεμένο με την χρήση μειωμένης ολοκλήρωσης. Κατά την κάμψη των στοιχείων, οι εσωτερικές νοητές γραμμές που διαπερνούν από τα σημεία ολοκλήρωσης παραμένουν απαραμόρφωτες και οι γωνίες τους κάθετες (σχήμα 4.16). Αυτό πρακτικά σημαίνει μηδενικές τάσεις στο σημείο ολοκλήρωσης και άρα μηδενική ενέργεια παραμόρφωσης. Η αναδιαμόρφωση της διακριτοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση του φαινομένου. Εξ αρχής από τα λογισμικά, υπάρχει ένας τρόπος ελέγχου του φαινομένου αυτού, hourglassing control  $\rightarrow$  default. Ουσιαστικά, έτσι εισάγεται τεχνητή δυσκαμψία στα στοιχεία ώστε να ισοσταθμιστεί το φαινόμενο. Προτείνεται η χρήση της βασικής επιλογής όμως σε περιπτώσεις μη επάρκειας, καλά αποτελέσματα παρατηρούνται από την επιλογή hourglassing control  $\rightarrow$  Enhanced.



Σχήμα 4.16: Hourglassing σε στοιχεία 1ης τάξης μειωμένης ολοκλήρωσης

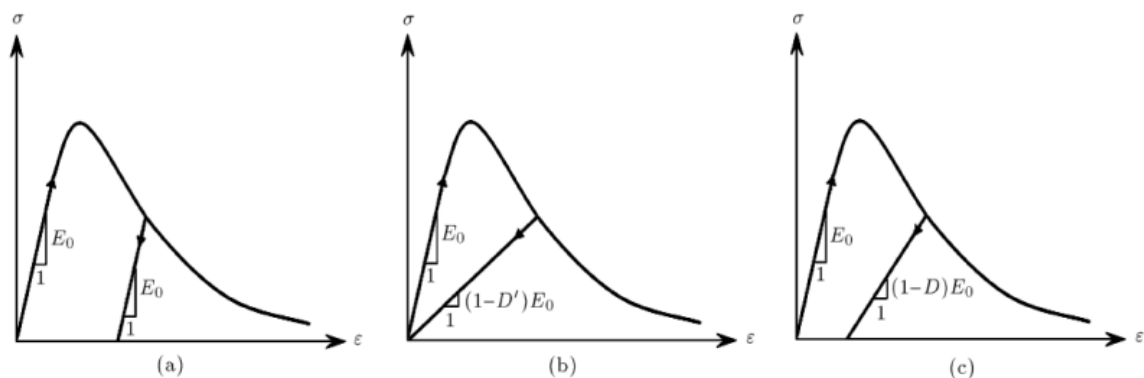


Σχήμα 4.17: Ονοματολογία των τρισδιάστατων συμπαγών στοιχείων

Συγκεντρωτικά, οι διαθέσιμοι τύποι στοιχείων είναι: C3D8, C3D8R, C3D8R-Enhanced, C3D20, C3D20R, C3D6, C3D4, C3D4H των οποίων η λειτουργία θα διερευνηθεί παρακάτω με συγκριτικές αναλύσεις (σχήμα 4.35) στο μοντέλο ώστε να αποφασιστεί η λύση που συμφέρει υπολογιστικά δίνοντας ικανοποιητικά, παράλληλα, αποτελέσματα. Οι επιλογές C3D6, C3D4, C3D4H διαφοροποιούνται ως προς το σχήμα του στοιχείου, ενώ στην C3D4H γίνεται χρήση υβριδικής διάταξης, που παρέχεται στο συγκεκριμένο είδος στοιχείου, για βελτιωμένη σχέση ακρίβειας/κόστους. Η ονοματολογία επεξηγήθηκε στο σχήμα 4.17.

#### 4.3.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Το σκυροδέματος είναι ένα αν-ισότροπο ετερογενές υλικό με μη γραμμικότητες όμως προσεγγιστικά στο μακρο-επίπεδο, θεωρείται ως ομογενές. Τα μοντέλα που κατά καιρούς δημιουργήθηκαν για την προσέγγισή του, είναι κυρίως με βάση είτε την θεωρία της πλαστιμότητας είτε την θεωρία των βλαβών (σχήμα 4.18). Το 1989 οι Lubliner et al πρότειναν ένα μοντέλο που βασίστηκε και στις δύο θεωρίες ενώ οι Lee&Fenves το 1998 το ανέπτυξαν περισσότερο. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει την σύνθλιψη και την ρηγμάτωσή του σκυροδέματος ως τις δύο μορφές αστοχίας του υπό θλιπτικό και εφελκυστικό φορτίο αντίστοιχα. Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε Concrete Damage Plasticity (CDP) και είναι διαθέσιμο στο λογισμικό του ABAQUS, οπότε σύμφωνα με αυτό θα προσομοιωθεί το υλικό του σκυροδέματος.



Σχήμα 4.18: Μοντέλο με βάση (a)την πλαστιμότητα (b)την βλάβη (c) την πλαστιμότητα και την βλάβη

Το CDP δύναται να προσομοιώσει τόσο το οπλισμένο ή μη σκυρόδεμα όσο και άλλα οιοнови ψαθυρά υλικά σε οποιαδήποτε μορφή μέλους. Σε σχέση με άλλα μοντέλα (Smearred Cracking, Drucker-Prager) μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για μονοτονική

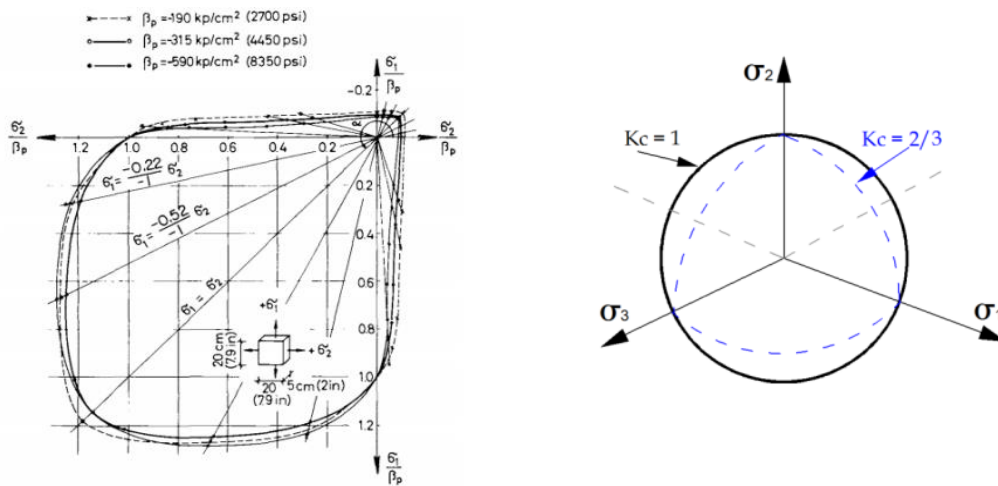
φόρτιση είτε για ανακυκλιζόμενη, παρέχοντας την δυνατότητα στον χρήστη ελέγχου του ποσοστού ανάκαμψης της δυσκαμψίας κατά την αλλαγή διεύθυνσης σε έναν κύκλο φόρτισης. Χρησιμοποιεί κρατυνόμενη πλαστιμότητα και σταδιακή ιστροπική ελαστικότητα με βλάβη προσομοιάζοντας με αυτό τον τρόπο την μη αντιστρεψιμότητα όταν το σκυρόδεμα αστοχεί.

Ως προς την πλαστιμότητα (σχήμα 4.19-4.20), για το μοντέλο ορίζονται:

1) Η συνάρτηση διαρροής,  $F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl})\langle\bar{\sigma}^{-max}\rangle - \gamma\langle-\bar{\sigma}^{-max}\rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$

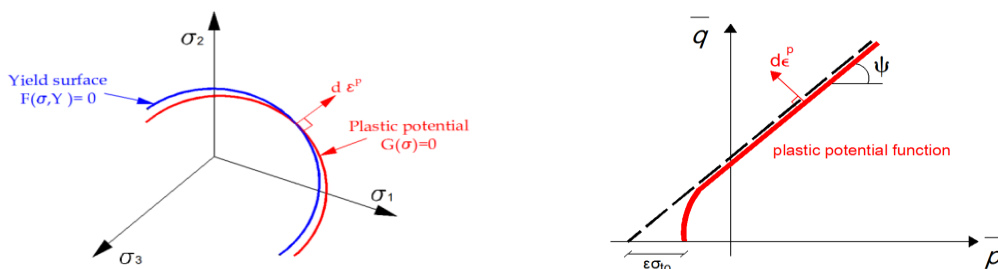
όπου  $\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1}$   $0 \leq \alpha \leq 0.5$ ,  $\beta(\tilde{\epsilon}^{pl}) = [\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})/\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})] * [(1 - \alpha) - (1 + \alpha)]$ ,

$\gamma = \frac{3(1-Kc)}{2Kc - 1}$  ,  $0.5 < Kc \leq 1$



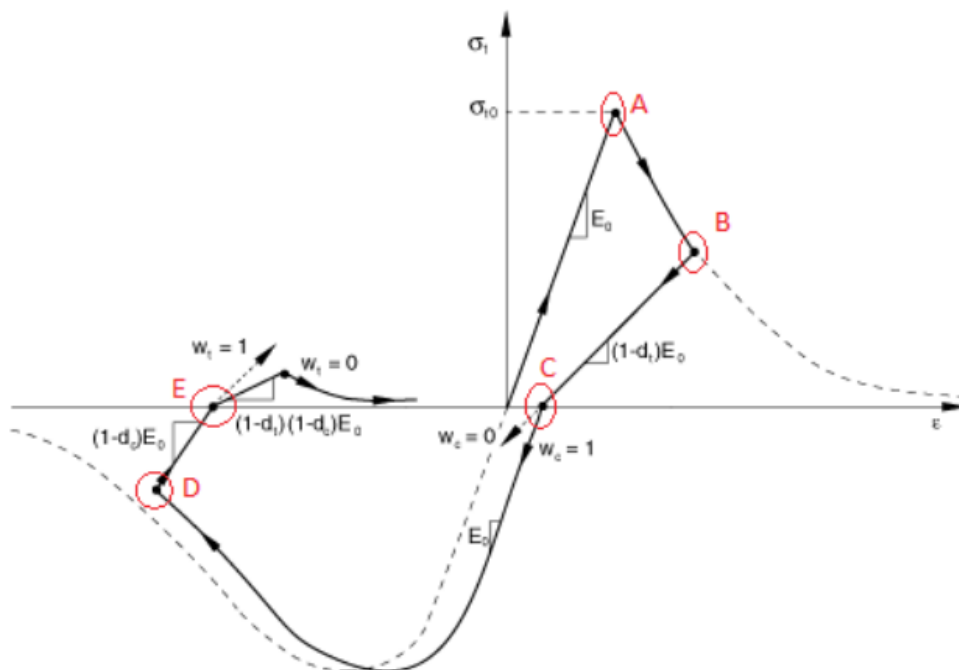
Σχήμα 4.19: Αντοχή σε διαξονική θλίψη και επιφάνεια διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο (deviatoric plane)

2) Η συνάρτηση δυναμικού ροής  $G(\sigma) = \sqrt{(\epsilon\sigma_0 \tan\psi)^2 + q^2} - \bar{p} \tan \psi$



Σχήμα 4.20: Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού στο αποκλίνον επίπεδο, γωνία διάδοσης ψ και εκκεντρότητα ε

Όσον αφορά στη μεταβλητή της βλάβης, αυτή λαμβάνεται υπόψη σύμφωνα με τον τύπο  $\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} = (1 - d)E_0 : (\epsilon - \epsilon^p)$  όπου  $d$  συμβολίζει την μεταβλητή της βλάβης και ορίζεται ξεχωριστά στην θλίψη και στον εφελκυσμό,  $d_c$  και  $d_t$  αντίστοιχα, έτσι ώστε:  $(1 - d) = (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t)$  όπου  $s_t$  και  $s_c$  περιγράφουν την ανάκαμψη της δυσκαμψίας στον εφελκυσμό και στην θλίψη αντίστοιχα ενώ ορίζονται ως:  $s_t = 1 - w_t r(\sigma)$  και  $s_c = 1 - w_c(1 - r(\sigma))$  όπου  $w_t$  και  $w_c$  είναι συντελεστές για την βλάβη παίρνοντας τιμές από 0 (πλήρης βλάβη υλικού) έως και 1 (υλικό χωρίς βλάβη) ενώ  $r(\sigma)$  είναι ένας συντελεστής κατεύθυνσης (σχήμα 4.21). Επιλέχθηκαν  $w_t=0$  και  $w_c=0.90$ . Η επιλογή των ιδιοτήτων βλάβης είναι σημαντική δεδομένου ότι, γενικά, η υπερβολική τιμή στην μεταβλητή βλάβης (damage variable) μπορεί να έχει μία κρίσιμη επίδραση στο ρυθμό της σύγκλισης. Συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση τιμών μεγαλύτερων του 0.99 για τις μεταβλητές βλάβης. (Η παραπάνω τιμή αντιστοιχεί σε μείωση της δυσκαμψίας κατά 99%). Επίσης έχει παρατηρηθεί πως η χρήση τιμών μεγαλύτερων του 0.94 συμβάλλει σε αμεσότερη σύγκλιση και καλύτερη αποτύπωση κυρίως αστοχιών ρηγμάτωσης.



Σχήμα 4.21: Συμπεριφορά του μοντέλου CDP υπό κυκλική φόρτιση

A. Οριακή τάση  $\rightarrow$  ξεκινάει η πλαστικότητα B. Αλλαγή φόρτισης (από εφελκυσμό σε θλίψη)  $\rightarrow E_t = E_0 * (1 - d_t)$  C. Μηδενισμός τάσης, πλαστικές παραμορφώσεις, η δυσκαμψία σε θλίψη εξαρτάται από τον συντελεστή  $w_c$  D. Αλλαγή φόρτισης (από

θλίψη σε εφελκυσμό)  $\rightarrow E_c = E_0 * (1-d_c)$  τέθηκε  $w_c=1$  E. Μηδενισμός τάσης, πλαστικές παραμορφώσεις, η απομένουσα δυσκαμψία είναι  $E' = E_0 * (1-d_c) * (1-d_t)$

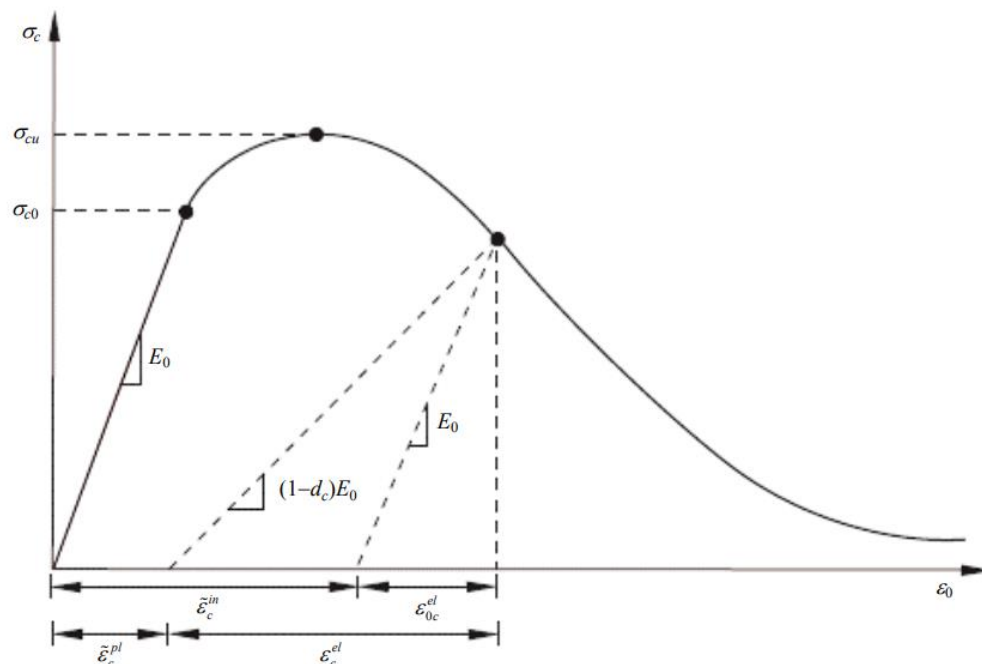
Για την διαξονική αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη  $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$  προτείνεται η τιμή 1.16, για την εκκεντρότητα  $e$  η τιμή 0.1, το ιξώδες  $\mu$  λαμβάνεται ίσο με 0 καθώς λόγω χρήσης του explicit solver δεν επηρεάζει την ανάλυση και η τιμή του  $K_c$  είναι συνήθως 0.667. Για την γωνία διάδοσης όμως, αν και αναφέρεται ως μία καλή προσεγγιστική τιμή  $\psi=35^\circ$ , από ερευνητές έχουν χρησιμοποιηθεί τιμές  $10^\circ$  έως και  $55^\circ$ , για αυτό έγιναν παραμετρικές αναλύσεις για τιμές της γωνίας  $\psi$  στο διάστημα αυτό ώστε να ευρεθεί η τιμή εκείνη. Όσον αφορά στο μέρος όπου η συμπεριφορά είναι ελαστική, αυτή περιγράφεται απόλυτα από τις μεταβλητές του μέτρου ελαστικότητας  $E$ , που υπολογίζεται από το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο μοντέλο καταστατικού νόμου του σκυροδέματος (δίνονται παρακάτω παραδείγματα), και του  $\nu$  Poisson που λαμβάνεται ως 0.20. Εδώ πρέπει να τονισθεί πως, ανεξάρτητα από το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την συμπεριφορά του σκυροδέματος, η τιμή για το μέτρο ελαστικότητας που θα εισαχθεί στο ABAQUS θα πρέπει να διερευνηθεί καθώς το πρόγραμμα δεν λαμβάνει υπόψη το μέτρο της ρηγματωμένης διατομής με αποτέλεσμα, για μεγάλο μέρος της ανάλυσης, αυτή να γίνεται με αυξημένη σε σχέση με την πραγματικότητα δυσκαμψία (δηλαδή περίπου με  $E=E_0$ , όπου  $E_0$  το αρχικό μέτρο αρηγμάτωτης διατομής) υποεκτιμώντας έτσι τα μετακινησιακά μεγέθη. Ο EK8 προτείνει την απομείωση κατά 80% της δυσκαμψίας (άρα ουσιαστικά του  $E$ ) για μία ρηγματωμένη διατομή επομένως, κρίνεται απαραίτητο να γίνουν παραμετρικές αναλύσεις και για το μέτρο ελαστικότητας με  $E = \alpha * E_0$  όπου  $\alpha=0.2$  έως 1.

Για τις δύο βασικές μορφές αστοχίας του σκυροδέματος, θλίψη και εφελκυσμός, πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο τουλάχιστον οι καμπύλες που περιγράφουν την σχέση τάσης  $\sigma$  ( $\sigma_c$  ή  $\sigma_t$ ) – παραμόρφωσης  $\epsilon$  ( $\epsilon_c$  ή  $\epsilon_t$ ). Αυτό μπορεί να γίνει είτε με δεδομένα από πειραματικές αναλύσεις είτε από κάποιο θεωρητικό μοντέλο για την θλίψη και τον εφελκυσμό ξεχωριστά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη επιλογή, και συγκρίθηκαν ορισμένα μοντέλα της επιστημονικής βιβλιογραφίας που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Αναλυτικότερα, θέτοντας τιμές για την ολική παραμόρφωση σε θλίψη και εφελκυσμό  $\epsilon_c$  και  $\epsilon_t$  αντίστοιχα, από το επιλεγθέν μοντέλο υπολογίστηκε η τάση  $\sigma_c$  και  $\sigma_t$ .

Έπειτα, υπολογίστηκαν οι ανελαστικές παραμορφώσεις (μέσω του νόμου Hooke για την ελαστική παραμόρφωση  $\varepsilon^{el} = \sigma / E$ )  $\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \sigma_c * E_0$  (crushing strain) και  $\tilde{\varepsilon}_c^{ck} = \varepsilon_c - \sigma_c * E_0$  (cracking strain) και οι πλαστικές παραμορφώσεις  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - d_c * \sigma_c / (1-d_c) / E_0$  και  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{ck} - d_t * \sigma_c / (1-d_t) / E_0$ . Τέλος, οι μεταβλητές της βλάβης προέκυψαν από τις εξισώσεις  $d_c = 1 - \sigma_c * \tilde{\varepsilon}_c^{el} / E_0$  και  $d_t = 1 - \sigma_c * \tilde{\varepsilon}_c^{el} / E_0$ . Είναι σημαντικό να διασφαλίζεται από τον χρήστη πως οι τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων είναι θετικές και αυξανόμενες, καθώς σε διαφορετική περίπτωση παρουσιάζεται σφάλμα από το λογισμικό.

#### 4.3.2.1 ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ



Σχήμα 4.22: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σε θλίψη (ABAQUS manual)

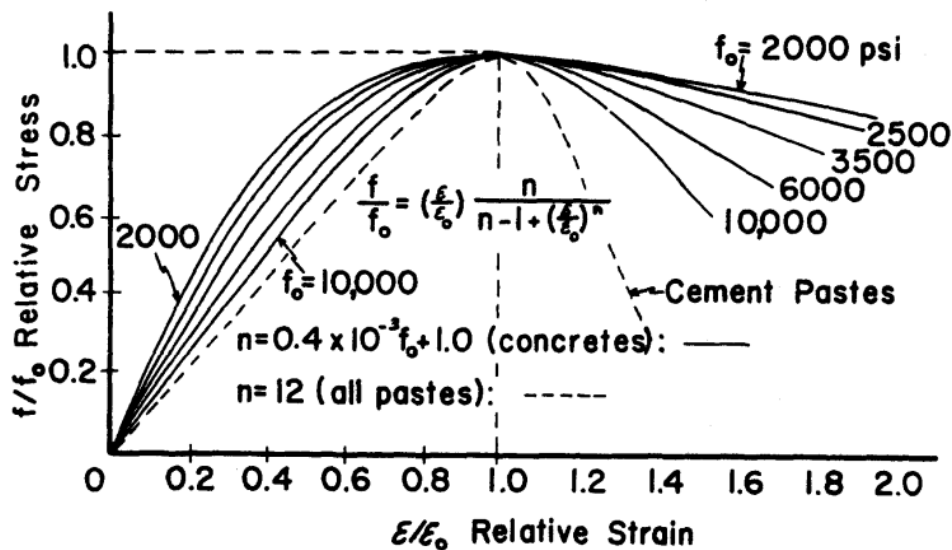
Ο Popovics S.(1973), μετά από πειραματικές δοκιμασίες, θεώρησε πως η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη μπορεί να οριστεί μέσω της εξίσωσης (σχήμα 4.23):

$$f = f_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{n}{n-1+(\varepsilon/\varepsilon_0)^n} ,$$

όπου  $f_0$  είναι η μέγιστη αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη,  $n$  είναι εμπειρικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες του υλικού  $\rightarrow$  για σκυρόδεμα  $n = (4 \cdot 10^{-4} * f_0) + 1$  ενώ μπορεί επίσης να οριστεί και για άλλα ψαθυρά υλικά και η



παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης τάσης  $\epsilon_o = 2.7 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{f_o}$ . Να σημειωθεί επίσης πως όλα τα παραπάνω είναι ορισμένα σε μονάδες psi (1 psi  $\rightarrow$  0.00689 N/mm<sup>2</sup>).



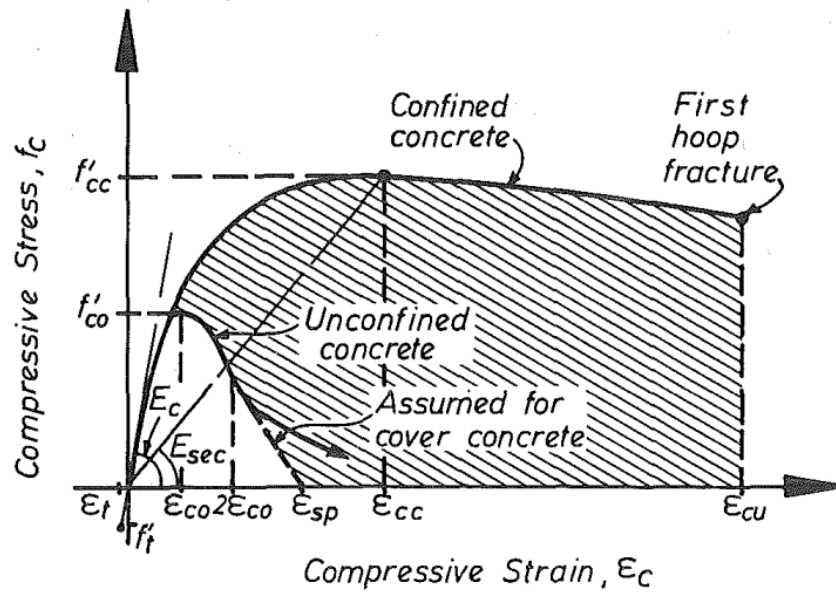
Σχήμα 4.23: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη (Popovics, 1973)

Οι Mander et al (1988), βασίστηκαν στις θεωρίες του Popovics και τις εξέλιξαν, προτείνοντας ένα αντίστοιχο μοντέλο για την συμπεριφορά σε θλίψη, λαμβάνοντας όμως πλέον υπόψη και την περίπτωση του περισφιγμένου σκυροδέματος (σχήμα 4.24):

$$f_c = f_{cc}' * x * r / (r - 1 + x^r),$$

όπου  $f_{co}'$  η μέγιστη αντοχή σε θλίψη του απερίσφικτου σκυροδέματος,  $f_{cc}' = f_{co}' + k_1 * f_1$  είναι η μέγιστη αντοχή σε θλίψη του περισφιγμένου πλέον σκυροδέματος, ( $k_1$  και  $f_1$  σχετίζονται με την παράπλευρη τάση  $p$  που ασκούν οι συνδετήρες στο σκυρόδεμα),  $\epsilon_{co}$  προτείνεται ως 0.002 και είναι η παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης θλιπτικής τάσης του απερίσφικτου σκυροδέματος,  $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + 5(\frac{f_{cc}'}{f_{co}'} + 1)]$  είναι η παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης θλιπτικής τάσης του περισφιγμένου σκυροδέματος, ενώ  $r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$  με  $E_c = 5000 * \sqrt{f_{co}'}$  και  $E_{sec} = f_{cc}' / \epsilon_{cc}$ .

Όλα τα παραπάνω είναι στο σύστημα SI (mm) ενώ για την περίπτωση απερίσφικτου σκυροδέματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια εξίσωση θέτοντας  $f_{cc}' = f_{co}$  και  $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}$ .

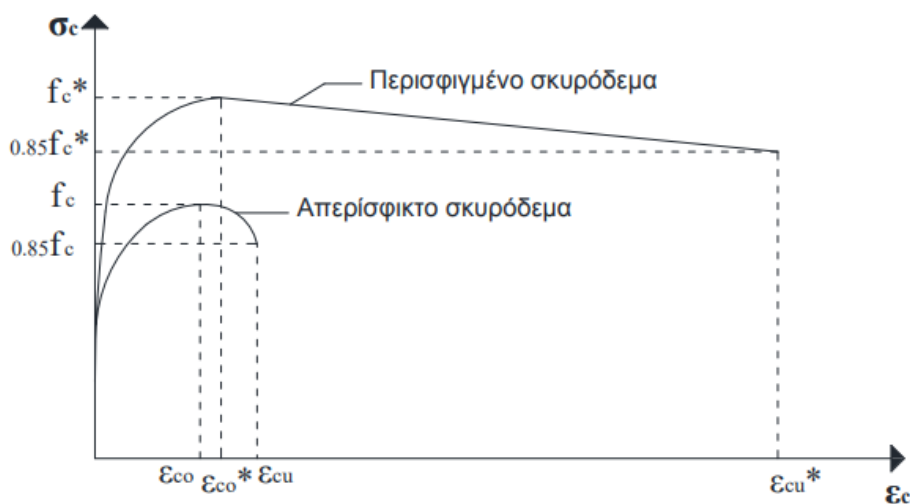


Σχήμα 4.24: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων (με και χωρίς περίσφιγξη) υπό θλίψη (Mander et al, 1988)

Στις κανονιστικές διατάξεις των ΕΚ8 και Model Code 2010 (κοινές παραδοχές) γίνεται μία απλούστερη προσέγγιση (σχήμα 4.25). Το απερίσφικτο σκυρόδεμα θεωρείται ότι αστοχεί σε παραμόρφωση  $\epsilon_{cu} = 0.0035$  (δυσμενές):

$$\sigma_c = f_{cm} * \frac{(k*\eta-\eta^2)}{1+(k-2)*\eta} \quad \text{για } \epsilon_c < 0.0035, \quad \text{όπου } \eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad \text{και } k = \frac{E_{c1}}{E_{c1}} \quad \epsilon_{c1}$$

παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης θλιπτικής αντοχής και  $E_{c1}$ ,  $E_{c1}$  τα μέτρα ελαστικότητας (αρχικό και τέμνον αντίστοιχα) και οι τιμές τους παρέχονται στον πίνακα 5.1.8 του Model Code 2010.



Σχήμα 4.25: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη (ΕΚ8/MC2010)

Όλα τα παραπάνω μπορούν να προσεγγίσουν αρκετά καλά την συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη όπως έχει διαπιστωθεί σε πειραματικά αποτελέσματα. Όμως, όσον αφορά στην ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, επειδή αυτή η συμπεριφορά αναφέρεται σε κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ακόμα ένας παράγοντας. Καθώς αναζητείται η βέλτιστη λύση που να προσεγγίζει σωστά και αποδοτικά την πραγματικότητα, μειώνεται το μέγεθος του στοιχείου της διακριτοποίησης. Αυτό αυξάνει τους βαθμούς ελευθερίας και άρα μειώνει την δυσκαμψία συνολικά του μοντέλου. Εξαιτίας αυτού, τα αποτελέσματα μεταβάλλονται σημαντικά καθώς η ικανότητα του μικρότερου ως προς την διάσταση στοιχείου παραμένει ίδια με αυτή του αμέσως μεγαλύτερου. Έτσι παρατηρείται πιο αργή η διαδικασία της σύγκλισης ενώ τα αποτελέσματα συχνά υποεκτιμώνται.

Για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό, οι Alfarah et al (2017) πρότειναν έναν μοντέλο σύμφωνα με το οποίο ίσχυε ότι η μείωση της διάστασης του στοιχείου οδηγεί σε ορισμένη αύξηση της ικανότητας του στοιχείου σε θλίψη (και εφελκυσμό όπως θα αναδειχθεί παρακάτω) έτσι ώστε να ισοσταθμίζεται η αύξηση των βαθμών ελευθερίας κατά την αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μοντέλο και άρα η σύγκλιση να επέρχεται νωρίτερα (σχήμα 4.27). Επίσης, στην εξίσωση που προτείνουν, λαμβάνουν υπόψη μέσω συντελεστών, την ενέργεια σύνθλιψης του σκυροδέματος  $G_{ch}$  (N/mm)(σχήμα 4.26). Για τις τιμές της ενέργειας αυτής αν και υπάρχουν τύποι στην βιβλιογραφία (Model Code 2010), αυτοί δεν είναι πλήρως αποδεδειγμένοι από πειραματικά αποτελέσματα, επομένως συχνά γίνεται παραμετρική διερεύνηση για την σωστότερη τιμή της, με συγκριτικές αναλύσεις για τιμές κοντά βέβαια στις προτεινόμενες, έτσι ώστε να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα το εκάστοτε πείραμα. Επίσης, σχετικά με την ενέργεια θραύσης στον εφελκυσμό (άρα και την ενέργεια στην θλίψη λόγω αλληλεξάρτησης) συχνά γίνεται αύξηση λόγω του φαινομένου του tension stiffening με το οποίο επιχειρείται η καλύτερη απόδοση της σχέσης συνεργασίας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Αυτή η μεθοδολογία υιοθετήθηκε και στην συγκεκριμένα εργασία. Άρα, καθίσταται σημαντικό, η επιρροή της ενέργεια αυτής να λαμβάνεται υπόψη στην καμπύλη συμπεριφοράς προκειμένου να υιοθετούνται πάντα τιμές που συμβαδίζουν με την πραγματικότητα. Αυτό, καθώς δε συμβαίνει στα προηγούμενα μοντέλα, λήφθηκε υπόψη από τους Alfarah et al και η σύγκριση τους φαίνεται στο σχήμα 4.28.

Η καμπύλη χωρίζεται σε τρία διαφορετικά τμήματα: (1) Ελαστική συμπεριφορά:  $\sigma_{c(1)}$

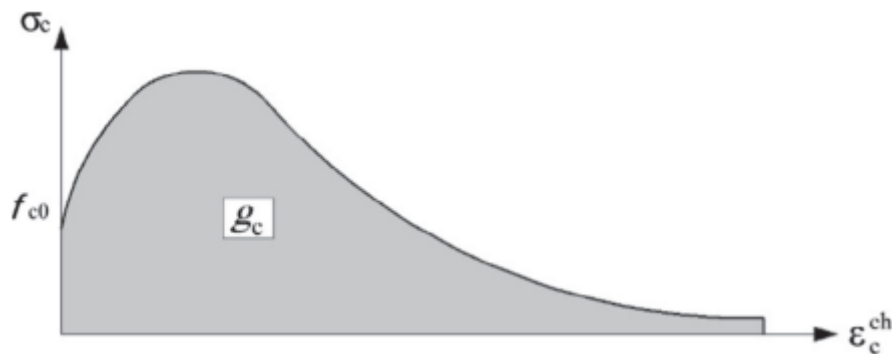
$$= E_0 * \varepsilon_c \quad \text{μέχρι τάση } \sigma_c = 0.4 * f_{cm}, \quad (2) \quad \sigma_{c(2)} = \frac{(E_{ci} * \varepsilon_c / f_{cm}) - (\varepsilon_c / \varepsilon_{cm})^2}{1 + [(E_{ci} * \varepsilon_{cm} / f_{cm}) - 2] \varepsilon_c / \varepsilon_{cm}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{c(3)} = \left[ \frac{2 + \gamma_c * f_{cm} * \varepsilon_{cm}}{2 * f_{cm}} - \gamma_c * \varepsilon_c + \frac{\varepsilon_c^2 * \gamma_c}{2 * \varepsilon_{cm}} \right]^{-1}, \quad \text{όπου } \varepsilon_{cm} = 0.0022,$$

$$f_{cm} = 8 + f_{ck} \text{ (MPa)}, \quad E_{ci} = 10000 * f_{cm}^{1/3}, \quad E_0 = E_{ci} (0.8 + 0.2 \frac{f_{cm}}{88}),$$

$$\gamma_c = \frac{\pi^2 * f_{cm} * \varepsilon_{cm}}{2 [(G_{ch} / l_{eq}) - 0.5 * f_{cm} (\varepsilon_{cm} (1 - b) + b * f_{cm} / E_0)]^2},$$

$b = \varepsilon_c^{pl} / \varepsilon_c^{ch}$  (λαμβάνεται αρχικά  $b=0.9$  και στη συνέχεια επαληθεύεται ή τροποποιείται από τον μέσο όρο των τιμών  $\rightarrow$  επαναληπτική διαδικασία με σύντομη σύγκλιση),  $G_{ch} = G_F * \left( \frac{f_{cm}}{f_{tm}} \right)^2$  (Model Code 2010),  $G_f$  ενέργεια θραύσης (δίνεται παρακάτω) και  $l_{eq}$  είναι το ισοδύναμο μήκος του στοιχείου και λαμβάνεται ως η μικρότερη διάσταση μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται.

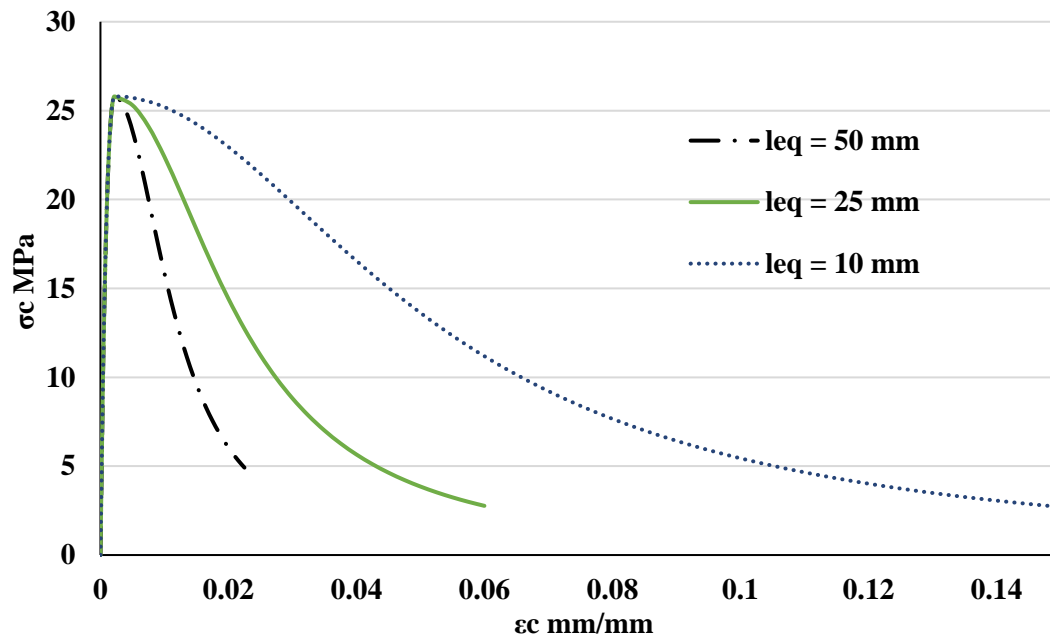


Σχήμα 4.26: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη (Alfarah et al, 2017)

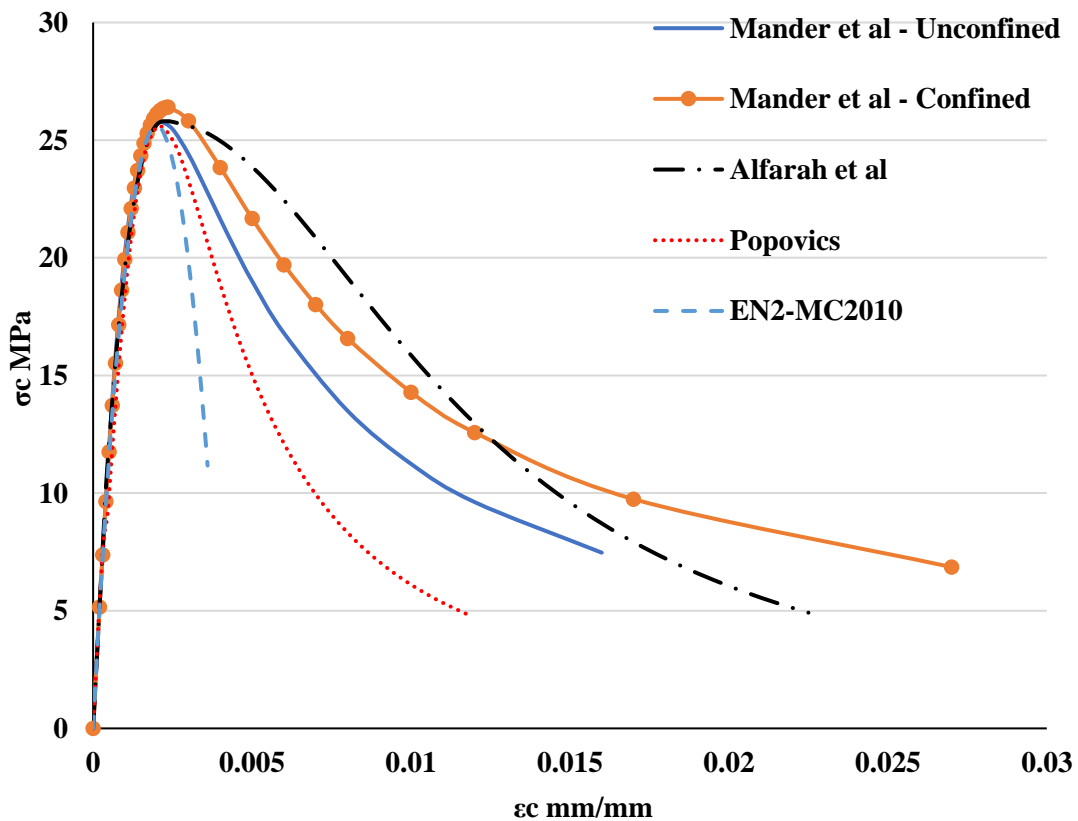
Για τον υπολογισμό της βλάβης (σχήμα 4.29), μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τύποι του ABAQUS manual όμως οι Alfarah et al προτείνουν τροποποιημένες εξισώσεις που λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια  $G_{ch}$  και το μέγεθος  $l_{eq}$ . Οι βλάβες σε θλίψη υπολογίζονται ως εξής:

$$dc = 1 - \frac{1}{2 + ac} [2(1 + ac)e^{-bc * \varepsilon_{ch}} - ac * e^{-2bc * \varepsilon_{ch}}]$$

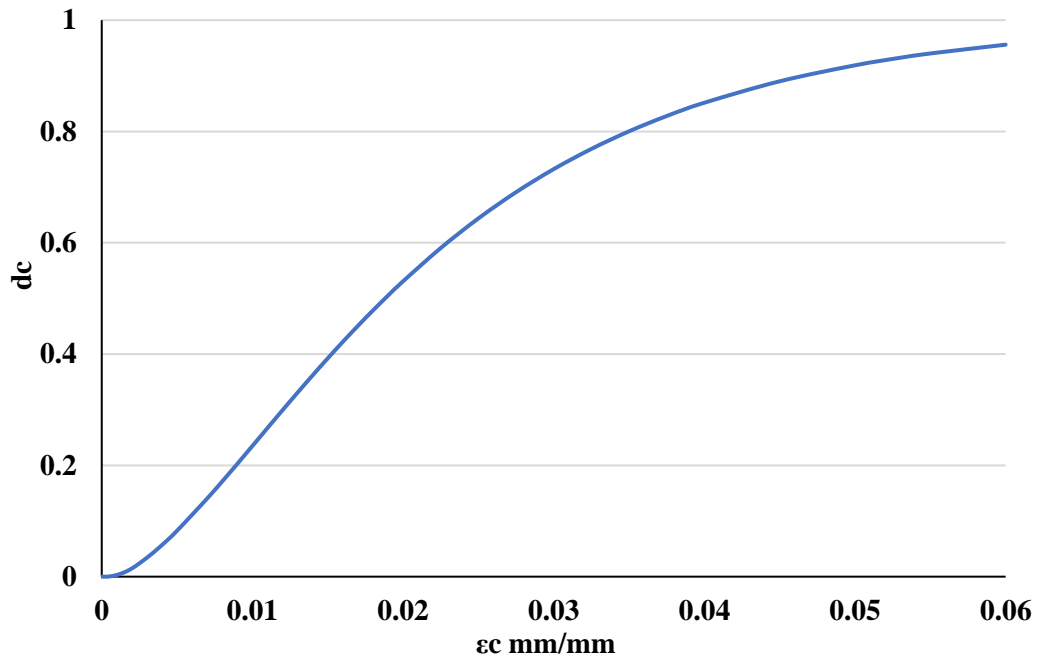
$$\text{όπου } ac = 7.873 \text{ και } bc = \frac{f_{c0} * l_{eq}}{G_{ch}} \left( 1 + \frac{ac}{2} \right)$$



Σχήμα 4.27: Συγκριτικές καμπύλες σύμφωνα με τις προτάσεις των Alfarah et al για την επιρροή του μεγέθους του πεπερασμένου στοιχείου

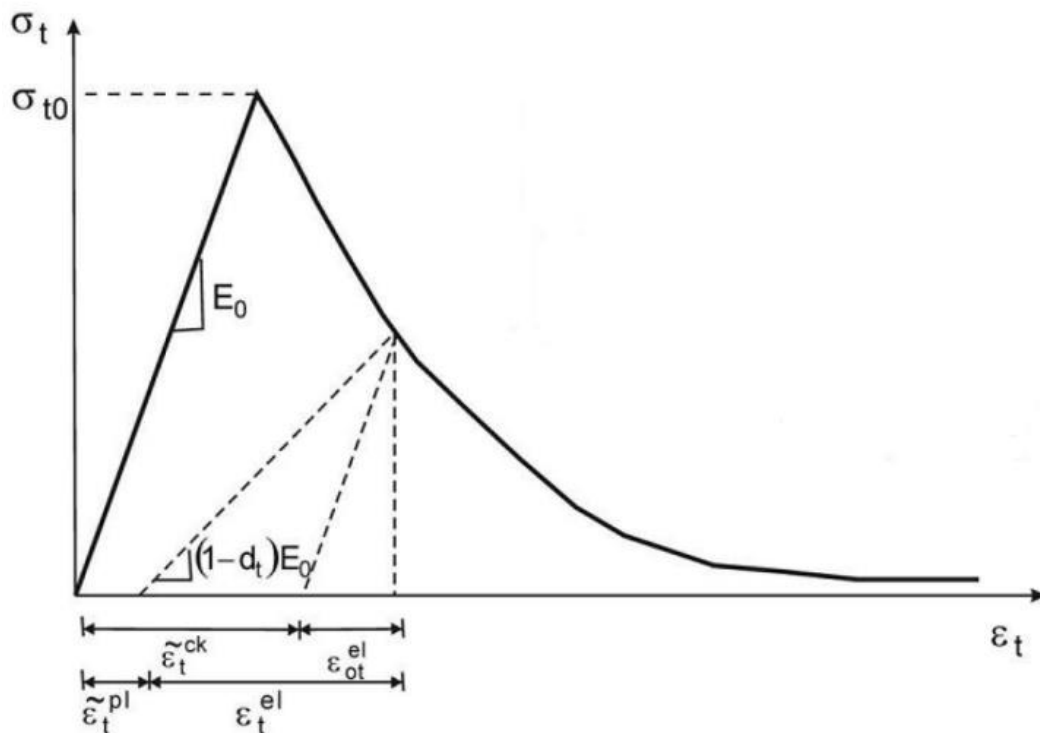


Σχήμα 4.28: Συγκριτικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των προτεινόμενων μοντέλων για  $f_{cm}=25.8$  MPa



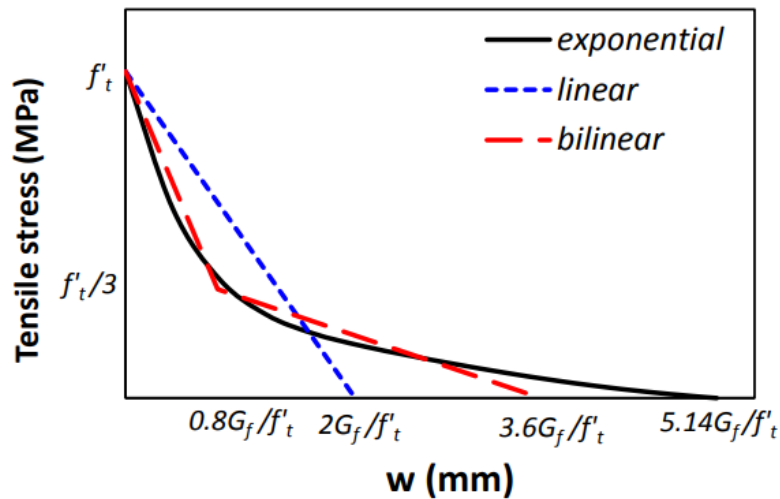
Σχήμα 4.29: Καμπύλη παραμόρφωσης – βλάβης

#### 4.3.2.2 ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ



Σχήμα 4.30: Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σε εφελκυσμό (ABAQUS manual)

Για την συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό μονοαξονικό εφελκυσμό (σχήμα 4.30), στον πρώτο κλάδο λαμβάνεται ελαστική συμπεριφορά έως την μέγιστη τάση  $f_{tm} = 0.316 * f_{ck}^{2/3}$  και την παραμόρφωση ρηγμάτωσης  $\epsilon_{tm} = \frac{f_{tm}}{E_0}$  ενώ για τον φθίνοντα κλάδο υπάρχουν τρεις θεωρήσεις, (α) γραμμική (β) δι-γραμμική (γ) εκθετική (σχήμα 4.31)



Σχήμα 4.31: Συγκριτικές καμπύλες συμπεριφοράς στον εφελκυσμό (Genikomsou A, 2015)

Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που προτάθηκε από τον Hordijk (1992) που θεωρεί εκθετική καμπύλη και συμπεριλαμβάνει την επίδραση τόσο του μεγέθους του στοιχείου  $l_{eq}$  όσο και της ενέργειας θραύσης  $G_F$ . Η εξίσωση είναι η εξής:

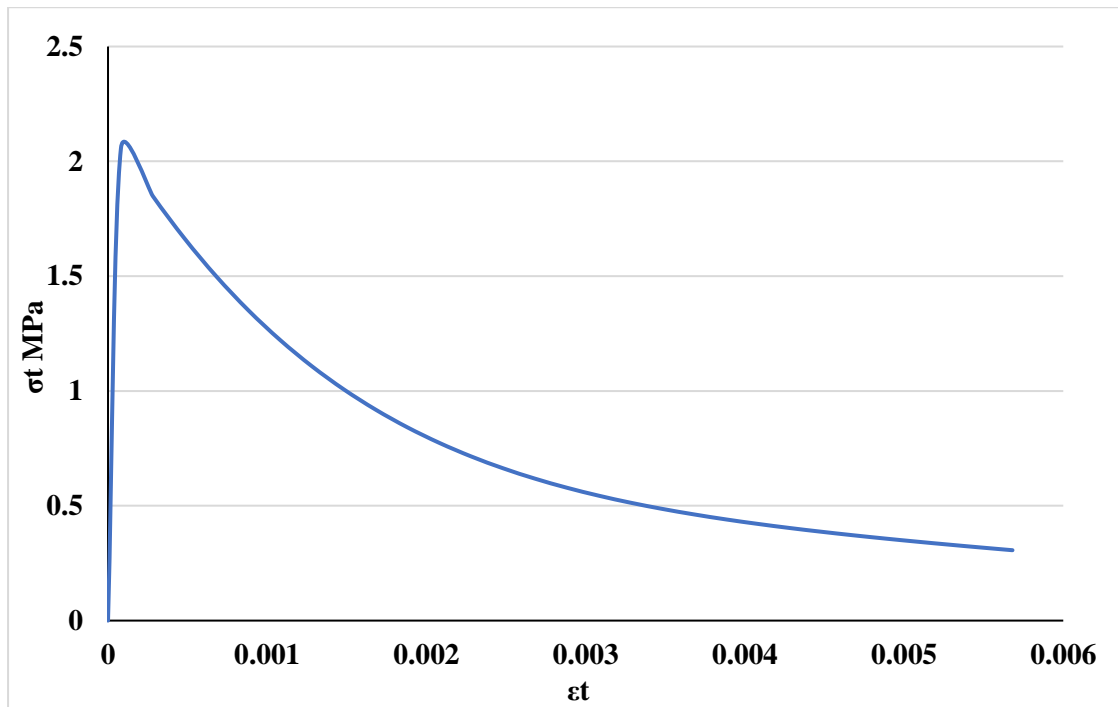
$$\sigma_t = \left[ 1 + \left( c1 \frac{w}{wc} \right)^3 \right] e^{-c2*w/wc} - \frac{w}{wc} (1 + c1^3) e^{-c2}$$

όπου  $W_c = 5.14 \frac{G_F}{f_{tm}}$ ,  $G_F = 0.073 * f_{cm}^{0.18}$ ,  $c1=3$  και  $c2=6.93$ . Για την μετατροπή της καμπύλης τάσεων-μετατοπίσεων σε καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σχήμα 4.32), χρησιμοποιείται ο τύπος  $\epsilon_t = \epsilon_{tm} + \frac{w}{l_{eq}}$ , όπου  $\epsilon_{tm}$  είναι η παραμόρφωση ρηγμάτωσης.

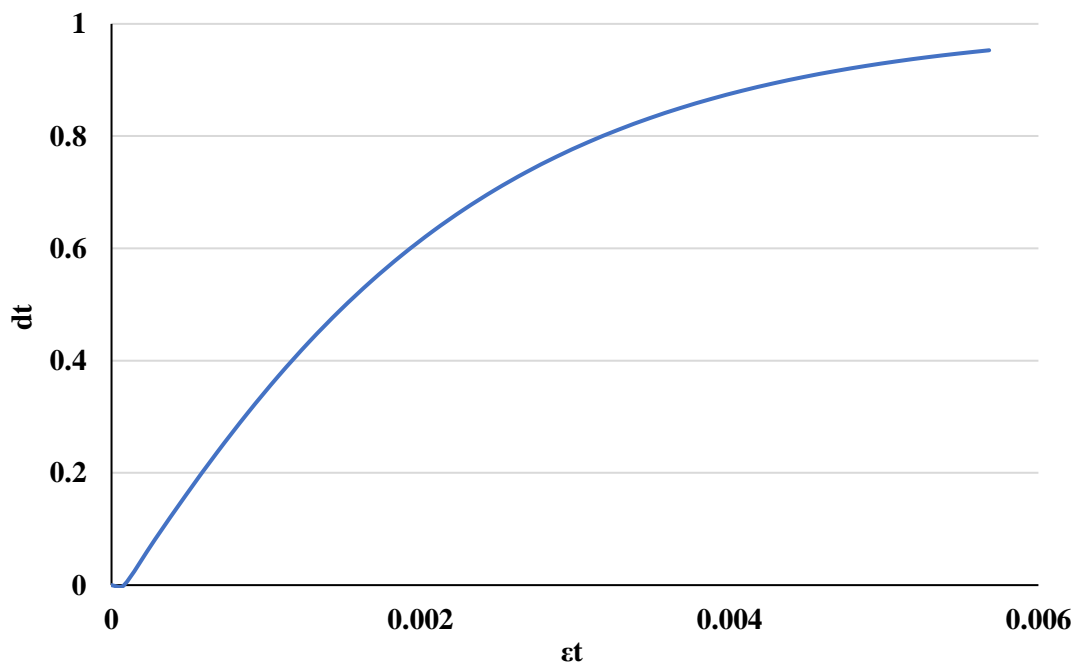
Για την καμπύλη βλαβών-παραμορφώσεων (σχήμα 4.33) χρησιμοποιείται η εξίσωση που προτάθηκε από τους Alfarah et al σε απόλυτη αντιστοιχία με την εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση της θλίψης:

$$d_t = 1 - \frac{1}{2+at} [2(1 + at)e^{-bt*\epsilon ck} - at * e^{-2bt*\epsilon ck}]$$

όπου  $\alpha_t = 1.00$  και  $b_t = \frac{ft_0 * leq}{GF} \left(1 + \frac{at}{2}\right)$ .



Σχήμα 4.32: Καμπύλη συμπεριφοράς υπό μονοαξονικό εφελκυσμό (Hordijk,1992)

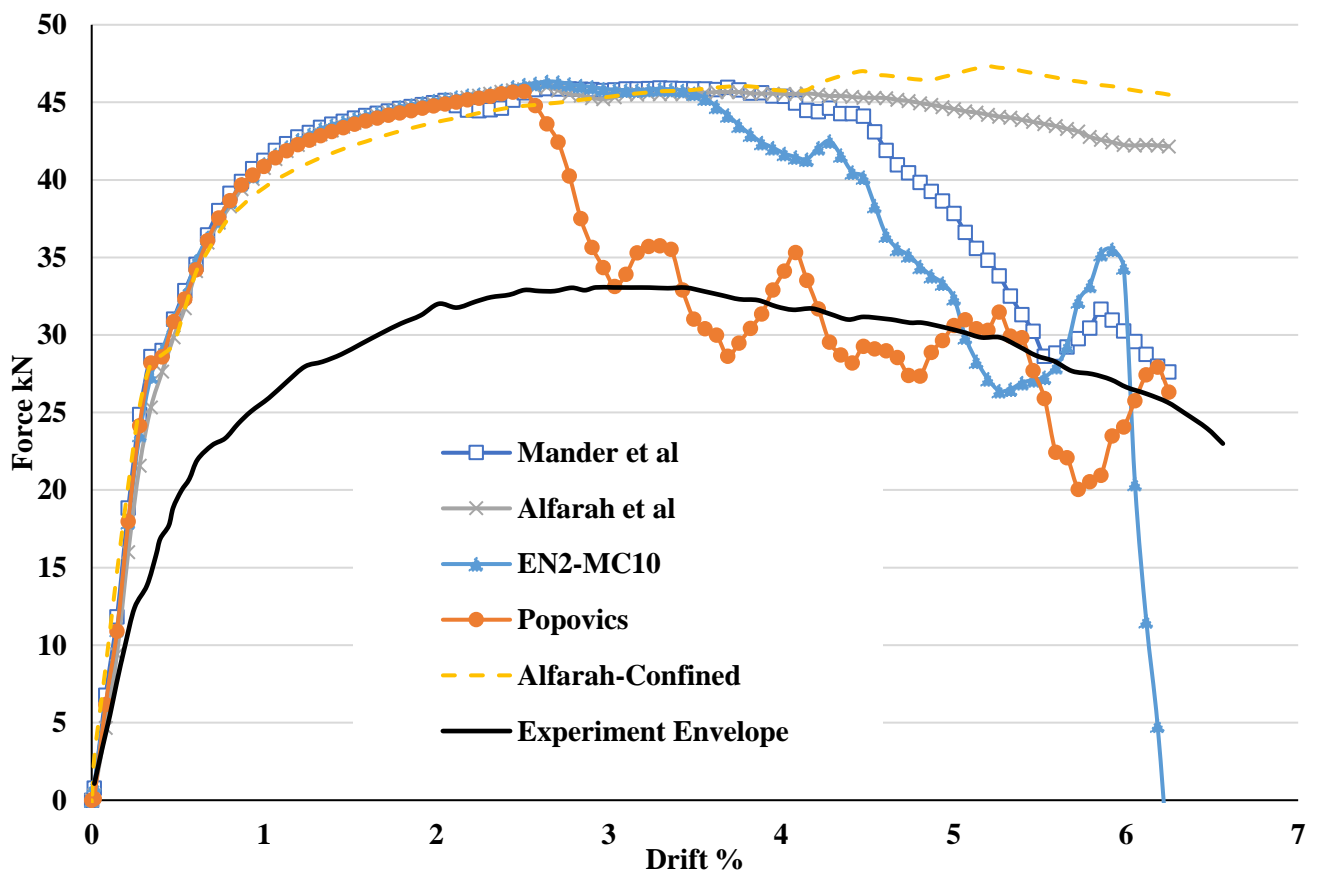


Σχήμα 4.33: Καμπύλη βλάβης υπό μονοαξονικό εφελκυσμό (Alfarah et al, 2017)

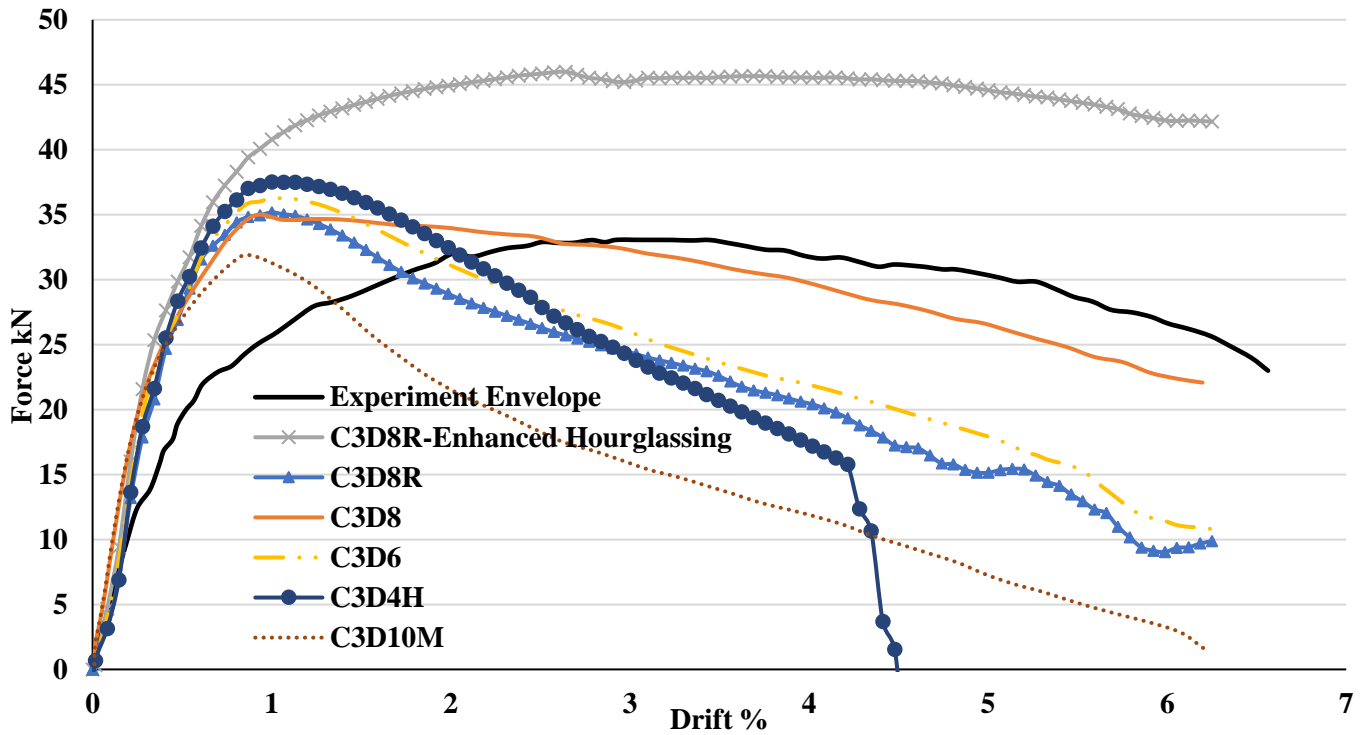


## 4.3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

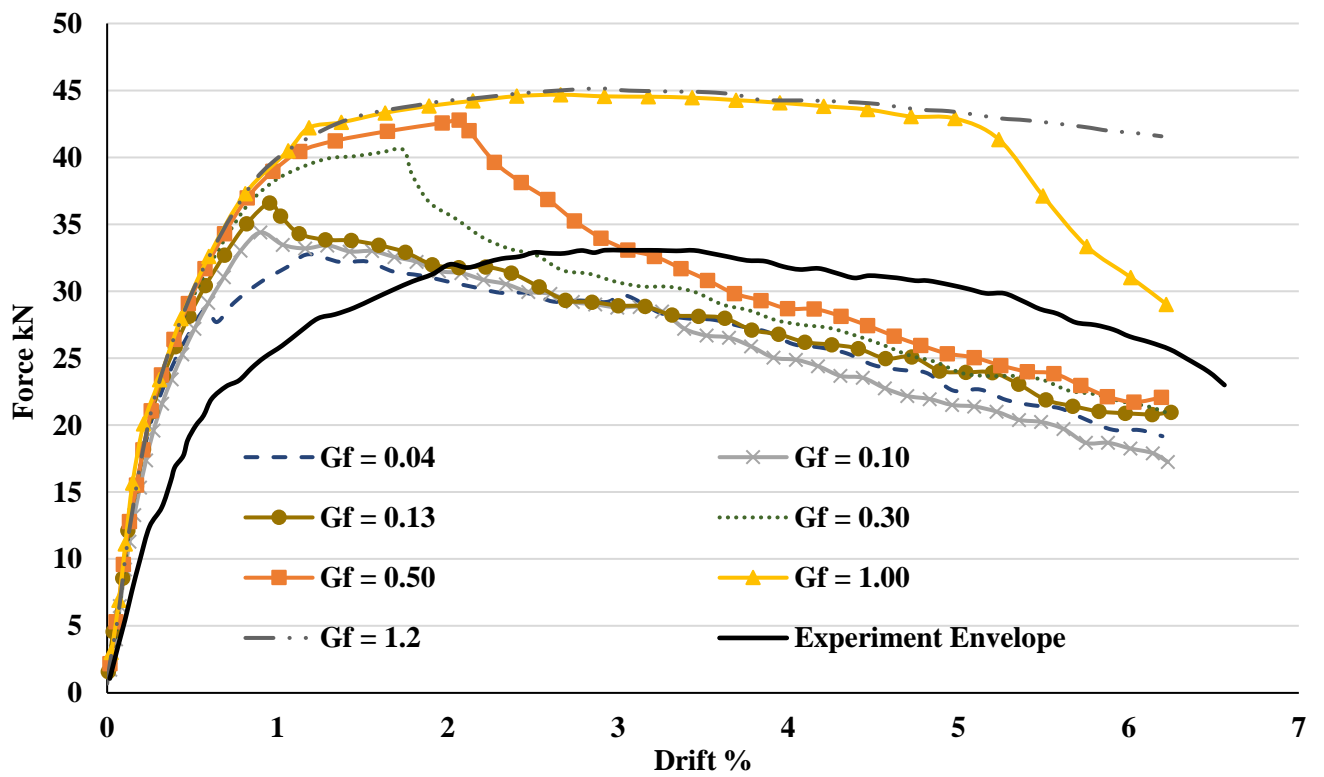
Προκειμένου να γίνει η επιλογή μεταξύ της πληθώρας δεδομένων ως προς τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου και του μοντέλου περιγραφής της συμπεριφοράς για το σκυρόδεμα, όπως επίσης να προσομοιωθεί σωστά το μοντέλο CDP με τις κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους και τέλος να διερευνηθεί η ευαισθησία του μοντέλου στην διακριτοποίηση (mesh sensitivity) έγιναν διαδοχικές μονοτονικές φορτίσεις όπου κάθε φορά όλες οι μεταβλητές διατηρούνταν σταθερές εκτός από αυτή που διερευνάται (σχήμα 4.34 έως 4.41). Κατά τον Φαρδή Μ. (2009) η μονοτονική σε σχέση με την κυκλική φόρτιση, έχει παρόμοια αποτελέσματα σε επίπεδο καμπύλης ικανότητας, όμως μεγάλη διαφορά σε επίπεδο μορφής αστοχίας. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μονοτονική φόρτιση με ασφάλεια των αποτελεσμάτων προκειμένου να είναι δυνατή η συγκριτική αποτύπωση των καμπύλων σε κοινό διάγραμμα και προφανώς η απομείωση στον συνολικό υπολογιστικό φόρτο.



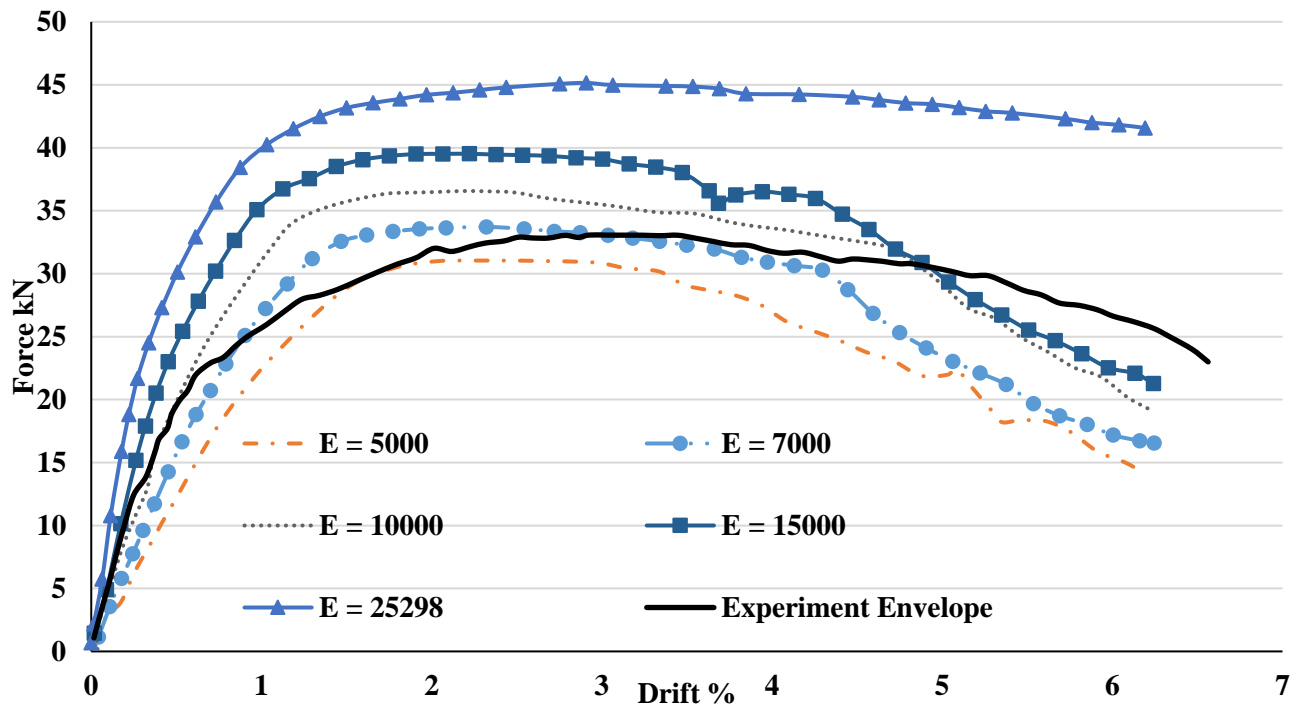
Σχήμα 4.34: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μοντέλο υπό θλίψη



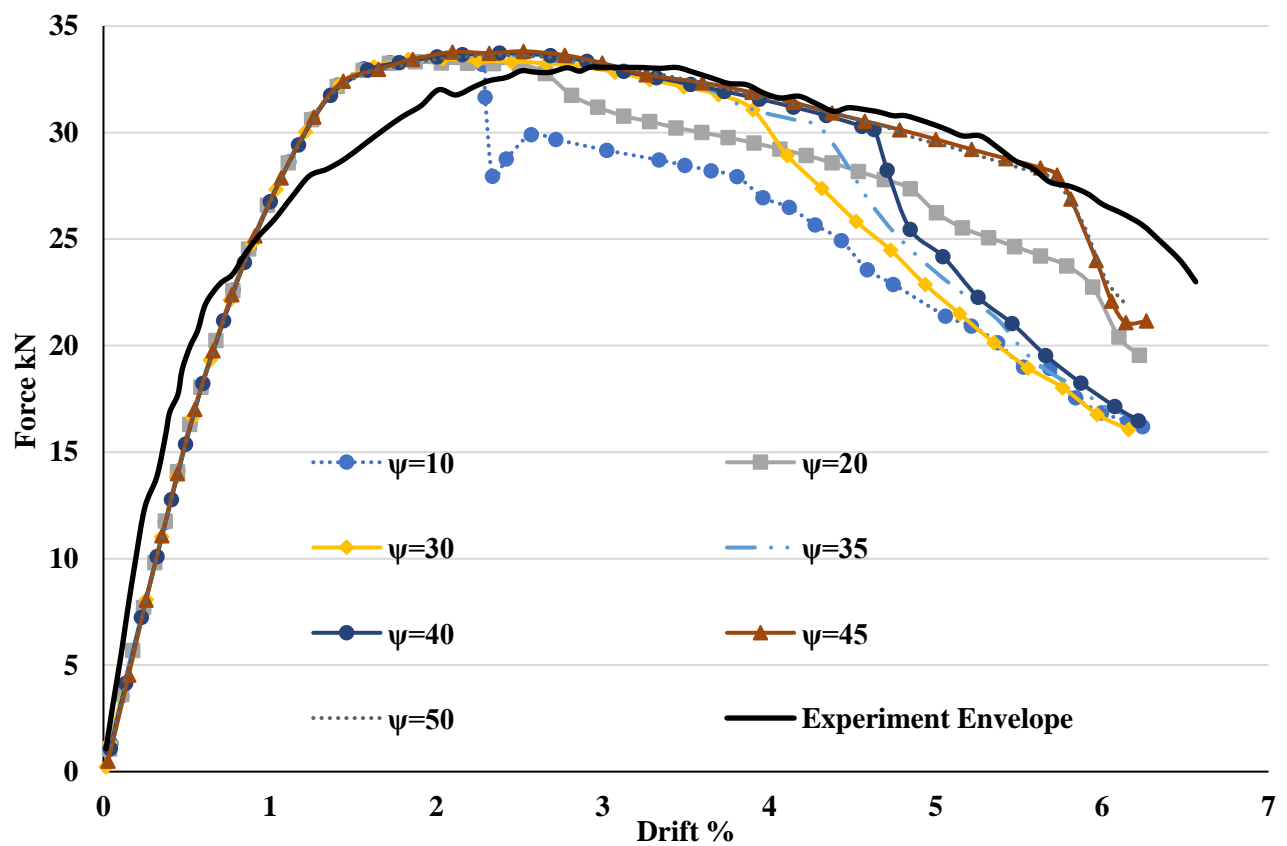
Σχήμα 4.35: Παραμετρική διερεύνηση ως προς τον τύπο στοιχείου



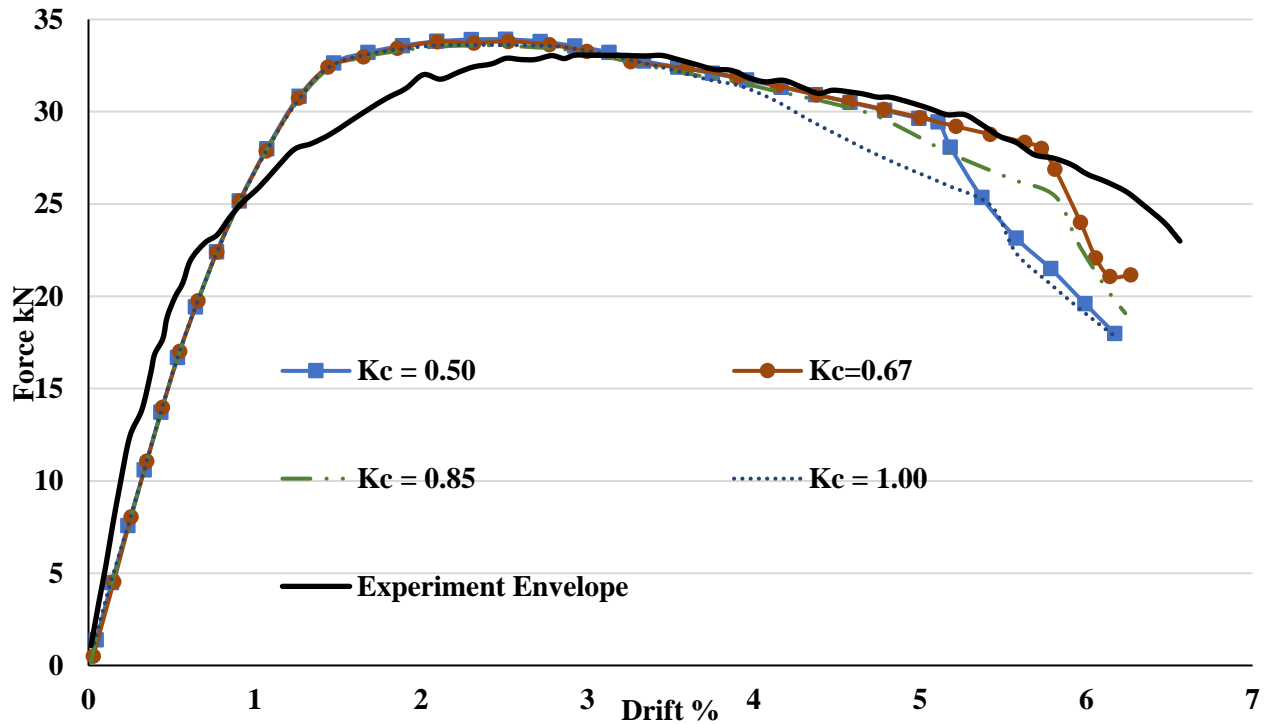
Σχήμα 4.36: Παραμετρική διερεύνηση ως προς την ενέργεια θραύσης  $G_F$  (N/mm)



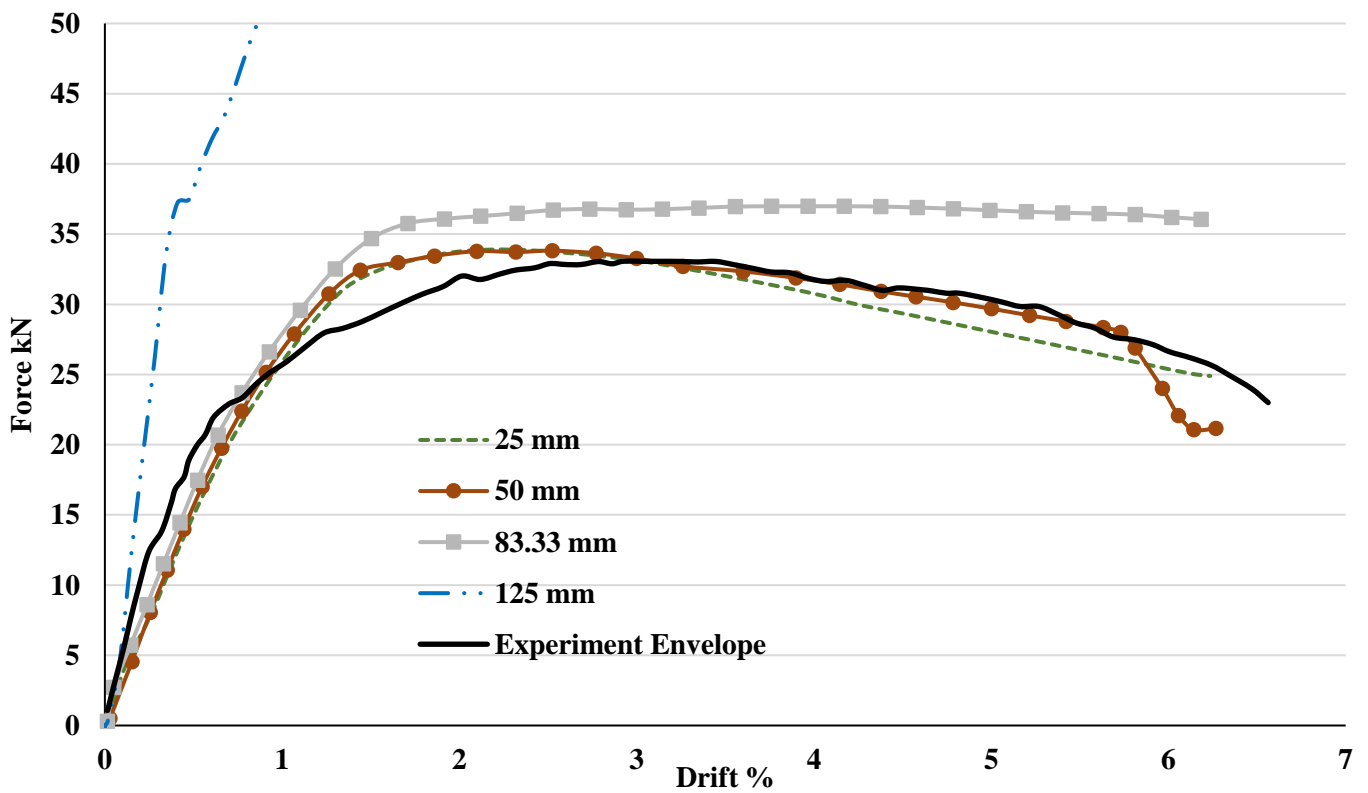
Σχήμα 4.37: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέτρο ελαστικότητας E (MPa)



Σχήμα 4.38: Παραμετρική διερεύνηση ως προς την γωνία διάδοσης  $\psi$  ( $^{\circ}$ )



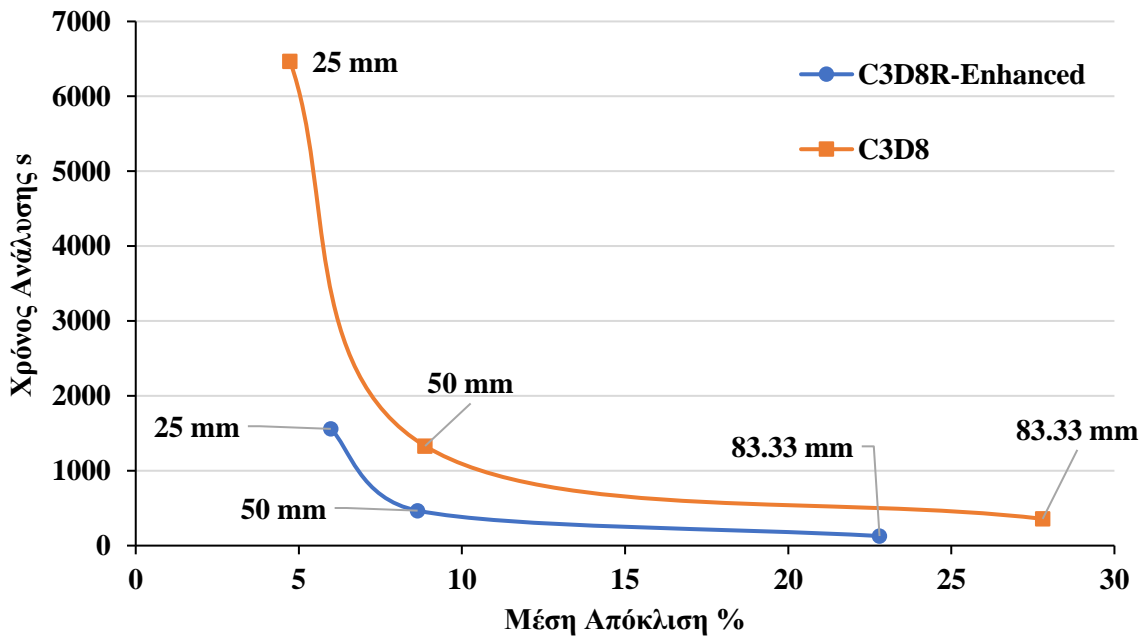
Σχήμα 4.39: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το  $K_c$



Σχήμα 4.40: Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος στοιχείου (mm) για στοιχεία C3D8R-Enhanced (mesh sensitivity analysis) (1 σημείο Gauss)

Στοιχείο	Μέση απόκλιση (%)	Χρόνος Ανάλυσης (s)
C3D8R Enh-25mm	5.98	1559
C3D8R Enh-50mm	8.64	467
C3D8R Enh-83.33mm	22.8	128
C3D8-25mm	4.73	6468
C3D8-50mm	8.87	1330
C3D8-83.33mm	27.8	357

Πίνακας 4.3: Χρόνοι ανάλυσης κατά την παραμετρική διερεύνηση



Σχήμα 4.41: Σχέση τύπου και μεγέθους στοιχείου με τον χρόνο ανάλυσης και την μέση απόκλιση από το πείραμα

Οι διαφορές σε επίπεδο χρόνο μεταξύ 50mm και 25mm είναι σημαντικές ενώ η ακρίβεια δεν αυξάνει τόσο ώστε να δικαιολογεί την επιλογή του μικρότερου (finer mesh) όπως φαίνεται στον πίνακα 4.3. Άρα στον πίνακα 4.4 δίνονται οι τελικές επιλογές μετά την απαιτούμενη βαθμονόμηση (calibration).

$\epsilon$	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	$K_c$	$\psi$ (°)	$\mu$	$E$ (MPa)	$\nu$	$G_f$ (N/mm)	$l_{eq}$ (mm)	Στοιχείο	wc / wt
0.1	1.16	0.67	36	0	7000	0.2	0.65	50	C3D8R-Enhanced	0.90/0.00

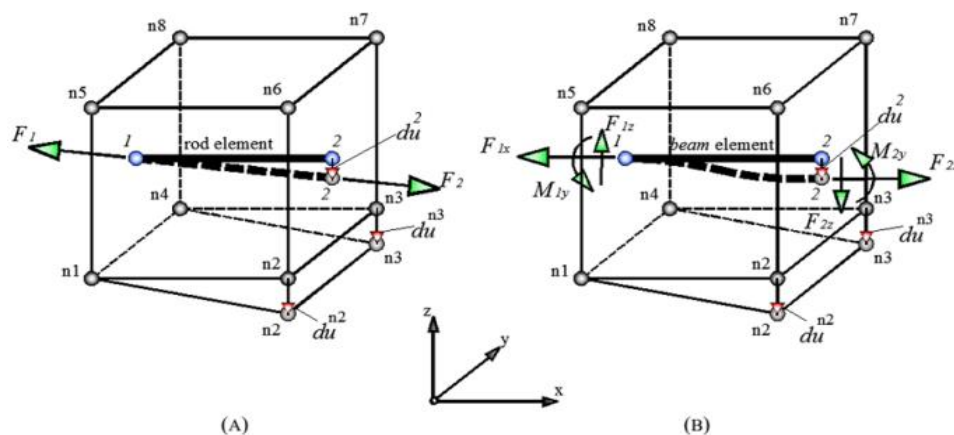
Πίνακας 4.4: Βαθμονομημένες τιμές για τις παραμέτρους του CDP και επιλογή διακριτοποίησης

## 4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

### 4.4.1 ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι τρόποι με τους οποίους δύναται να προσομοιώσει κανείς τις ράβδους του χάλυβα οπλισμού είναι είτε σαν τρισδιάστατα συμπαγή σώματα (3d continuum solid) είτε σαν στοιχεία δοκού (beam) είτε σαν στοιχεία δικτυώματος (truss). Στην συγκεκριμένη εργασία, υιοθετείται ο τρίτος κατά σειρά τρόπος, στοιχεία δικτυώματος ενσωματωμένα στα τρισδιάστατα στοιχεία του σκυροδέματος (embedded region), καθώς είναι ευρέως διαδεδομένος για την απλότητα αλλά ταυτόχρονα και την πολύ καλή ακρίβεια που παρέχει.

Κατά την προσομοίωση του χάλυβα ως στοιχείο δικτυώματος, γίνεται η παραδοχή πως το στοιχείο αυτό θα ενταθεί μόνο αξονικά, παραλαμβάνοντας δηλαδή φορτία είτε θλιπτικά είτε εφελκυστικά και παράλληλα αγνοώντας τις υπόλοιπες μορφές έντασης όπως η κάμψη, η διάτμηση και η στρεπτική ροπή (σχήμα 4.42). Αυτό είναι συνήθως η πραγματικότητα που ισχύει στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, ωστόσο υπάρχουν και ορισμένες εξαιρέσεις όπως ένα τοίχιο ή ένας βραχύς πρόβολος όπου η διάτμηση παίζει σημαντικό ρόλο και εάν δεν ληφθεί υπόψη με κάποιο τρόπο, η ανάλυση θα δώσει πλασματικά αποτελέσματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο οπλισμός θεωρείται ως στοιχείο δοκού, δίνοντας έτσι την δυνατότητα ανάληψης όλων των πιθανών μορφών εντατικής κατάστασης (σχήμα 4.42). Πέραν αυτών όμως, οι παραδοχές προσομοίωσης ως δικτυώματα συμφωνούν με την λειτουργία των κατασκευών και καθώς είναι πιο οικονομικές και απλοϊκές, σχεδόν πάντα προτιμώνται.



Σχήμα 4.42: Προσομοίωση ράβδου οπλισμού (A) ως δικτύωμα (B) ως στοιχείο δοκού, ενσωματωμένος σε εξαεδρικό στοιχείο σκυροδέματος

Όταν για τον οπλισμό χρησιμοποιείται ένα στοιχείο δοκού, πρέπει να βρεθεί η εξάρτηση των στροφών των κόμβων του στοιχείου δοκού με τις στροφές των εδρών του εξαεδρικού στοιχείου. Αυτή η συμβατότητα επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της στροφής της έδρας του εξαεδρικού στοιχείου, η οποία περιέχει τον κόμβο του στοιχείου δοκού. Η σύνδεση των μετακινήσιμων μεγεθών των κόμβων των ράβδων οπλισμού με τους κόμβους των στοιχείων σκυροδέματος γίνεται με την χρήση κινηματικών σχέσεων (π.χ. Kotsinos M and Pavlovic M). Η διαδικασία περιλαμβάνει την επίλυση ενός συστήματος μη συμμετρικών συνοριακών εξισώσεων (non symmetric constraint equations) με τις εκφράσεις:

$$u^B = T^*U^H, F^H = T^T F^B$$

όπου  $u^B$  οι μετατοπίσεις των κόμβων του στοιχείου δοκού ενώ  $U^H$  οι μετατοπίσεις των κόμβων του αντίστοιχου εξαεδρικού στοιχείου. Ομοίως τα διανύσματα  $F^B$ ,  $F^H$  αντιπροσωπεύουν τις εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στους κόμβους του στοιχείου δοκού και στους κόμβους του εξαεδρικού αντίστοιχα. Το μητρώο μετασχηματισμού  $T$  αποτελείται από 32 υπομητρώα (3x3) τα οποία υπολογίζονται από τις φυσικές συντεταγμένες του εξαεδρικού στοιχείου, του στοιχείου δοκού και των κόμβων του τριγώνου αναφοράς που σχετίζεται με την εξάρτηση στοιχείου σκυροδέματος-οπλισμού.

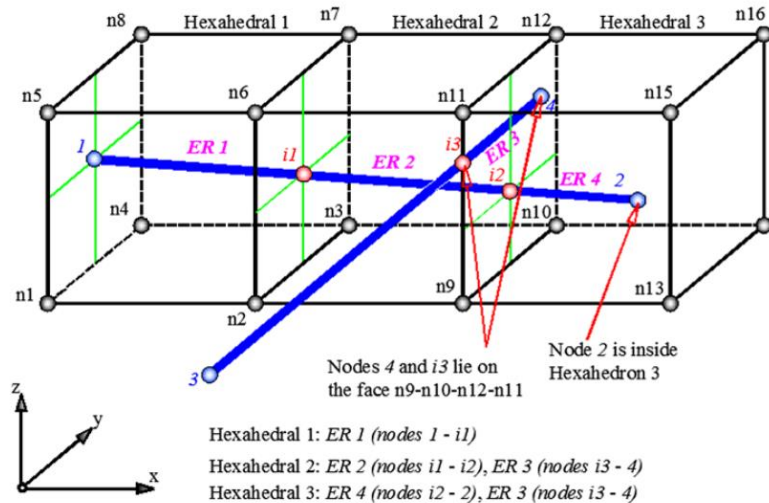
Στην περίπτωση ενός στοιχείου δικτύματος 2 ή 3 κόμβων τα πράγματα είναι αρκετά απλούστερα. Οι συνθήκες συμβατότητας μεταξύ των ακραίων κόμβων του δικτύματος και των αντίστοιχων κόμβων του εξαεδρικού στοιχείου επιβάλλονται μόνο μέσω των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας εφόσον οι στροφές των κόμβων αμελούνται. Επομένως, η συνεισφορά του στοιχείου του οπλισμού λαμβάνεται υπόψη στο μητρώο δυσκαμψίας του εξαεδρικού στοιχείου μέσα από την παρακάτω σχέση:

$$K_{hex} = K + \sum_i^n [(T_i)^T * K_{i^{rebar}} * T_i]$$

,όπου  $T_i$  είναι το μητρώο μετασχηματισμού όπου περιέχει τις συνθήκες συμβιβαστότητας ανάμεσα στις επικόμβιες μετατοπίσεις του στοιχείου οπλισμού και του εξαεδρικού στοιχείου,  $K$  είναι το μητρώο δυσκαμψίας του εξαεδρικού στοιχείου και  $n$  είναι ο αριθμός των στοιχείων οπλισμού.

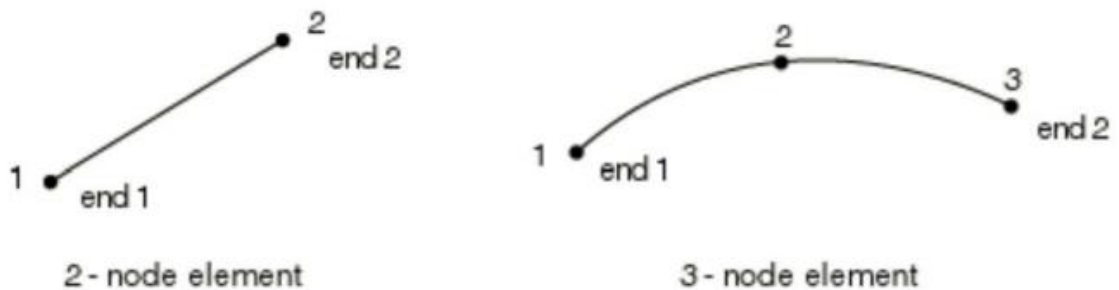
Σύμφωνα με την μέθοδο των Barzegar and Maddipudi, προσεγγιστικά αλλά με ικανοποιητική ακρίβεια σε ανάλυση και συμπεριφορά, μας δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης (γένεσης) των ράβδων οπλισμού ως στοιχεία δικτύματος στο

εσωτερικό των εξαεδρικών στοιχείων χωρίς να είναι απαραίτητο να τηρηθεί προκαθορισμένος τρόπος ενσωμάτωσης (σχήμα 4.43). Στην αριθμητική ευστάθεια αυτού, συμβάλλει σημαντικά η επιλογή 8-κομβικών εξαεδρικών στοιχείων έναντι 20-κομβικών, καθώς λόγω μικρότερης καμπύλωσης των πρώτων, το μητρώο T απαλλάσσεται από περιττούς πλέον υπολογισμούς.



Σχήμα 4.43: Τυχαία ενσωμάτωση στοιχείων οπλισμού στα στοιχεία σκυροδέματος

Για την προσομοίωση κάθε ράβδου λοιπόν, επιλέχθηκαν T3D2 στοιχεία δηλαδή στοιχεία δικτύματος στον χώρο (3D) με 2 κόμβους ανά στοιχείο. Επιπλέον αυτής της επιλογής υπάρχει το στοιχείο T3D3, του οποίου η μόνη διαφορά είναι η αύξηση κατά έναν των κόμβων (quadratic – 2<sup>ας</sup> τάξης), που όμως δεν είναι διαθέσιμο για ανάλυση με τον explicit solver (σχήμα 4.44).



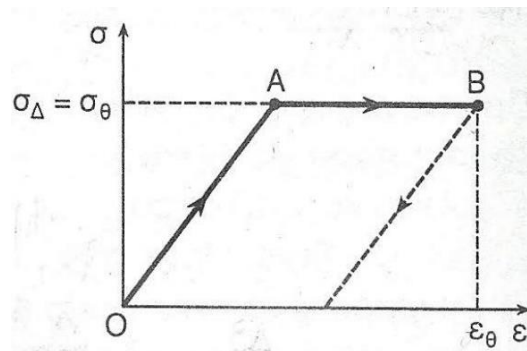
Σχήμα 4.44: Στοιχεία δικτύματος στον χώρο με 2 ή 3 κόμβους



## 4.4.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

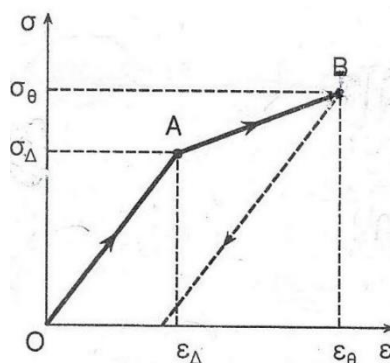
Τα στοιχεία οπλισμού, προσομοιώνονται με ιδιότητες υλικού ελαστικού και είτε απολύτως πλαστικού είτε γραμμικώς κρατυνόμενου.

Στην περίπτωση του απολύτως πλαστικού (σχήμα 4.45), θεωρείται πως το διάγραμμα τάσεων  $\sigma$  – παραμορφώσεων  $\varepsilon$  αποτελείται από δύο ευθείες: μία έως την τάση διαρροής ( $\sigma_{\Delta}$ ) και άλλη μια οριζόντια έως την θραύση. Η συμπεριφορά των υλικών αυτών δεν είναι εξ ολοκλήρου αντιστρέψιμη και σε αυτή την κατηγορία εξιδανικεύονται υλικά ακόμα και με υπαρκτή αλλά αρκετά ασθενής κράτυνση.



Σχήμα 4.45: Διάγραμμα τάσεων  $\sigma$  – παραμορφώσεων  $\varepsilon$  για ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό

Στην περίπτωση του γραμμικώς κρατυνόμενου υλικού (σχήμα 4.46), θεωρείται πως το διάγραμμα τάσεων  $\sigma$  – παραμορφώσεων  $\varepsilon$  είναι το αντίστοιχο του ελαστικού μέχρι το σημείο διαρροής  $\sigma_{\Delta}$ , επιδεικνύοντας γραμμική κράτυνση σε μεγαλύτερες τάσεις έως την τάση θραύσης  $\sigma_{\theta}$ . Και σε αυτή την περίπτωση, μετά την διαρροή, δεν παρατηρείται απόλυτη αντιστρεψιμότητα.



Σχήμα 4.46: Διάγραμμα τάσεων  $\sigma$  – παραμορφώσεων  $\varepsilon$  για ελαστικό- γραμμικώς κρατυνόμενο υλικό

Στο πείραμα αναφοράς παρέχονται ως δεδομένα, οι τάσεις στο σημείο διαρροή και θραύσης όπως και η παραμόρφωση θραύσης. Καθώς οι 2 τιμές των τάσεων είναι

διαφορετικές, θεωρείται ο χάλυβας ως ελαστικό – γραμμικώς κρατυνόμενο υλικό. Η παραδοχή αυτή θεωρείται απόλυτα επαρκής για τον χάλυβα των οπλισμών διάτμησης και υιοθετείται πλήρως. Όσον αφορά στις ράβδους που χρησιμοποιούνται για τον διαμήκη οπλισμό του υποστρώματος όμως, θα πρέπει να γίνει κάποια αναθεώρηση του νόμου αυτού. Η αναθεώρηση αυτή, έγκειται κυρίως σε δύο κρίσιμους παράγοντες:

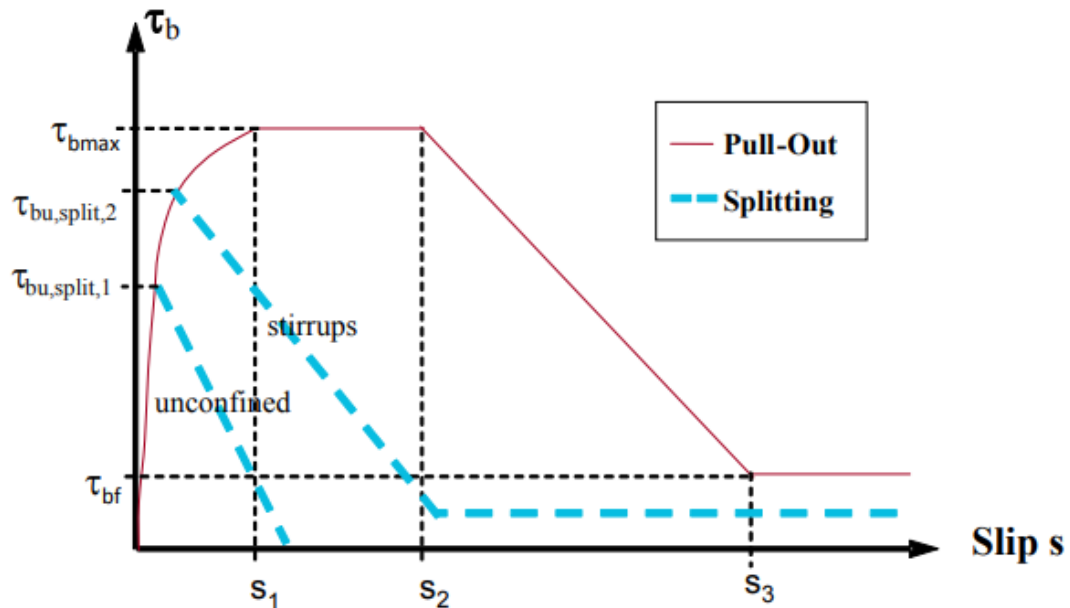
1. Τα δεδομένα για την συμπεριφορά του χάλυβα προέκυψαν από τα απαιτούμενα από τους κανονισμούς πρότυπα ελέγχου δοκιμίων ράβδων από χάλυβα σε εφελκυστική καταπόνηση. Επομένως, είναι βέβαιο ότι μετά την ενσωμάτωση των ράβδων αυτών οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα, η συμπεριφορά τους και άρα του υλικού, δεν θα είναι κοινή με αυτή που μετρήθηκε.
2. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η πιθανότητα ανακυκλιζόμενης φόρτισης (και φαινόμενο μεταβαλλόμενης διεύθυνσεως φορτίσεις για τους οπλισμούς), είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση, η επίδραση του φαινομένου της σχετικής ολίσθησης μεταξύ οπλισμού – σκυροδέματος που προκαλείται λόγω της ανεπτυγμένης συνάφεια ανάμεσα στα δύο υλικά.

Για να ληφθούν υπόψη τα παραπάνω, έχουν αποτυπωθεί αρκετά μοντέλα προσομοίωσης αυτών των καταστάσεων, εφόσον επιχειρείται να προσομοιωθούν μέσω των ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού. Αναφέρονται δύο από αυτά που επιλέχθηκαν ενώ παρακάτω (σχήματα 4.53-4.55) παρουσιάζεται παραμετρική διερεύνηση μεταξύ τους και συγκριτικά με την περίπτωση των αρχικών ιδιοτήτων του χάλυβα (perfect bond) για μονοτονική αλλά και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. (Υπενθυμίζεται πως στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι με λεία επιφάνεια).

- 1) Model Code 2010: Στις διατάξεις αυτές (σχήματα 4.47-4.48), προτείνεται ένα μοντέλο που αποτελεί εξέλιξη της ερευνητικής προσπάθειας των Eligehausen R. et al (1983) και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων (αστοχία είτε λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης του σκυροδέματος είτε λόγω εξόλκευσης του οπλισμού, είτε συμπερίληψη είτε όχι της περίσφιγξης, ράβδοι είτε λείες είτε με νευρώσεις). Ο υπολογισμός του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για τον χάλυβα, προέκυψε από το διάγραμμα τάσης συνάφειας-ολίσθησης, θεωρώντας πλέον πως η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτύξει ο οπλισμός περιορίζεται από

την μέγιστη τάση συνάφειας που είναι δυνατόν να αναπτυχθεί. Η συγκεκριμένη μετατροπή έγινε ως εξής:

$\tau_{bmax} \rightarrow \tau_{bmax} * l_a * U_i = f_s * A_i \rightarrow f_s = \frac{\tau_{bmax} * l_a * 4}{d_i}$  και  $\epsilon_s^* = \epsilon_s + \frac{s}{l_a}$ , όπου  $\tau_{bmax}$  η μέγιστη τάση συνάφειας,  $l_a$  το μήκος μεταβίβασης των τάσεων,  $U_i$ ,  $A_i$ ,  $d_i$  η περίμετρος, το εμβαδόν και η διάμετρος αντίστοιχα της ράβδου  $i$ ,  $f_s$  η τελική τάση και  $s$  η σχετική ολίσθηση της ράβδου.



Σχήμα 4.47: Καμπύλη τάσης συνάφειας  $\tau_b$  – ολίσθησης  $s$  (Model Code 2010)

	Cold drawn wire		Hot rolled bars	
	Good bond conditions	All other bond cond.	Good bond conditions	All other bond cond.
$s_1 = s_2 = s_3$	0.01 mm	0.01 mm	0.1 mm	0.1 mm
$\alpha$	0.5	0.5	0.5	0.5
$\tau_{bmax} = \tau_{bf}$	$0.1 \sqrt{f_{cm}}$	$0.05 \sqrt{f_{cm}}$	$0.3 \sqrt{f_{cm}}$	$0.15 \sqrt{f_{cm}}$

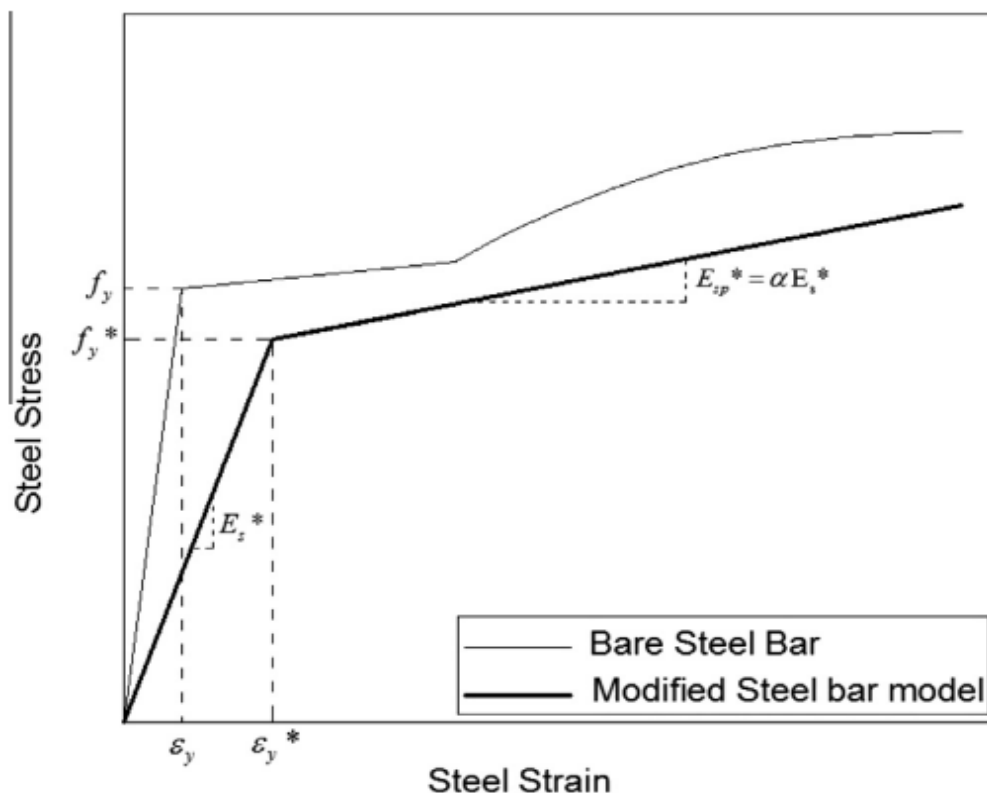
Σχήμα 4.48: Παράμετροι τάσης συνάφειας  $\tau_b$  – ολίσθησης  $s$  (Model Code 2010)

- 2) Οι Belarbi and Hsu (1994), σε αντίθεση με το Model Code, πρότειναν μία περισσότερο εμπειρική αναδιαμόρφωση των ιδιοτήτων του χάλυβα μέσα από πληθώρα πειραματικών ερευνών που πραγματοποίησαν (σχήμα 4.49).

Συγκεκριμένα πρότειναν αρχικά την απομείωση του ορίου διαρροής:

$$f_y^* = (0.93 - 2*B) * f_y \text{ με } B = \frac{1}{\rho} * (f_{cr} / f_y)^{1.5} \text{ όπου } f_y \text{ είναι η αρχική τάση}$$

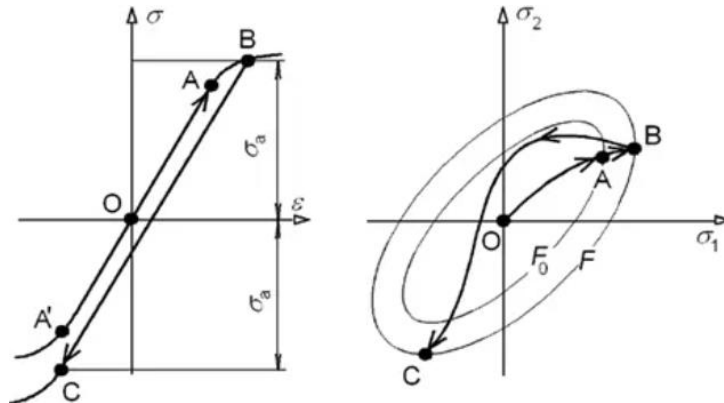
διαρροής,  $f_{cr}$  είναι η κρίσιμη τάση εφελκυσμού ( $f_{ctm}$ ) του σκυροδέματος,  $\rho$  είναι το ποσοστό οπλισμού και έπειτα την απομείωση του μέτρου ελαστικότητας  $E_s^* = f_y^* / (\epsilon_s + \frac{s}{l_a})$  όπου  $l_a$  το μήκος μεταβίβασης της έντασης και  $s$  η μέγιστη σχετική ολίσθηση. Τέλος για το τμήμα όπου ο χάλυβας παρουσιάζει γραμμικώς κρατυνόμενη συμπεριφορά, θεώρησαν κλίση με μέτρο ελαστικότητας  $E_p^* = \alpha * E_s^*$  όπου  $\alpha = 0.03$ .



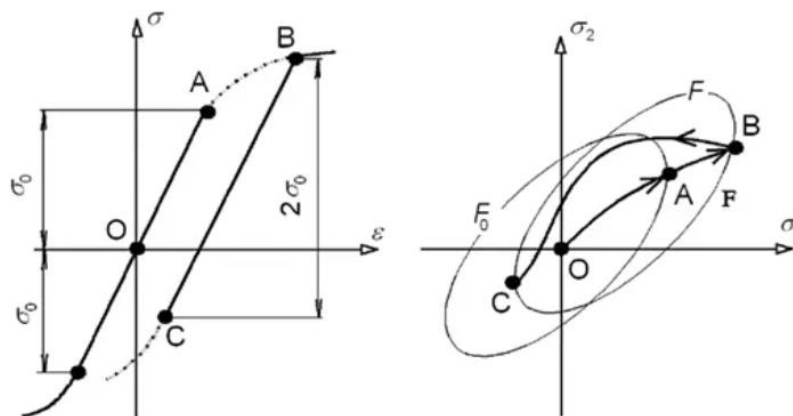
Σχήμα 4.49: Τροποποιημένο μοντέλο χάλυβα οπλισμού (Belarbi&Hsu)

Επίσης, ειδικά για την περίπτωση της ανακύκλισης, στο ABAQUS προσφέρονται δύο (τουλάχιστον) βασικές επιλογές για την προσομοίωση της κρατυνόμενης συμπεριφοράς του χάλυβα με την εξέλιξη των κύκλων φόρτισης. Αυτές είναι η ιστροπική και η κινηματική (σχήμα 4.50-4.51). Ορίζοντας ιστροπική κράτυνση, το όριο διαρροής παραμένει πάντοτε σταθερό, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός κύκλων φόρτισης, καθώς η επιφάνεια διαρροής τείνει να αυξηθεί, διατηρώντας το αρχικό της σχήμα. Στη θεώρηση μοντέλου κινηματικής κράτυνσης, η επιφάνεια

διαρροής μεταβάλλεται στον χώρο των τάσεων με αποτέλεσμα, με την αύξηση των κύκλων φόρτισης, η αύξηση των παραμορφώσεων του χάλυβα στην μία διεύθυνση να οδηγεί σε σταδιακή απομείωση του ορίου διαρροής στην αντίθετη διεύθυνση, αποσκοπώντας στην πιο ρεαλιστική προσομοίωση συμπεριλαμβάνοντας το φαινόμενο Bauschinger και την ανισοτροπία που κανονικά παρατηρούνται σε πραγματικά πειράματα. Καθίσταται απαραίτητη λοιπόν η υιοθέτηση της κινηματικής κράτυνσης για τον χάλυβα σπλισμού.

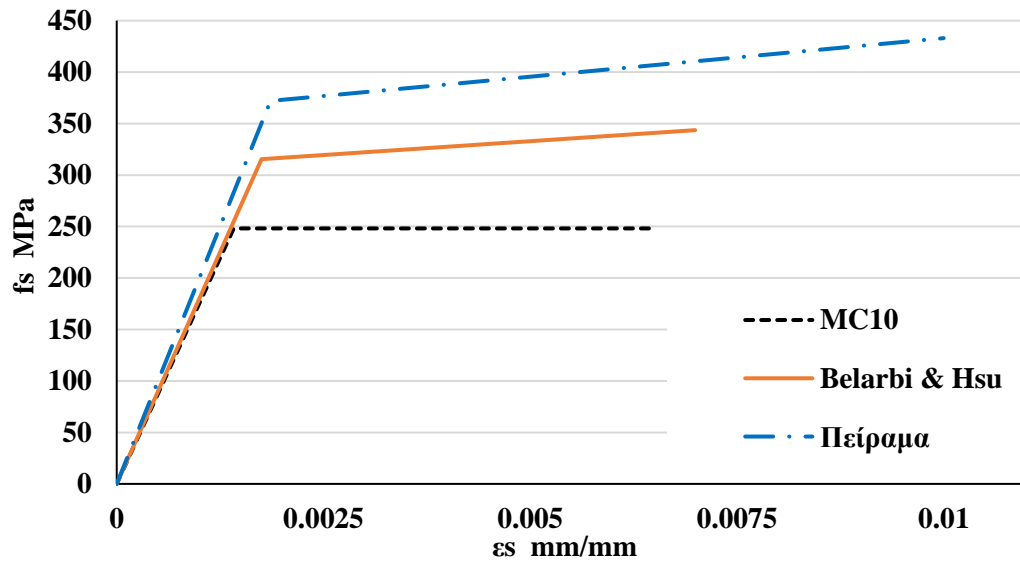


Σχήμα 4.50: Ισοτροπική κράτυνση χάλυβα (διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων και μεταβολή επιφάνειας διαρροής)

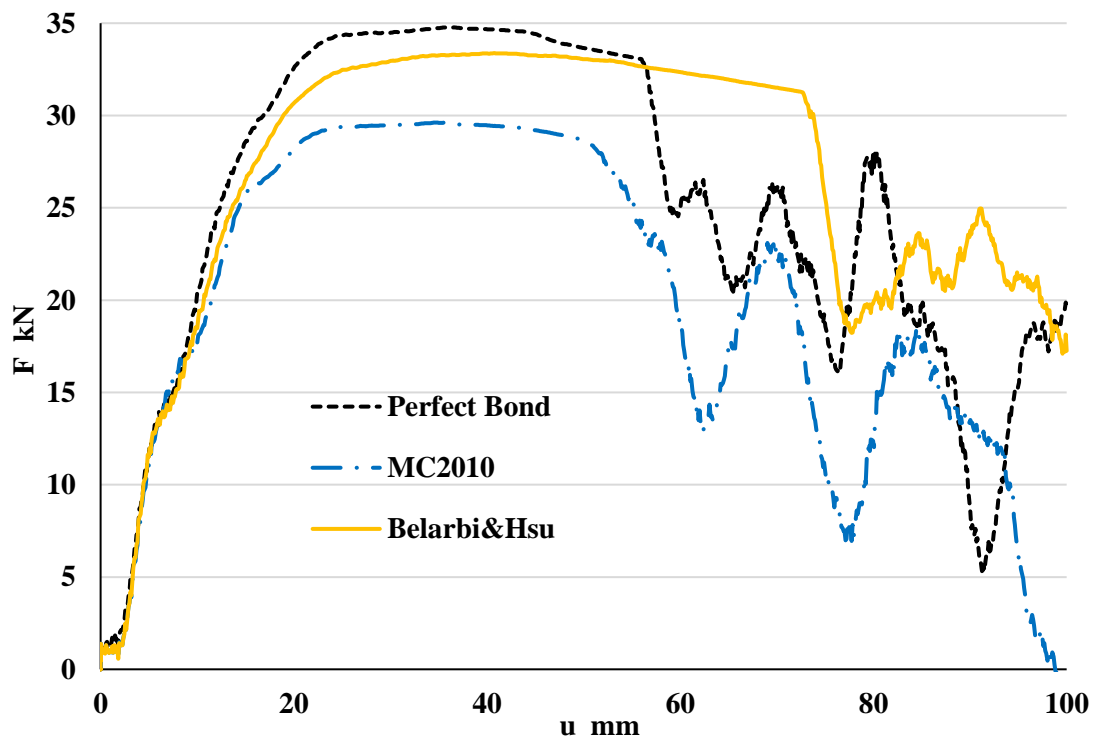


Σχήμα 4.51: Κινηματική κράτυνση χάλυβα (διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων και μεταβολή επιφάνειας διαρροής)

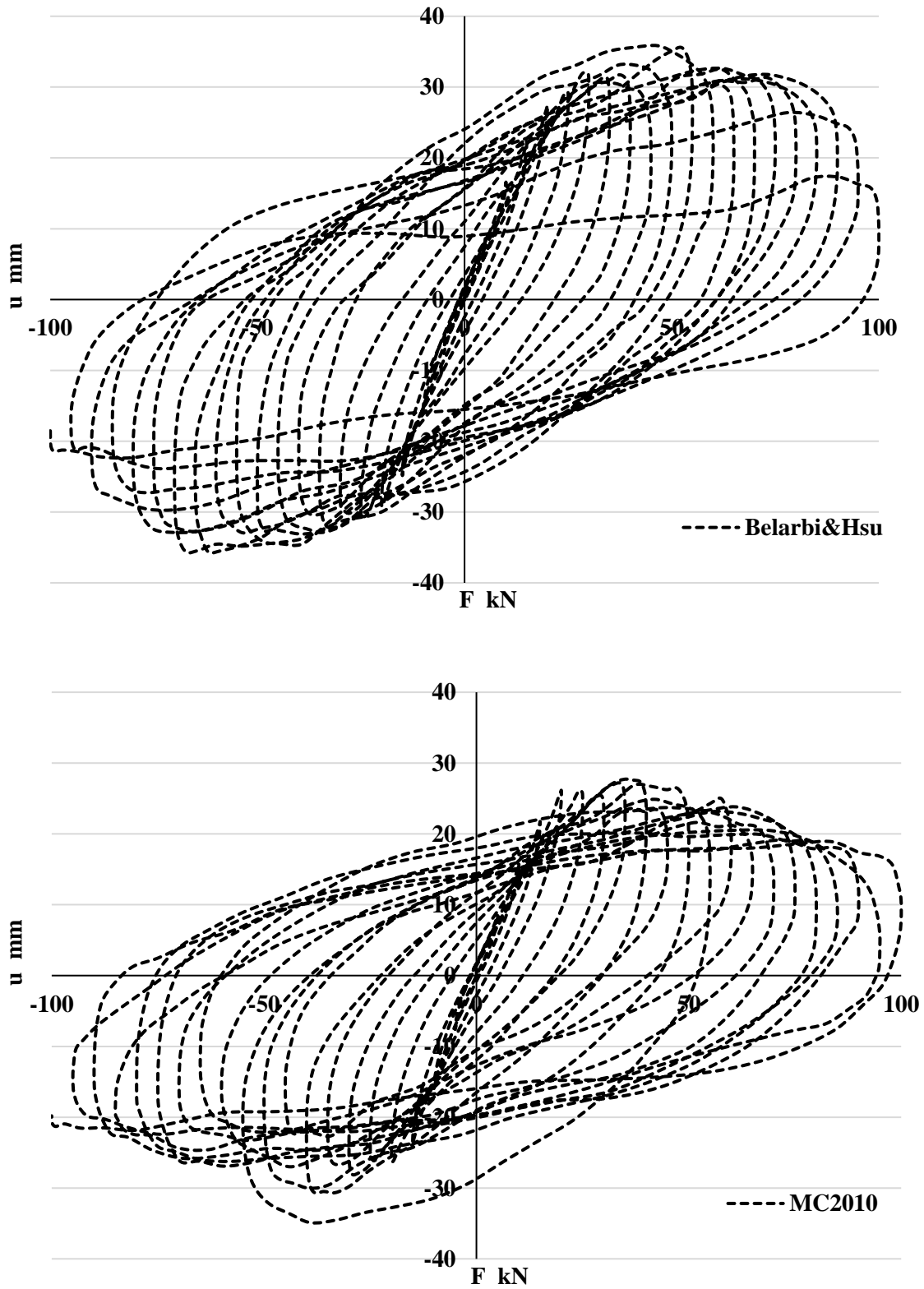
Σύμφωνα με τα παραπάνω, έγιναν αναλύσεις για να προσδιοριστεί η εγκυρότητα κάθε μεθόδου. Η συμπεριφορά έχει σημαντικές διαφορές, ενώ φαίνεται πως το προτεινόμενο από τους Belarbi&Hsu είναι το καταλληλότερο οπότε και αυτό επιλέχθηκε, αποτυπώνοντας ρεαλιστικότερα το φαινόμενο της αστοχίας (σχήμα 4.52-4.55).



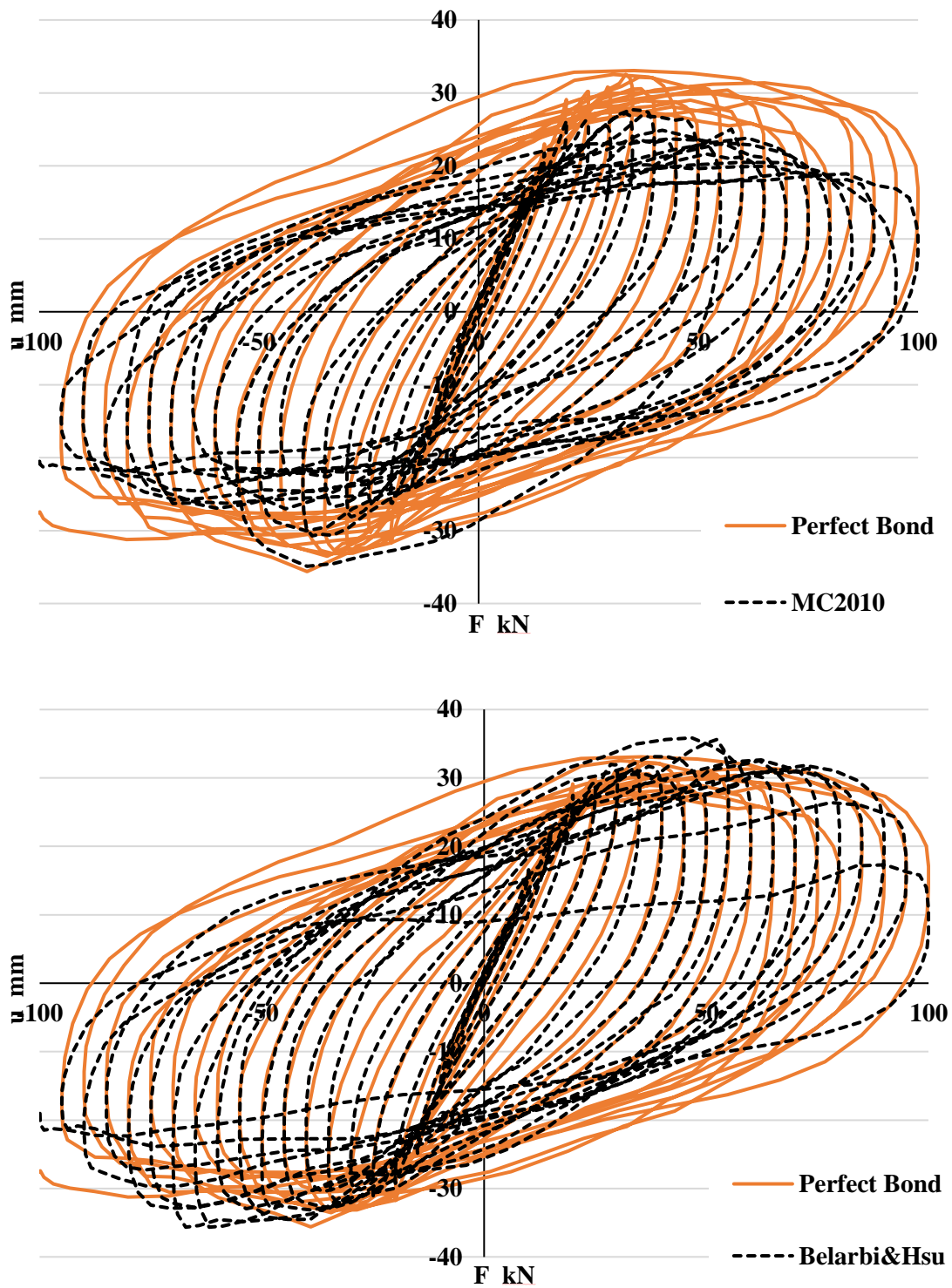
Σχήμα 4.52: Μοντέλα χάλυβα οπλισμού που εξετάστηκαν



Σχήμα 4.53: Αναλυτική διερεύνηση των μοντέλων χάλυβα οπλισμού που επιλέχθηκαν (Μονοτονική Φόρτιση)



Σχήμα 4.54: Ανάλυση των μοντέλων του χάλυβα οπλισμού με ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Σχήμα 4.55: Σύγκριση των μοντέλων χάλυβα οπλισμού που επιλέχθηκαν (Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση)



## 4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

### 4.5.1 NSM

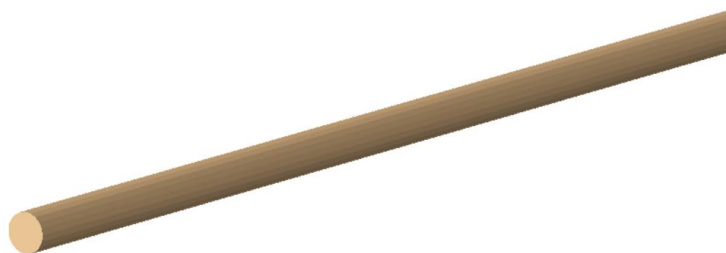
Όλα τα στοιχεία με τα οποία έγινε η ενίσχυση NSM, προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δικτυώματος (σχήμα 4.56 – 4.58). Για τις ράβδους GFRP και ανοξείδωτου χάλυβα, χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς όπως στον εσωτερικό οπλισμό τα μονοδιάστατα στοιχεία (truss-wires). Για τις λωρίδες CFRP, έγινε η παραδοχή ότι κάθε λωρίδα ισοδυναμεί με  $n$  αριθμό στοιχείων δικτυώματος ώστε να έχω ίδια διατομή δηλαδή  $A_{\lambda\omega\rho\iota\delta\alpha\varsigma} = n \cdot A_{\sigma\tau\omicron\iota\chi.\delta\iota\kappa\tau.}$  όπου  $n=4$  και  $A_{\sigma\tau\omicron\iota\chi.\delta\iota\kappa\tau.} = 8 \text{ mm}^2$  ( $d_{eq}=3.195\text{mm}$ ). Επίσης η διάταξη τους έγινε με απόσταση τέτοια ώστε να προσομοιώνεται η μεγάλη διάσταση της λωρίδας  $b=16 \text{ mm}$  (σχήμα 4.56). Η διακριτοποίηση συμβαδίζει με την αντίστοιχη των ράβδων χάλυβα οπλισμού (T3D2) ενώ η σύνδεση του οπλισμού NSM με το υλικό πλήρωσης (ρητίνη) θεωρήθηκε τέλεια (embedded).



Σχήμα 4.56: Προσομοίωση λωρίδας CFRP με 4 στοιχεία δικτυώματος ( $b=16\text{mm}$ )



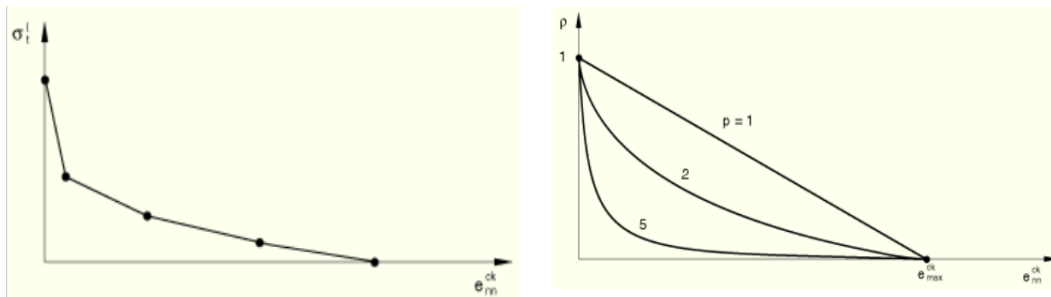
Σχήμα 4.57: Προσομοίωση ράβδου GFRP με στοιχείο δικτυώματος ( $\Phi 8$ )



Σχήμα 4.58: Προσομοίωση ράβδου ανοξείδωτου χάλυβα με στοιχείο δικτυώματος ( $\Phi 12$ )

Τα υλικά των CFRP και GFRP, θεωρούνται γραμμικώς ελαστικά μέχρι την ψαθυρή αστοχία τους όπου έχουμε πλήρη μηδενισμό της φέρουσας ικανότητας. Καθώς όμως, κάτι τέτοιο στο ABAQUS συνεπάγεται μηδενικές βλάβες και αστοχία και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η συνηθέστερη μορφή αστοχίας ήταν η θραύση του επιπλέον οπλισμού (NSM), χρησιμοποιήθηκε το brittle cracking μοντέλο ώστε να προβλεφθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η απομείωση της ικανότητας λόγω θραύσης. Το brittle cracking, βασίζεται στο κριτήριο Rankine, σύμφωνα με το οποίο αστοχία επέρχεται μόλις ξεπεραστεί μία συγκεκριμένη τιμή κάποιας παραμέτρου (στην προκειμένη περίπτωση της οριακής τάσης του υλικού). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό λοιπόν, θεωρείται πως η αστοχία καθορίζεται αποκλειστικά από την εφελκυστική αντοχή του υλικού και συμβαίνει λόγω ρηγμάτωσης. Η συμπεριφορά σε επίπεδο θλίψης θεωρείται ελαστική σε όλη τη διάρκεια ανάλυσης, ακόμα και στην περίπτωση πλήρους αστοχίας του στοιχείου. Επομένως, αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μέσω του προγράμματος ενώ αντίστοιχη μείωση της φέρουσας ικανότητας δεν θα συνυπολογιστεί στο τελικό διάγραμμα F-d. Επομένως, μετά από δοκιμές, έγινε απομείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 17% στο CFRP και κατά 50% στο GFRP (αν και η διαφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν μικρή) προκειμένου να μειωθεί η μέγιστη δυνατή τάση αντοχής σε θλίψη. Επιπλέον, ως προς τον εφελκυσμό, έγιναν δύο δοκιμές (σχήματα 5.25 και 5.27). Η μία έγινε με τις αρχικές δεδομένες ιδιότητες των υλικών και η άλλη έγινε με τις ιδιότητες απομειωμένες σύμφωνα με τις μετρήσεις του πειράματος για τις τελικές παραμορφώσεις του NSM ( $\epsilon_{eff}$ ) με το brittle cracking.

Για το brittle cracking απαιτείται η εισαγωγή τιμών για τις εξής παραμέτρους (εισαγωγή στοιχείων με την επιλογή «strain») (σχήμα 4.59):  $\sigma_t^I$ ,  $\epsilon_{nn}^{ck}$ , δηλαδή η τάση και η παραμόρφωση ρηγμάτωσης αντίστοιχα (ή την  $G_f^I$  δηλαδή την ενέργεια θράυσης Mode I),  $e$  και  $p$ , δηλαδή παραμόρφωση και συντελεστής για την υπολογισμό της ρηγματωμένης διατμητικής δυσκαμψίας σύμφωνα με τον νόμο Power Law των Rots και Blaauwendraad (1989) και την ενέργεια θραύσης ModeII, (σχήμα 4.59 και 4.60) (στη συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή τα στοιχεία δεν καταπονούνται από διατμητικές εντάσεις, χρησιμοποιήθηκε αντιπροσωπευτική τιμή  $e=10^6$  και  $p=1$ ) ( $p$  συντελεστής διατμητικής κράτυνσης)  $(\epsilon_{nn}^{ck})_f$ , δηλαδή η παραμόρφωση θραύσης-αστοχίας. Διευκρινίζεται πως λόγω στοιχείων δικτύωματος (1D) είναι δυνατή η δημιουργία ρωγμών μόνο σε μία διεύθυνση («unidirectional» σχήμα 4.60)

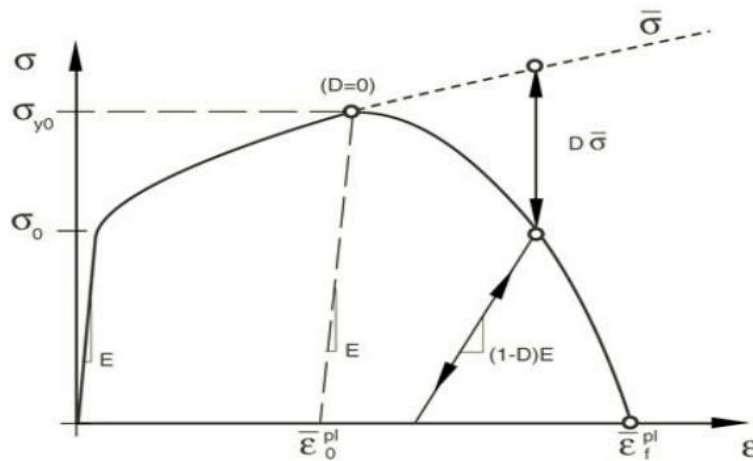


Σχήμα 4.59: Μοντέλο brittle cracking: συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση (αριστερά) και στην διάτμηση (δεξιά)

Brittle Cracking		Brittle Failure		Brittle Shear	
Type:	Strain	Failure criteria:	Unidirectional	Type:	Power Law
<input type="checkbox"/>	Use temperature-dependent data	<input type="checkbox"/>	Use temperature-dependent data	<input type="checkbox"/>	Use temperature-dependent data
Number of field variables:	0	Number of field variables:	0	Number of field variables:	0
Data		Data		Data	
	Direct stress after cracking	Direct cracking strain	Direct cracking failure strain or displacement	e	p
1	1065	0	0.00144	1	1000000
2	0	0.00144			

Σχήμα 4.60: Εισαγωγή δεδομένων για το brittle cracking model στο ABAQUS/CAE

Για το υλικό του ανοξείδωτου χάλυβα χρησιμοποιήθηκε το ductile damage μοντέλο (σχήμα 4.61), για τον ορισμό της συμπεριφοράς του χάλυβα κατά τον μονοαξονικό εφελκυσμό και την δημιουργία βλάβης έως και την τελική αστοχία. Απαιτούνται ο ορισμός του ελαστικού κλάδου (προ διαρροής), ο μετελαστικός-πλαστικός κλάδος μετά την διαρροή και έως το όριο θραύσης καθώς και για την πλαστική αστοχία, η παραμόρφωση θραύσης και το τελικό σημείο (rupture) είτε μέσω της ενέργειας θραύσης είτε μέσω μέγιστης μετατόπισης αστοχίας. Επίσης, απαιτείται η τάση τριαξονικότητας καθώς και η αλλαγή με τον χρόνο της τάσης (rate). Εφόσον το υλικό ορίζεται από μία τιμή τάσης θραύσης τότε τα δύο τελευταία συνήθως λαμβάνονται 0 (σχήμα 4.62). Όπως και στα προηγούμενα υλικά για τις ενισχύσεις NSM, έτσι και εδώ, θα υιοθετηθούν οι τιμές, για τις παραμέτρους, που μετρήθηκαν από το πείραμα κατά την αστοχία των δοκιμίων. Παρόλο που στο συγκεκριμένο δοκίμιο η αστοχία επέρχεται λόγω λυγισμού, καθώς αυτή η αστοχία δεν είναι δυνατό να προσομοιωθεί με τις παραδοχές και απλοποιήσεις που έχουν ληφθεί, το μοντέλο του ductile damage έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η αστοχία παρατηρήθηκε λίγο μετά από την αστοχία στο πείραμα.



Σχήμα 4.61: Ductile damage model με ενσωματωμένη την βλάβη  $D$  του χάλυβα

Ductile Damage

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data			
	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
1	0.1915	0	0

Damage Evolution

Type: Energy

Softening: Exponential

Degradation: Maximum

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data	
	Fracture Energy
1	860

Σχήμα 4.62: Εισαγωγή δεδομένων για το ductile damage model στο ABAQUS/CAE  
Τέλος, η ρητίνη θεωρήθηκε γραμμικώς ελαστικό υλικό καθώς δεν παρατηρήθηκε αστοχία στο ίδιο το υλικό για την διεπιφάνεια μεταξύ ρητίνης και σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε πλήρης σύνδεση (tie constraint) καθώς δεν παρατηρήθηκε τέτοιας μορφής αστοχία σε κανένα από τα δοκίμια.

#### 4.5.2 TRM

Για την ενίσχυση με TRM, δημιουργήθηκαν 2 ξεχωριστά υλικά για τα 2 τμήματα της ενίσχυσης (ίνες άνθρακα-textile και ανόργανη μήτρα-mortar). Στην βιβλιογραφία, αναφέρονται διάφοροι τρόποι προσομοίωσης με επίπεδα λεπτομέρειας της μοντελοποίησης συμβάλλοντας στην αύξηση της ακρίβειας αλλά και του υπολογιστικού κόστους ταυτόχρονα. Για τις ανάγκες της εργασίας, η ανόργανη μήτρα προσομοιώθηκε ως συμβατικό κέλυφος (shell) ενώ για τις ίνες, χρησιμοποιήθηκε η

δυνατότητα που προσφέρει το ABAQUS, σε στοιχεία κελύφους αποκλειστικά, για εισαγωγή στρώσεων οπλισμού (rebar layers) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.63. Για το υλικό της μήτρας, ορίστηκε το μοντέλο CDP όπως ακριβώς και για το σκυρόδεμα, χρησιμοποιώντας τις αρχικές επιλογές του ABAQUS για τις τιμές των παραμέτρων ενώ για τις ίνες από άνθρακα θεωρήθηκε ελαστικό υλικό με ψαθυρή αστοχία σύμφωνα με τα δεδομένα του πειράματος. Για την διακριτοποίηση του κελύφους, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία S4R, 4-κομβικά στοιχεία κελύφους με μειωμένη ολοκλήρωση ενώ εφόσον δεν παρατηρήθηκε αστοχία λόγω αποκόλλησης, ορίστηκε η σύνδεση υποστρώματος-TRM μέσω πλήρους σύνδεσης-tie constraint.

Rebar Layers

Rebar geometry:  Constant  Angular  Lift equation-based

Layer Name	Material	Area per Bar	Spacing	Orientation Angle	Position
textile_-3_0	textile	0.913462	10	0	-3
textile_-1_0	textile	0.913462	10	0	-1
textile_1_0	textile	0.913462	10	0	1
textile_3_0	textile	0.913462	10	0	3
textile_-3_90	textile	0.934167	10	90	-3
textile_-1_90	textile	0.934167	10	90	-1
textile_1_90	textile	0.934167	10	90	1
textile_3_90	textile	0.934167	10	90	3

Σχήμα 4.63: Rebar Layers σε στοιχείο κελύφους-shell για 4 στρώσεις ινοπλέγματος

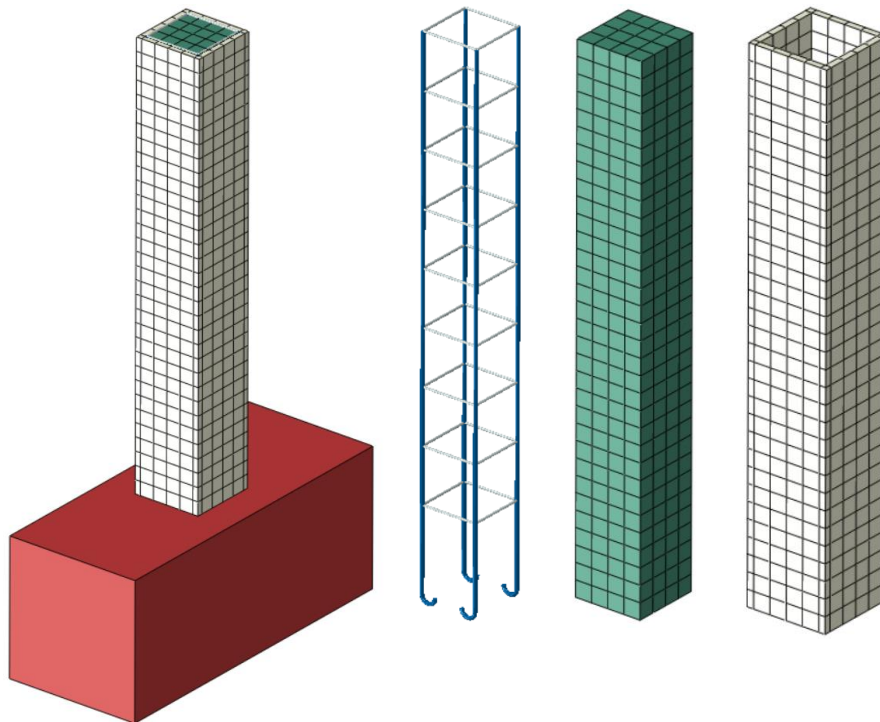


## 5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (Model Validation)

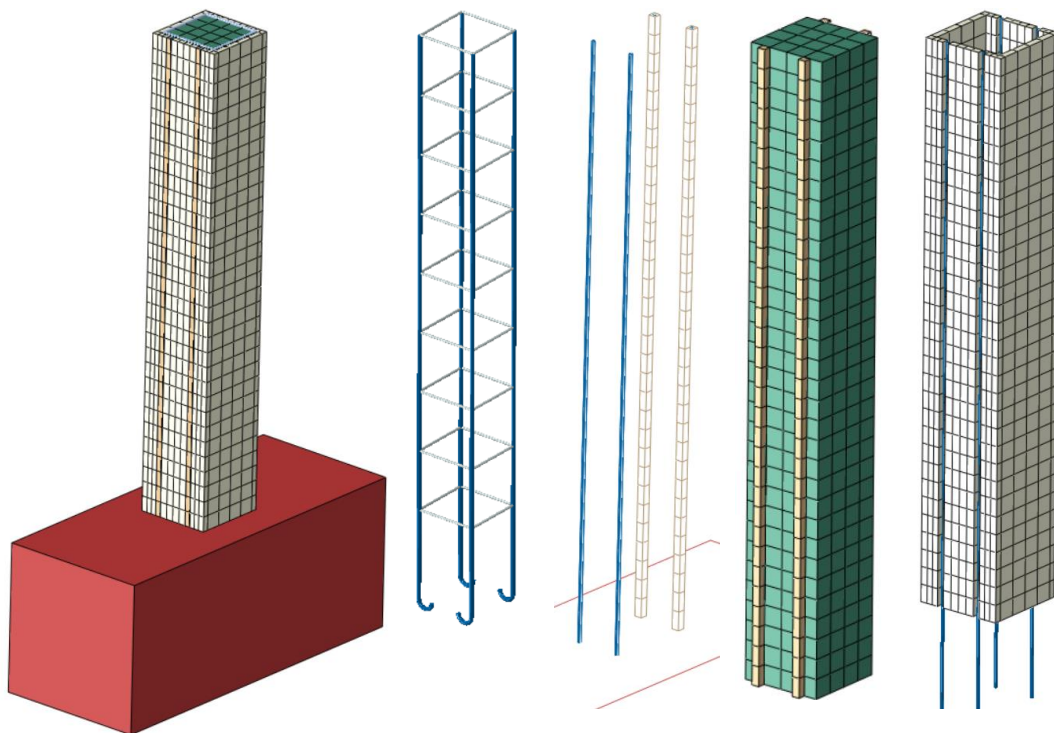
Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα οποιοδήποτε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να αξιολογηθεί η προσέγγιση που παρέχει ως προς την πραγματικότητα και αυτό γίνεται με σύγκριση των αποτελεσμάτων κάτω από όσο το δυνατόν παραπλήσιες συνθήκες. Έτσι και στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, για έναν αριθμό δοκιμίων πραγματοποιήθηκε ανάλυση με ανακυκλιζόμενη φόρτιση με μετακίνηση (drift) στόχο 100mm (6.25%) ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα ή όχι του μοντέλου που δημιουργήθηκε. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραδοχές και τις αβεβαιότητες, αποκλίσεις τιμών της τάξης έως και 10%-15% θεωρήθηκαν επιτρεπτές.

Η ανάλυση αφορούσε στα δοκίμια: Control (μη ενισχυμένο), για τις περιπτώσεις με περίσφιξη ή όχι, G (ενίσχυση με GFRP ράβδους), C\_Par και C\_Per(ενίσχυση με λωρίδες CFRP για κάμψη είτε περί τον ισχυρό είτε τον ασθενή άξονα της λωρίδας) καθώς και S\_R (ενίσχυση με ράβδους από ανοξείδωτο χάλυβα). Επίσης, αναλύθηκαν και τα δοκίμια Control\_J, C\_Par\_J και S\_R\_J τα οποία είχαν ενισχυθεί με TRM. Παρουσιάζονται λοιπόν:

- ✓ η μορφή των δοκιμίων από το περιβάλλον του ABAQUS/CAE(σχήμα 5.1-5.8),
- ✓ οι καμπύλες της κινητικής (ALLKE) και της εσωτερικής ενέργειας-ενέργειας παραμόρφωσης (ALLIE) για να διαπιστωθεί πως εξασφαλίστηκε οιονοί-στατική επιβολή των φορτίων ( $ALLKE \leq 5\% ALLIE$ ) στο δοκίμιο Control (σχήμα 5.11 και 5.13),
- ✓ η υστερητική καμπύλη Force (kN) – drift (%) σε σύγκριση με την περιβάλλουσα της αντίστοιχης καμπύλης από το πείραμα και
- ✓ η προσεγγιστική μορφή αστοχίας όπως παρουσιάζεται από το λογισμικό σε σύγκριση με τις αστοχίες του πραγματικού πειράματος (εφόσον υπήρχαν) για το σκυρόδεμα, τους οπλισμούς χάλυβα και τις εκάστοτε ενισχύσεις (DAMAGEC, DAMAGET, PEEQ, PEEQT, LE, PE, STATUS, RBFOR) (σχήματα 5.17 – 5.39)
- ✓ Στον πίνακα 5.1: ο συνολικός χρόνος ανάλυσης (s) από το πρόγραμμα, η μέση απόκλιση (%) για την F καθώς και η τιμή και η απόκλιση (%) της Fmax για τις δύο διευθύνσεις, για διαπίστωση της εγκυρότητας του μοντέλου.

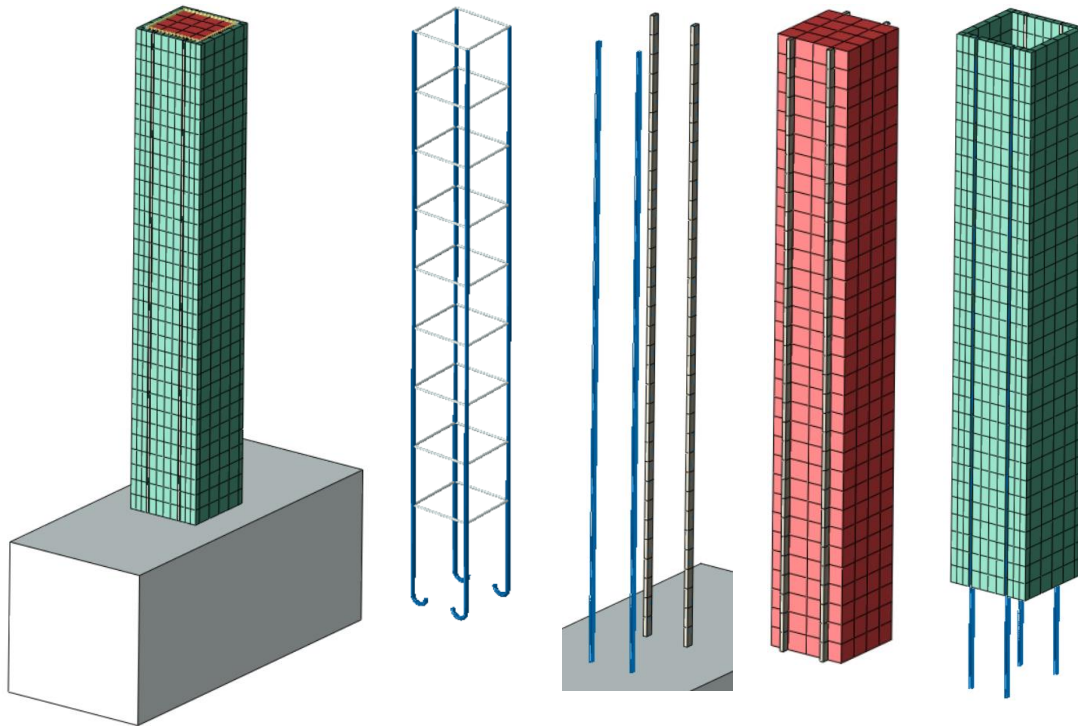


Σχήμα 5.1: Δοκίμιο Control – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – Πυρήνας σκυροδέματος – Επικάλυψη σκυροδέματος

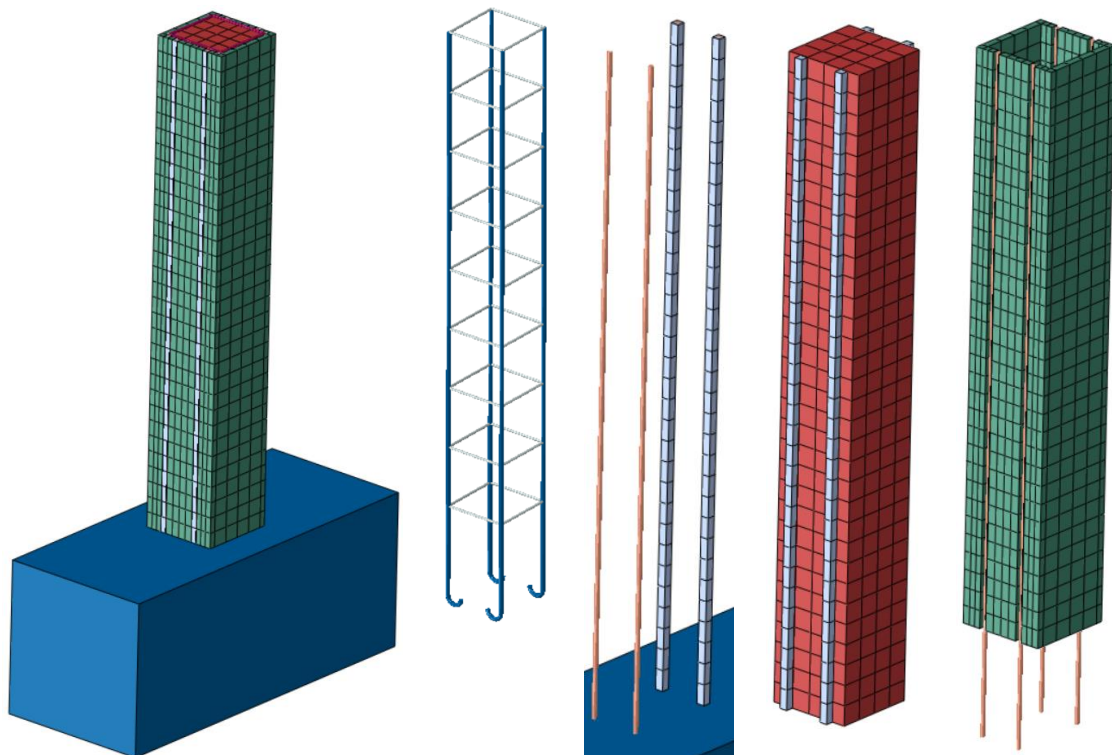


Σχήμα 5.2: Δοκίμιο G – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – NSM/GFRP ράβδοι - Πυρήνας σκυροδέματος με τα τμήματα ρητίνης– Επικάλυψη σκυροδέματος με αυλακώσεις και οπλισμούς GFRP

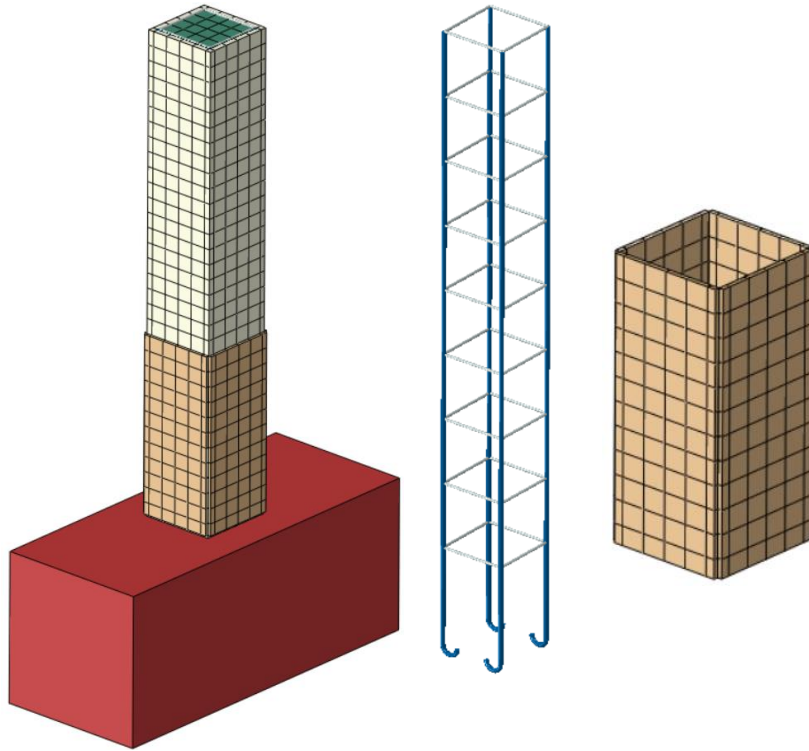




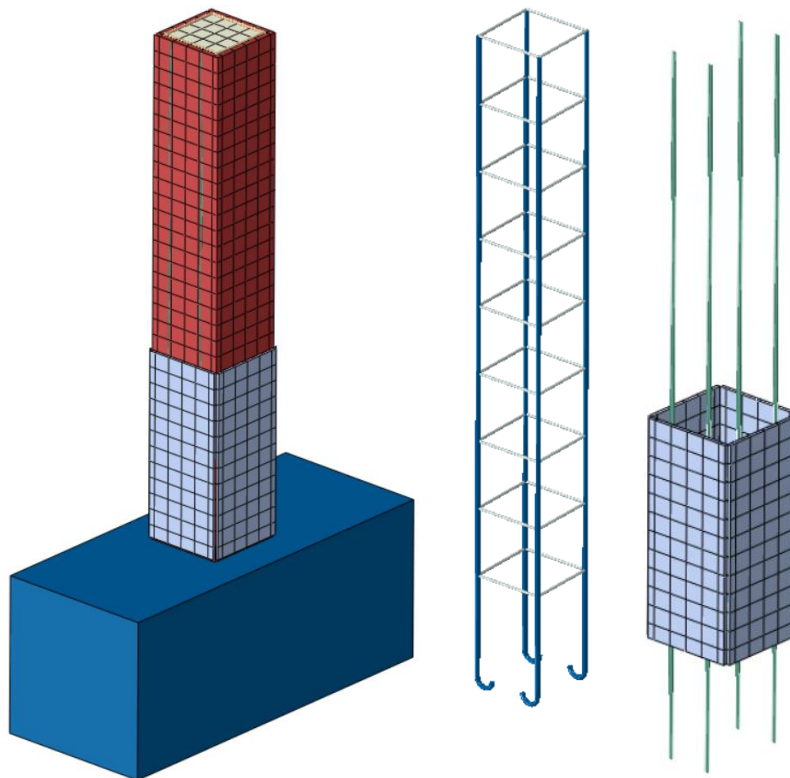
Σχήμα 5.3: Δοκίμιο C\_Per – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – NSM-CFRP λωρίδες και ρητίνη – Πυρήνας σκυροδέματος με τα τμήματα ρητίνης– Επικάλυψη σκυροδέματος με αυλακώσεις και οπλισμούς CFRP



Σχήμα 5.4: Δοκίμιο S\_R – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – NSM-ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα και ρητίνη – Πυρήνας σκυροδέματος με τα τμήματα ρητίνης– Επικάλυψη σκυροδέματος με αυλακώσεις και οπλισμούς από ανοξείδωτο χάλυβα

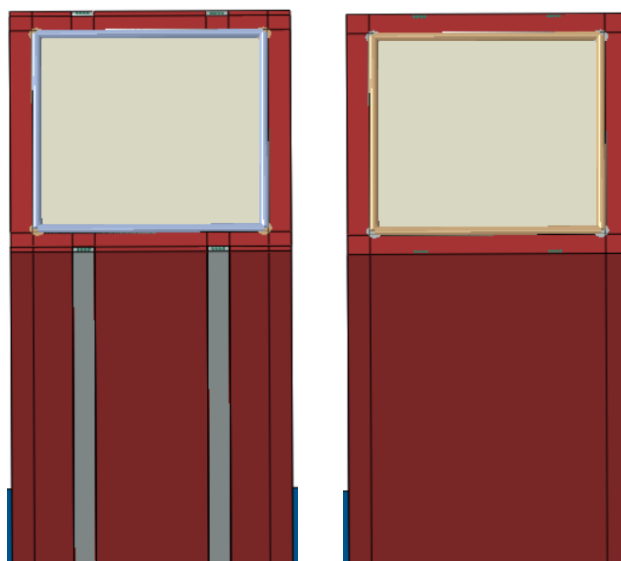


Σχήμα 5.5: Δοκίμιο Control\_J – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – Ενίσχυση TRM

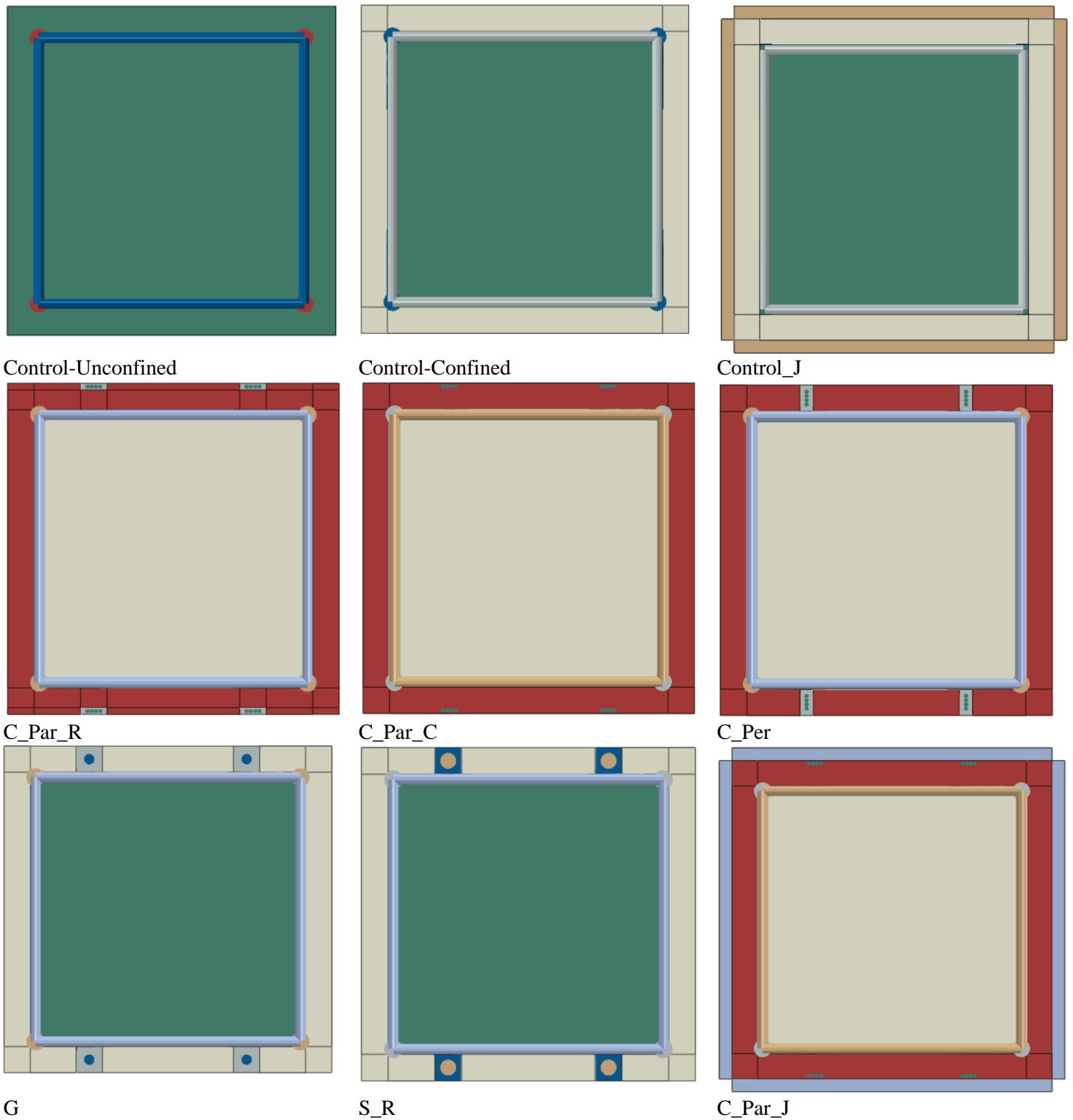


Σχήμα 5.6: Δοκίμιο C\_Par\_J – Διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί – Ενίσχυση NSM CFRP λωρίδες / TRM

Όσον αφορά στο δοκίμιο C\_Par, λόγω της συνθήκης που επιχειρήθηκε να εξεταστεί (δηλαδή κάμψη της λωρίδας περί τον ασθενή άξονα λόγω τοποθέτησης της λωρίδας έτσι ώστε να είναι δυνατή η ενίσχυση υποστυλωμάτων στα οποία δεν διατίθεται τουλάχιστον 20mm επικάλυψης), έγινε συγκριτική ανάλυση ανάμεσα σε δύο μοντέλα, των οποίων η ειδοποιός διαφορά ήταν η ύπαρξη (C\_Par\_R) ή όχι (C\_Par\_C) της ρητίνης, όπου ως R και C, Resin και Concrete αντίστοιχα, υπονοείται το υλικό μέσα στο οποίο ενσωματώθηκαν οι λωρίδες CFRP. Τα δύο μοντέλα συγκρίθηκαν μεταξύ τους και με την περιβάλλουσα του πειράματος. Αυτό έγινε καθώς λόγω των μικρών διαστάσεων και της συγκεκριμένης διάταξης, αφενός η επίδραση της ρητίνης θεωρήθηκε αμελητέα στο πείραμα (πολύ μικρή ροπή αδράνειας) και αφετέρου συνέβαλε στην σημαντική αύξηση του υπολογιστικού κόστους χωρίς να βελτιώνει αισθητά την ακρίβεια των υπολογισμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.28 (υπενθυμίζεται πως ακόμα και ένα μόνο στοιχείο με αρκετά μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα, αυξάνει σημαντικά τον χρόνο ανάλυσης λόγω αύξησης του  $\Delta t_{stable}$  συνολικά στο μοντέλο). Οι διαφορές στις 2 περιπτώσεις είναι αμελητέες και άρα η ακρίβεια του απλοποιημένου προσομοιώματος θεωρείται επαρκής, ειδικά εάν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι η αστοχία στο πείραμα επήλθε λόγω αποκόλλησης των λωρίδων, κάτι που δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθεί στο πρόγραμμα μέσω των παραδοχών που έχουν υιοθετηθεί. Η θραύση που παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα του λογισμικού συνέβη σε μετατόπιση 60.32 mm δηλαδή 5.28mm μετά την αστοχία αποκόλλησης των λωρίδων (λογικό).



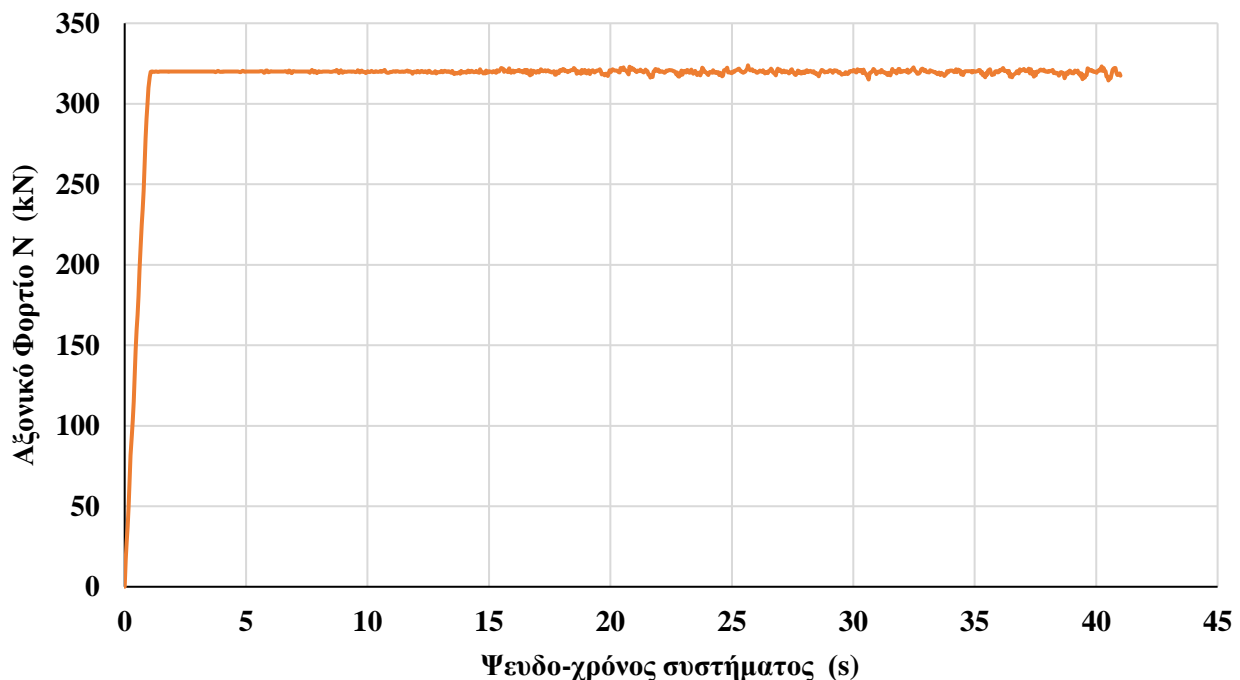
Σχήμα 5.7: Δοκίμιο C\_Par\_R (με τμήματα ρητίνης) και C\_Par\_C (χωρίς ρητίνη)



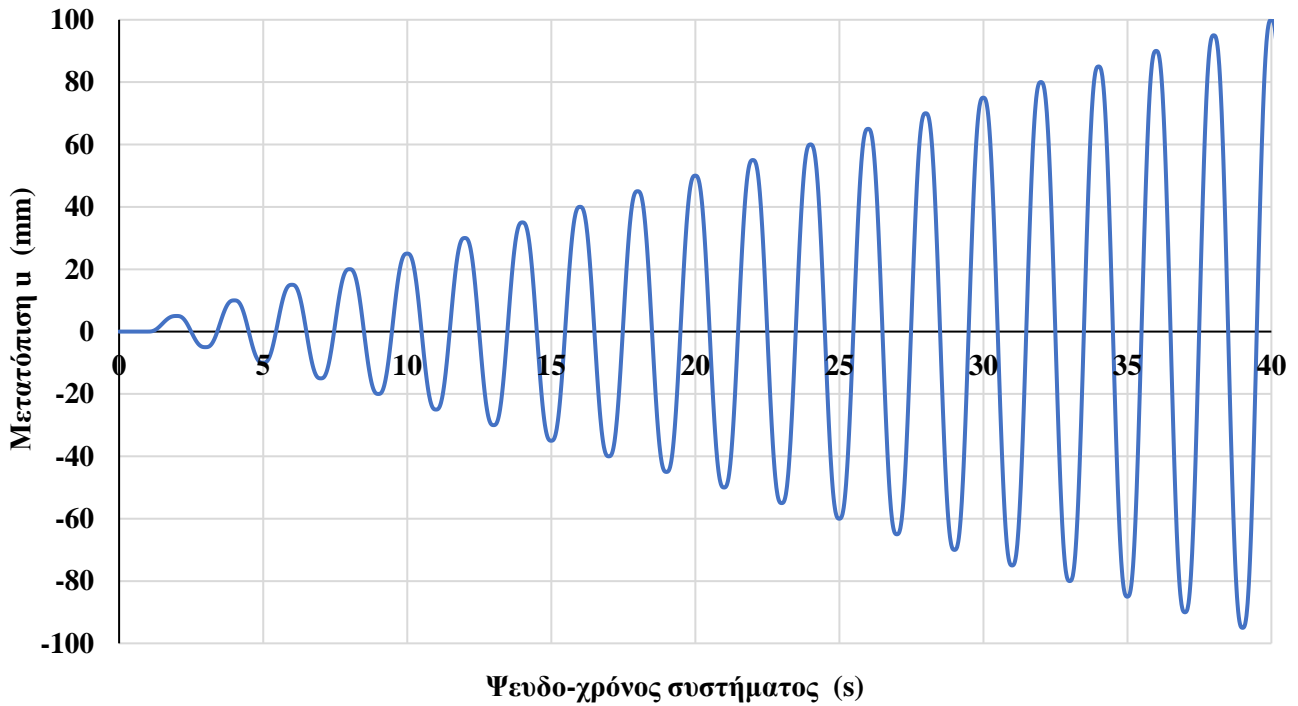
Σχήμα 5.8: Διατομές Δοκιμίων στο περιβάλλον του ABAQUS/CAE

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, η ανάλυση έγινε με την χρήση του του ABAQUS/Explicit με την μέθοδο επιβολής μετακινήσεων, για ανακυκλιζόμενη

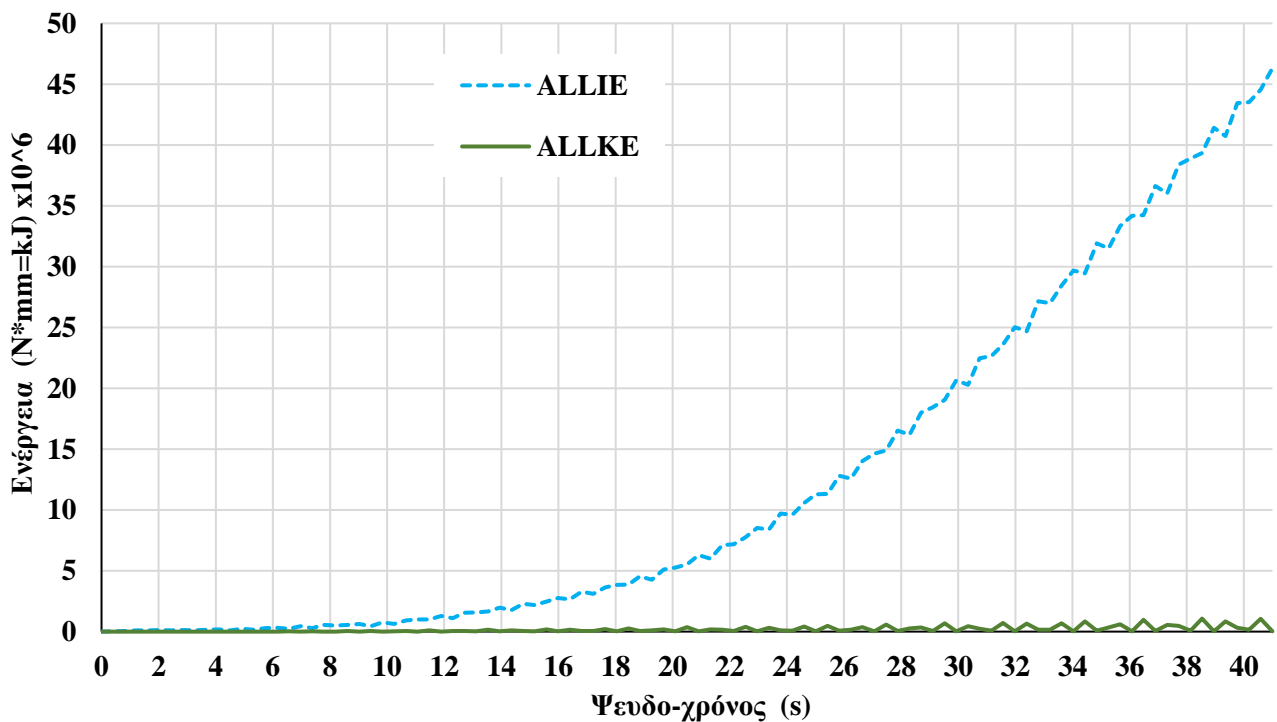
φόρτιση με μετακίνηση στόχο  $u_{\max} = 100$  mm. Χρησιμοποιήθηκε συντελεστής mass scale  $f = 250$  προκειμένου να επιταχυνθεί η ανάλυση πάντα όμως με την προϋπόθεση πως η κινητική ενέργεια του συστήματος δεν ξεπερνούσε το 5% της συνολικής εσωτερικής ενέργειας. Στην οριοθέτηση της κινητικής ενέργειας, επίσης συνέβαλε η χρήση SMOOTH STEP αντί για TABULAR STEP (σχήματα 5.10-5.16) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο συνολικός ψευδο-χρόνος του συστήματος (STEP time) χωρίς να επηρεάζεται και άρα να αλλάζει η μορφή της φόρτισης (οιωνοί στατική  $\rightarrow$  δυναμική) που θα απαιτούσε μείωση του ρυθμού επιβολής των μετακινήσεων. Με την χρήση του SMOOTH STEP AMPLITUDE, επιτυγχάνεται η ίδια ακριβώς επιβολή φορτίων ή/και μετακινήσεων, με την αντίστοιχη του TABULAR AMPLITUDE, με διαφορετική κατανομή του ρυθμού επιβολής κατά την διάρκεια μισού κύκλου φόρτισης. Τέλος, στην αρχή επιβλήθηκε το συνολικό θλιπτικό αξονικό φορτίο  $N_d = 0.20 * A_g * f_{cm} = 320$  kN. Η επιβολή του αξονικού φορτίου προηγήθηκε της επιβολής των μετακινήσεων (στο 1<sup>ο</sup> sec) και παρέμεινε σταθερή έως το πέρας της ανάλυσης (σχήμα 5.9).



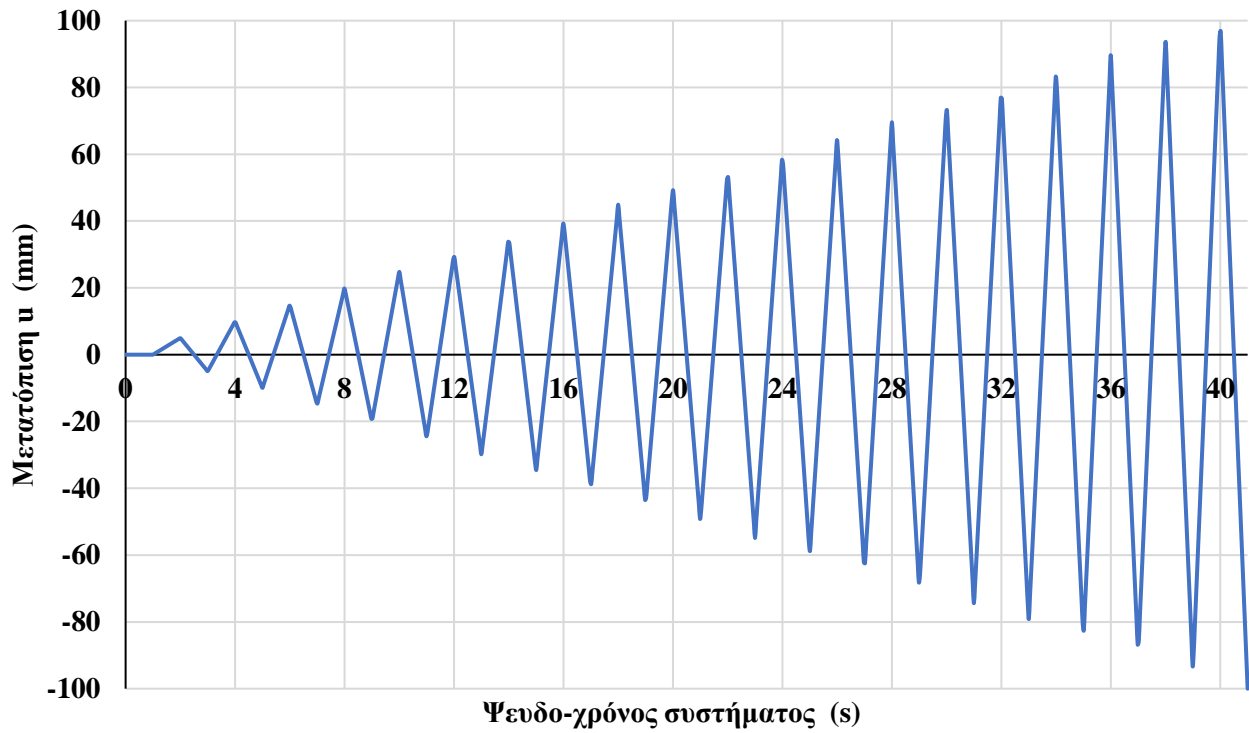
Σχήμα 5.9: Επιβολή θλιπτικού φορτίου  $N_d$



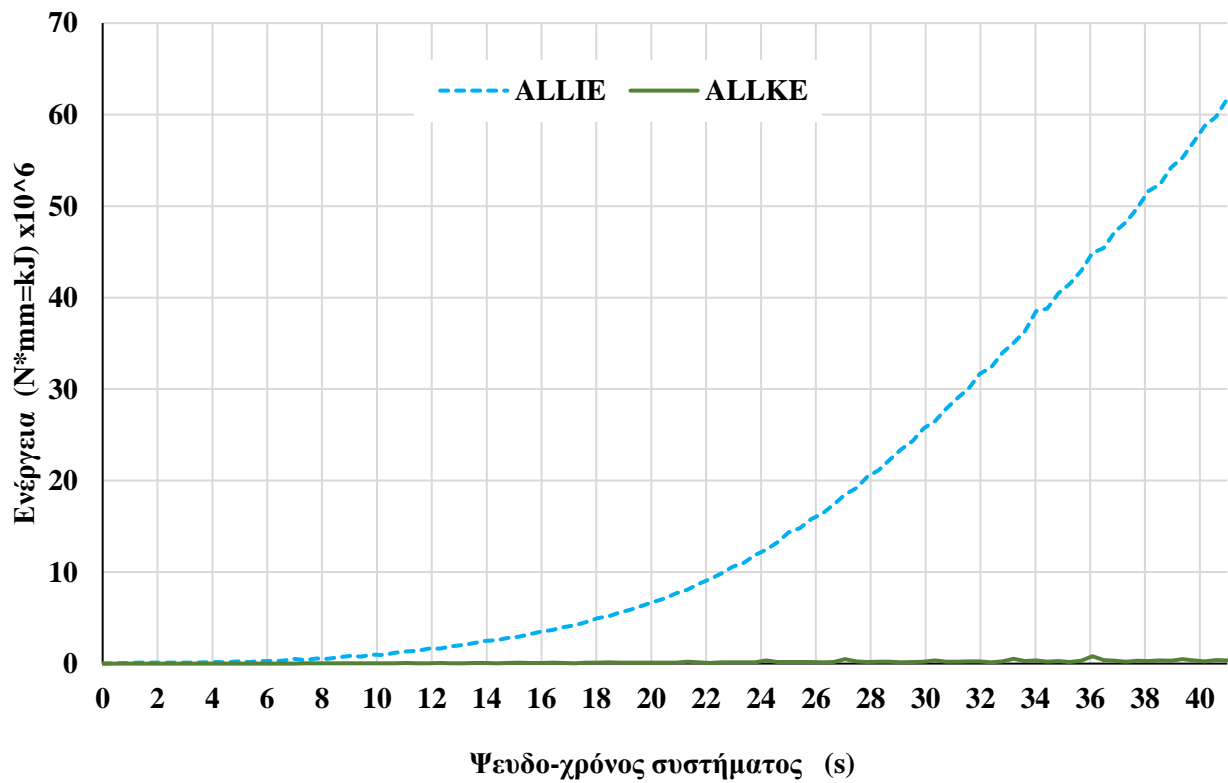
Σχήμα 5.10: Επιβολή μετακινήσεων μέσω SMOOTH STEP amplitude



Σχήμα 5.11: Σχέση Κινητικής (ALLKE) και Εσωτερικής (ALLIE) Ενέργειας με επιβολή μέσω SMOOTH STEP amplitude

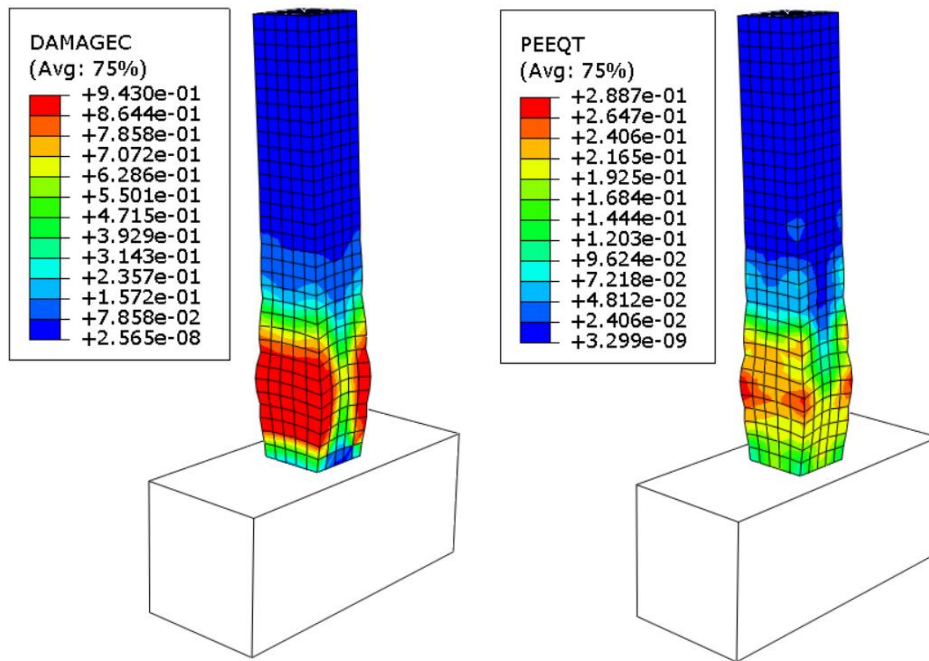


Σχήμα 5.12: Επιβολή μετακινήσεων μέσω TABULAR amplitude

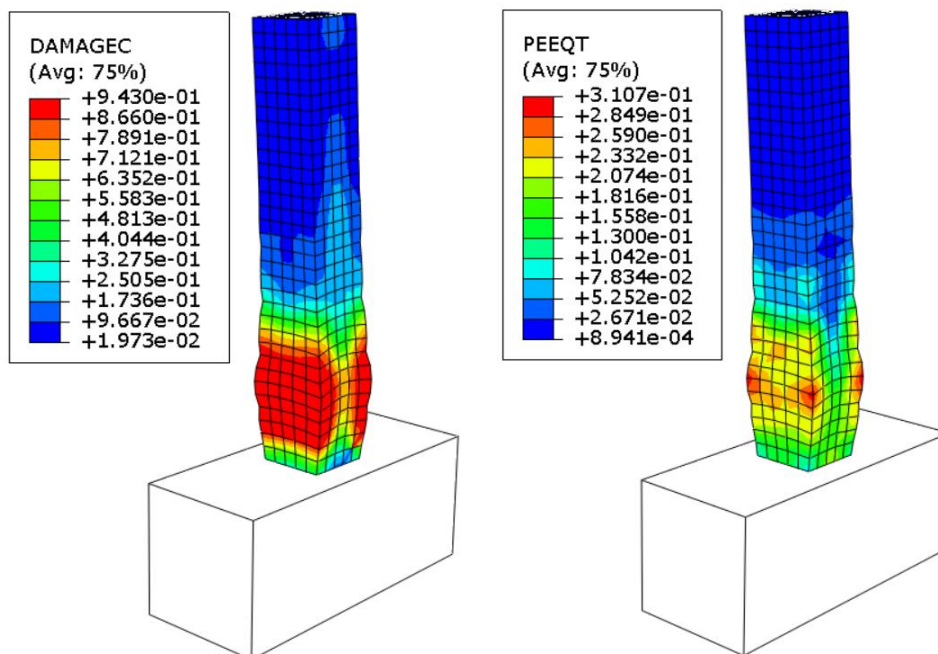


Σχήμα 5.13: Σχέση Κινητικής (ALLKE) και Εσωτερικής (ALLIE) Ενέργειας με επιβολή μέσω TABULAR amplitude



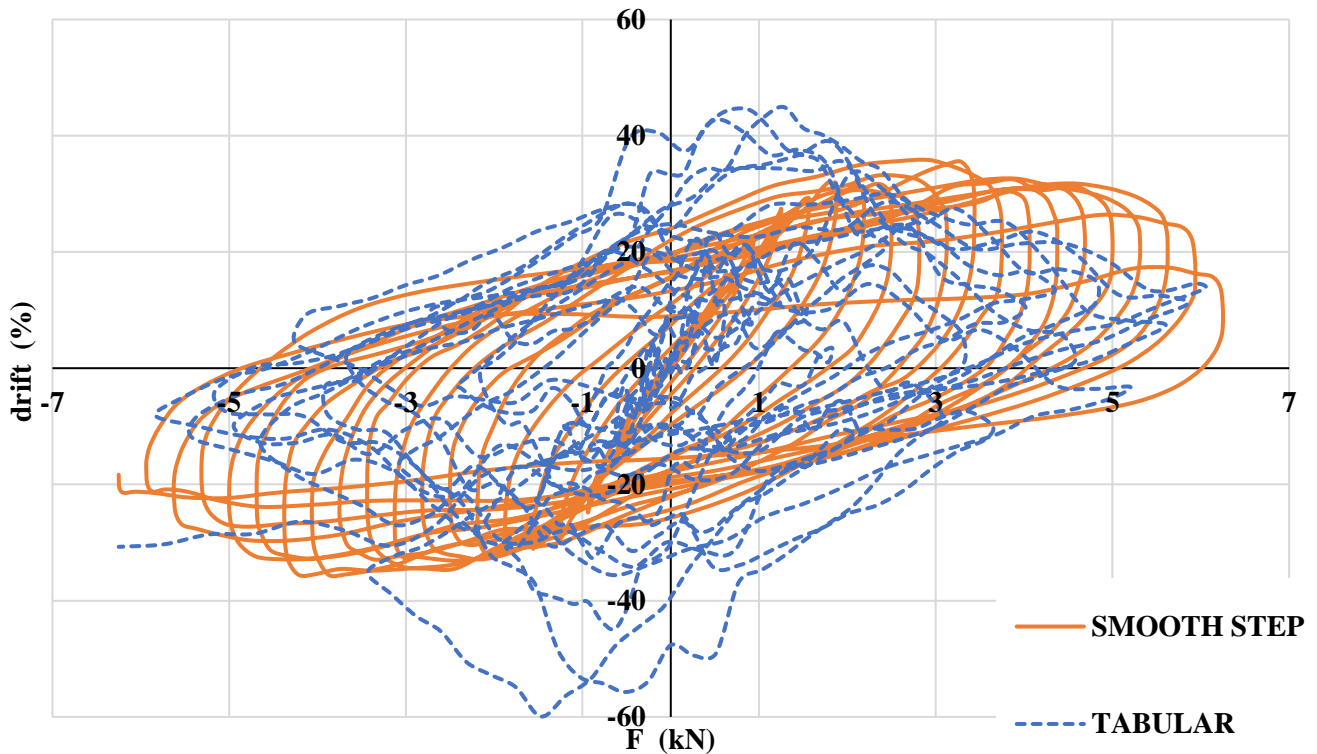


Σχήμα 5.14: Τελική μορφή υποστυλώματος στην μέγιστη μετατόπιση  $u=100\text{mm}$  με επιβολή μέσω SMOOTH STEP amplitude



Σχήμα 5.15: Τελική μορφή υποστυλώματος στην μέγιστη μετατόπιση  $u=100\text{mm}$  με επιβολή μέσω TABULAR amplitude



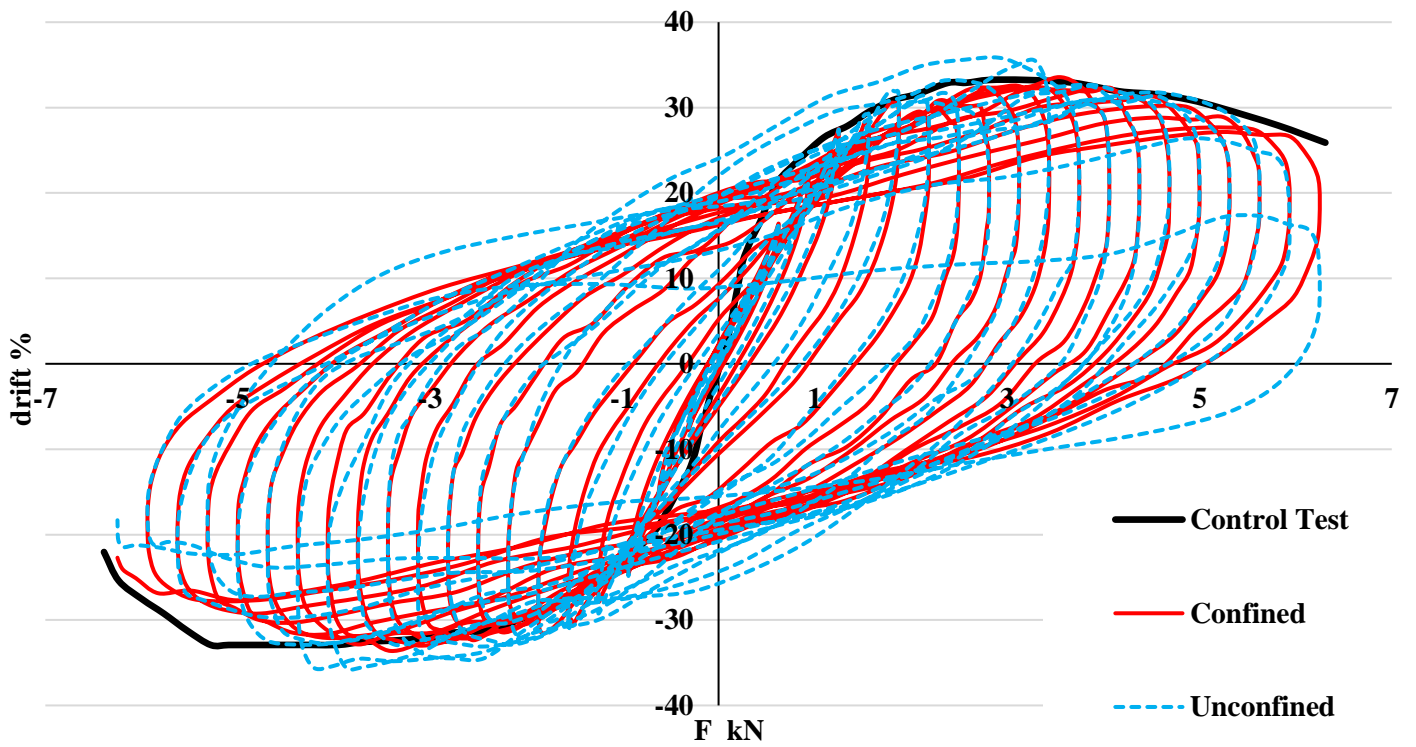


Σχήμα 5.16: SMOOTH STEP AMPLITUDE vs TABULAR AMPLITUDE :  
Υστερητική καμπύλη F (kN) – drift (%)

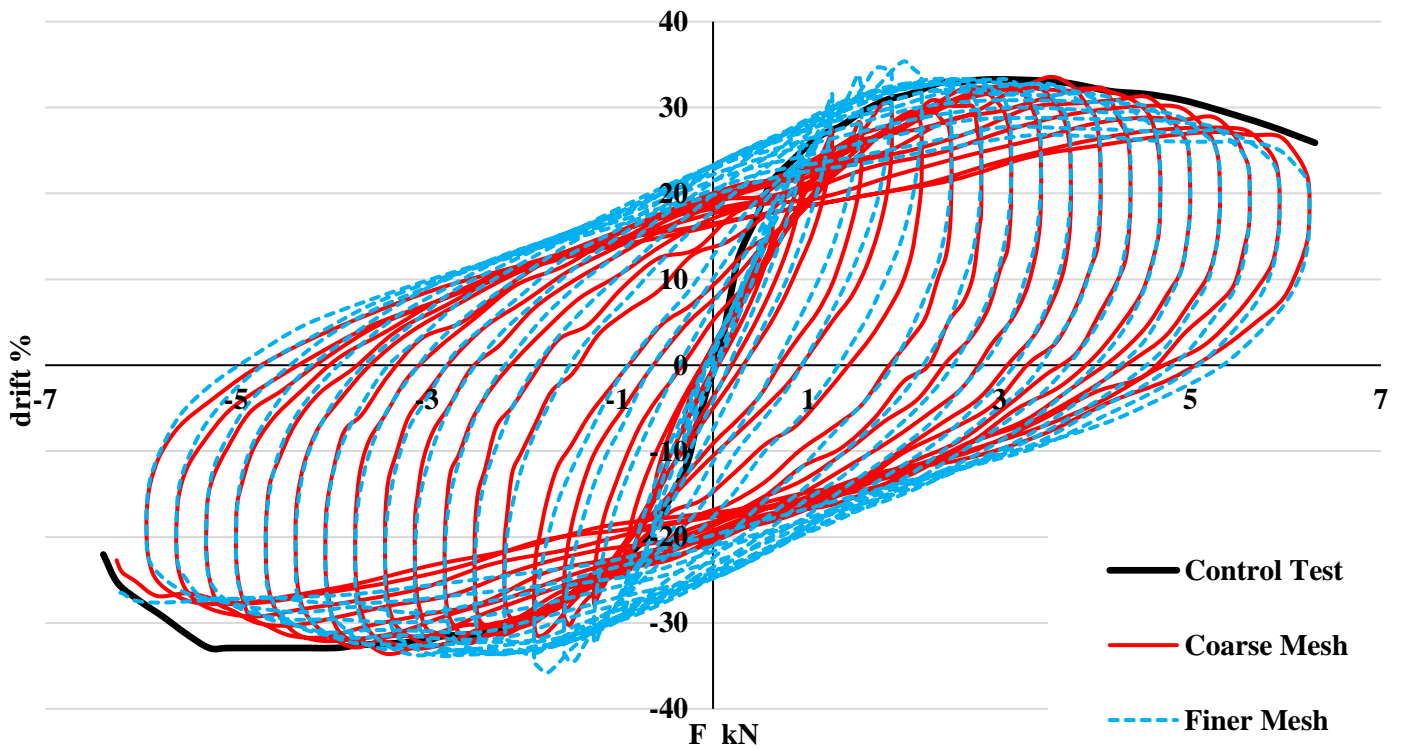
Οι διαφορές, λοιπόν, μεταξύ SMOOTH STEP και TABULAR amplitude είναι μικρές ως προς την σχέση Κινητικής και Εσωτερικής Ενέργειας (και στις 2 περιπτώσεις η φόρτιση θεωρείται οριζοντιοστάτική, σχήματα 5.11 και 5.13) αλλά και την τελική μορφή του υποστυλώματος στην μέγιστη μετατόπιση, όπου στην περίπτωση του TABULAR amplitude εντοπίζονται μικρές περιοχές διαφορετικά καταπονημένες σε σχέση με το υποστυλώμα που φορτίστηκε με SMOOTH STEP amplitude (σχήματα 5.14, 5.15). Όμως, η πολύ μεγάλη διαφορά εντοπίζεται στο τελικό αποτέλεσμα της υστερητικής καμπύλης, όπου γίνεται ξεκάθαρο πως η καμπύλη μέσω φόρτισης με TABULAR amplitude δεν συμβαδίζει σε καμία περίπτωση με την πραγματικότητα. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, επιβάλλεται απομείωση του ρυθμού επιβολής των μετατοπίσεων ώστε να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα, αλλιώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το SMOOTH STEP amplitude, όπως υιοθετήθηκε στην εργασία.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η σύγκριση τους για κάθε δοκίμιο. Οι υστερητικές καμπύλες προέρχονται από την ανάλυση μέσω του ABAQUS, ενώ οι μονοτονικές είναι από το πείραμα.

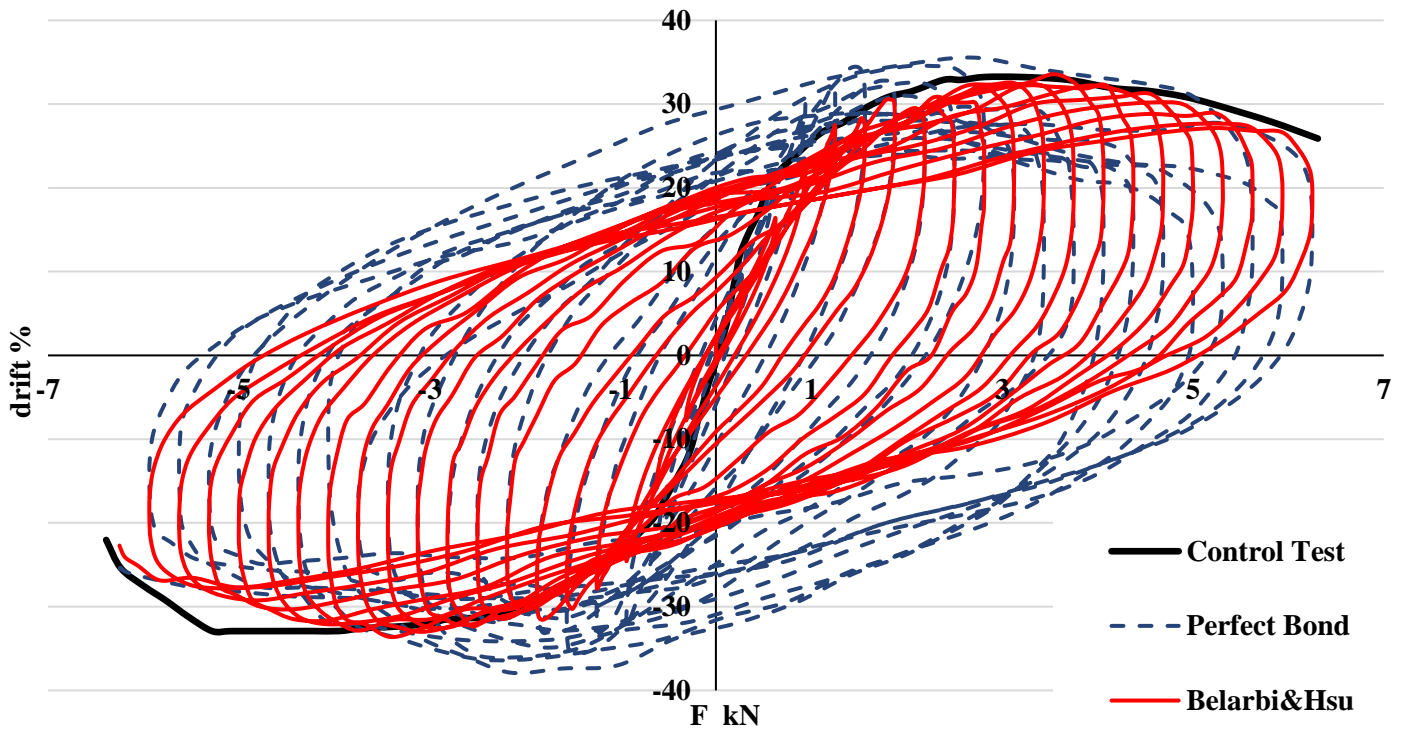
Control (Δοκίμιο χωρίς ενίσχυση)



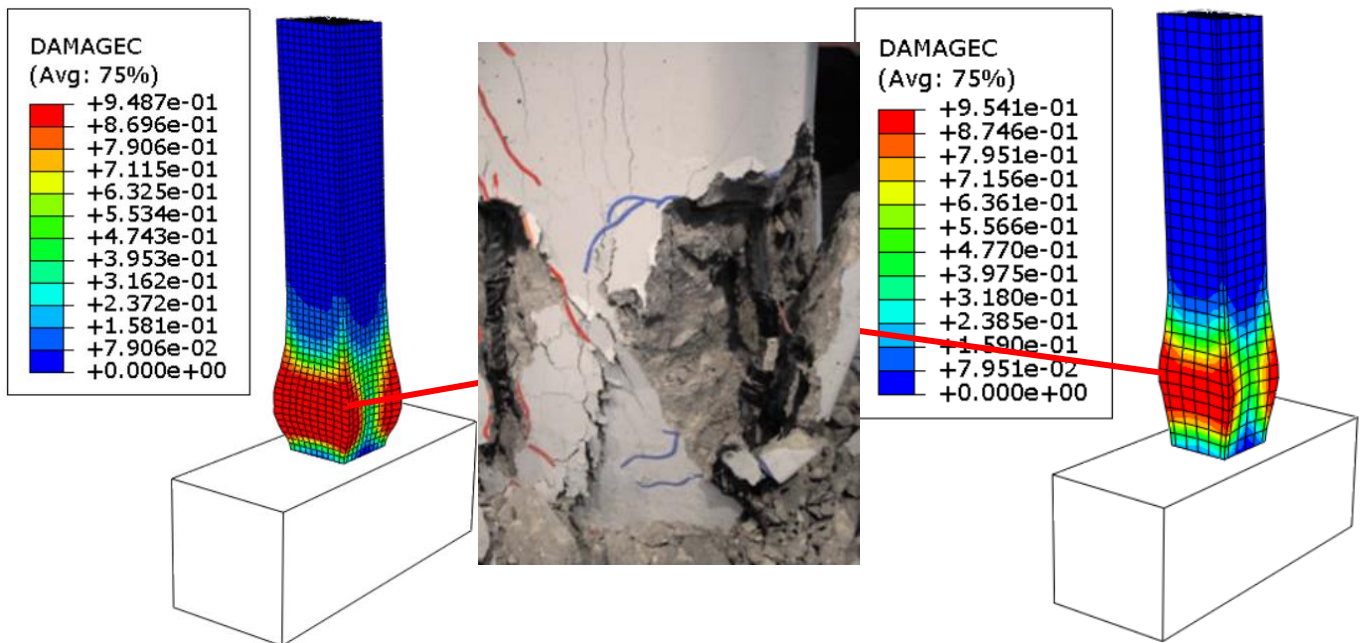
Σχήμα 5.17: Υστερητικές καμπύλες για το Control δοκίμιο με περίσφιγξη ή μη



Σχήμα 5.18: Υστερητικές καμπύλες για το Control δοκίμιο με 2 διαφορετικές διακριτοποιήσεις → ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους

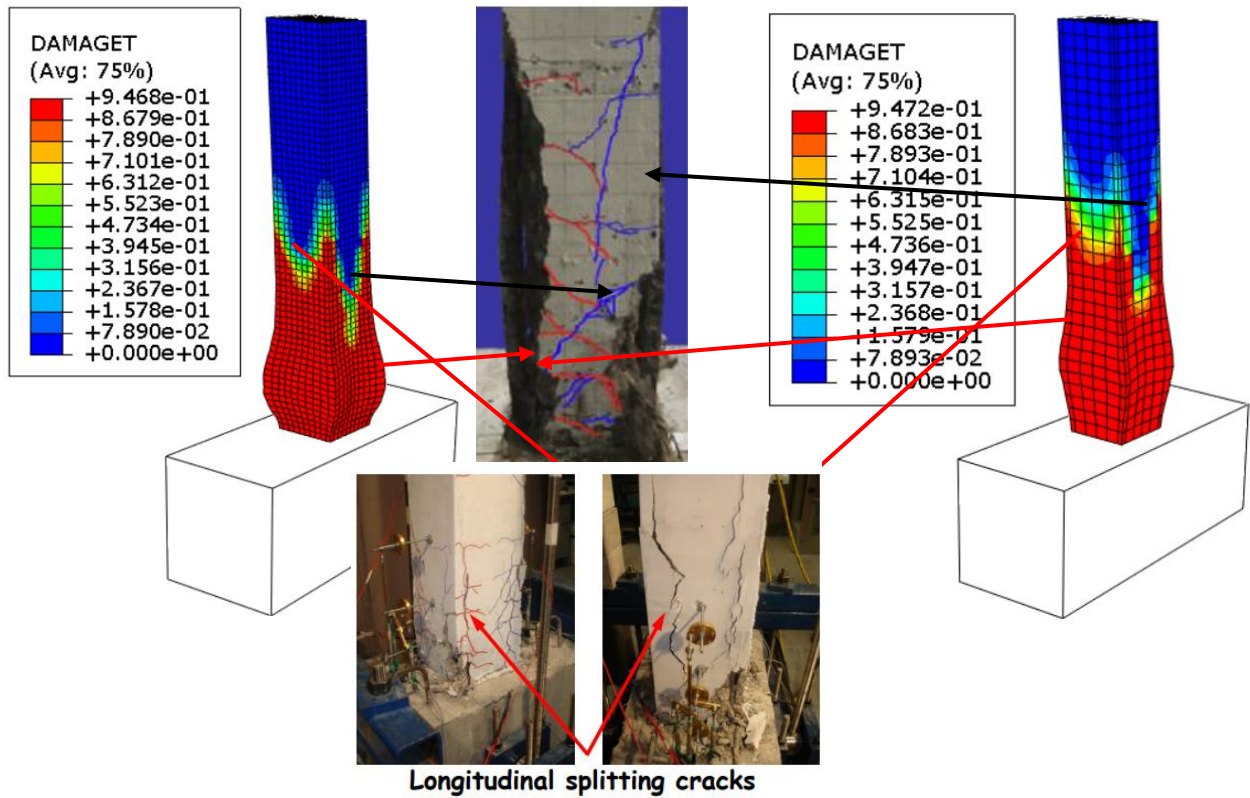


Σχήμα 5.19: Συγκριτικές υστερητικές καμπύλες για το Control δοκίμιο για τέλεια σύνδεση σκυροδέματος - χάλυβα και για τροποποιημένο μοντέλο του χάλυβα σπλισμού κατά Belarbi & Hsu

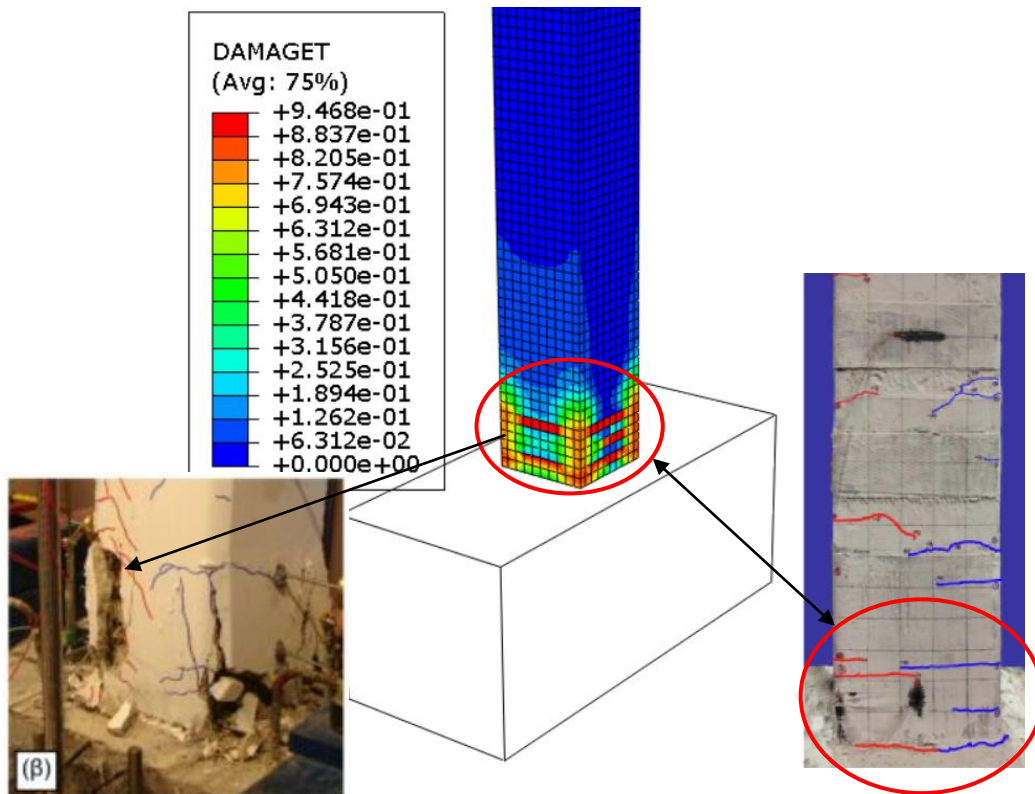


Σχήμα 5.20: Δοκίμιο Control → Αστοχία σε θλίψη → Finer Mesh vs Πείραμα vs Coarse Mesh

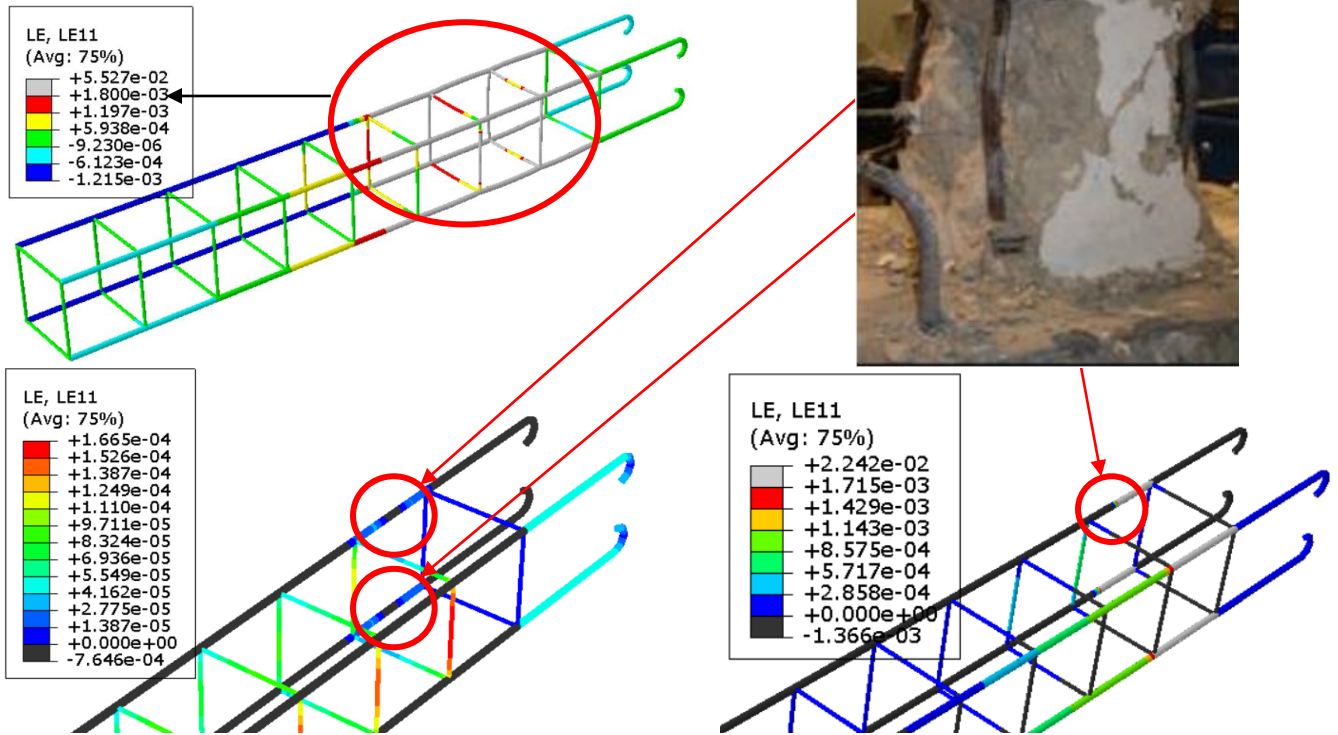




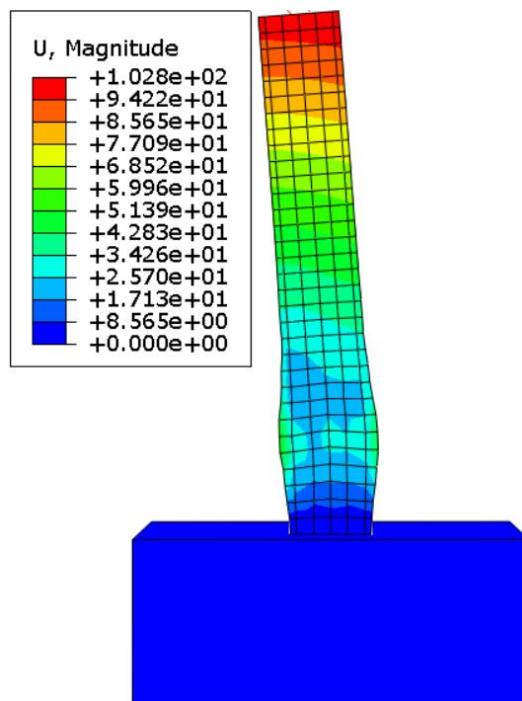
Σχήμα 5.21: Δοκίμιο Control → Αστοχία σε εφελκυσμό → Finer Mesh vs Πείραμα vs Coarse Mesh (Τονίζονται οι ρηγματώσεις και η διόγκωση-αποκόλληση της επικάλυψης)



Σχήμα 5.22: Ρηγματώσεις στις πλευρές και σύνθλιψη στις γωνίες του κάτω τμήματος

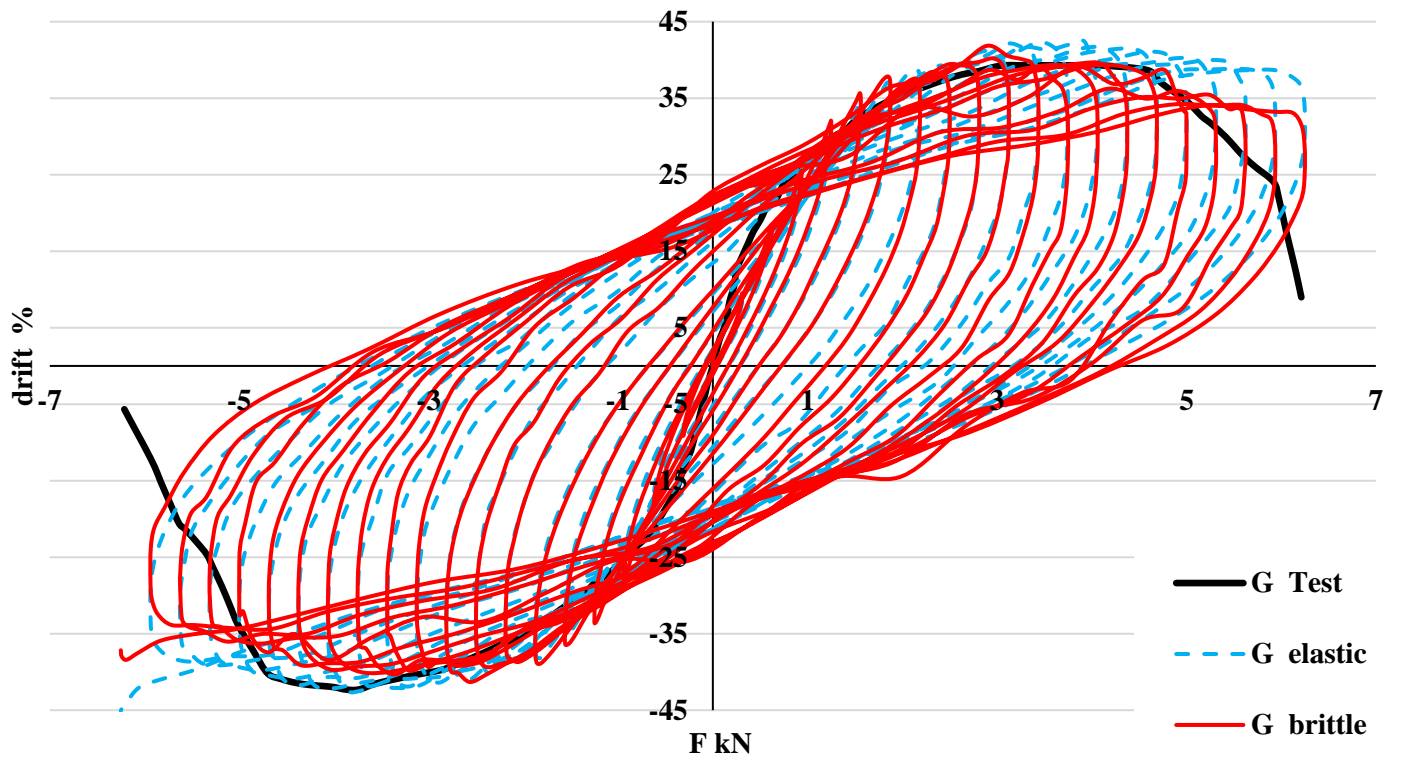


Σχήμα 5.23: Τμήμα διαμήκων ράβδων που έχουν υποστεί διαρροή και πλαστικοποίηση. Σημεία σπλιισμού με αρνητικές τάσεις στα τμήματα πλαστικοποίησης → πιθανότητα λυγισμού (συμβαδίζει με το πείραμα)

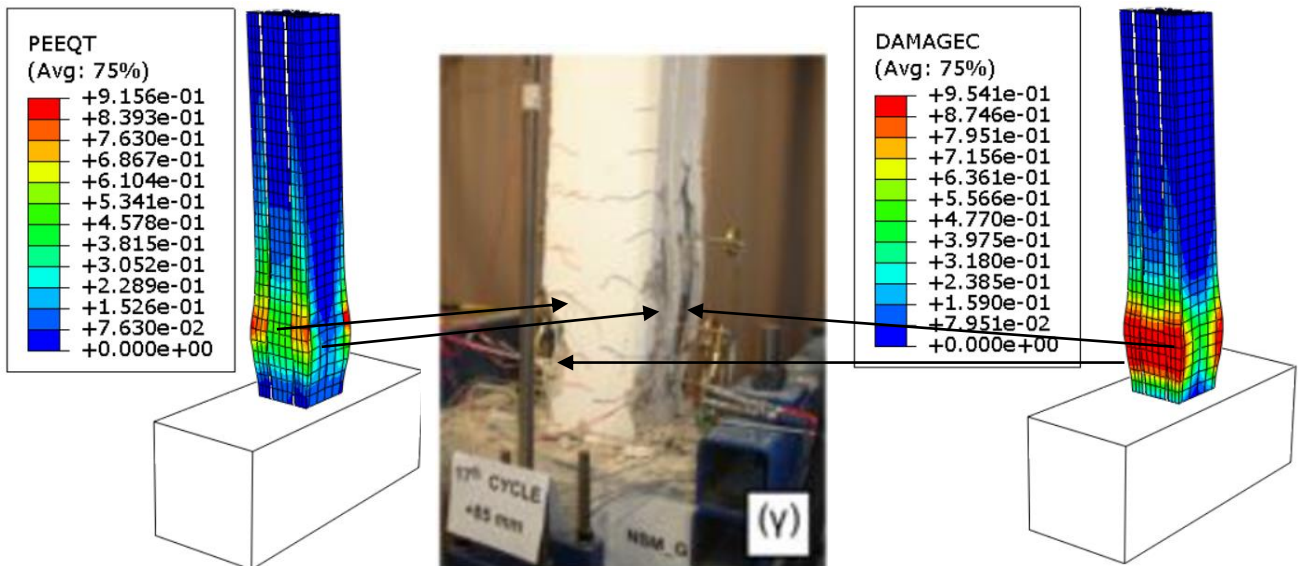


Σχήμα 5.24 : Μέγεθος μετατοπίσεων

G (ενίσχυση NSM με GFRP ράβδους)



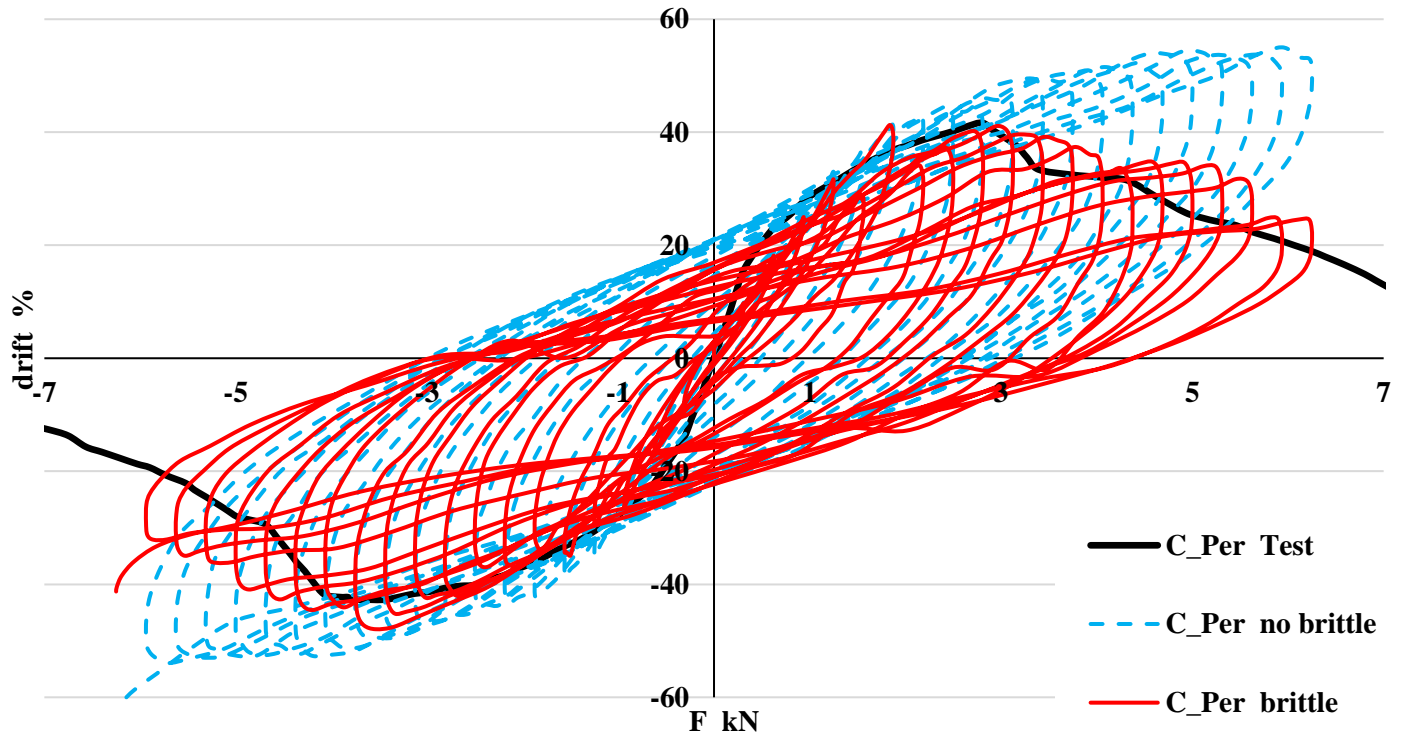
Σχήμα 5.25: Υστερητικές καμπύλες για το δοκίμιο G με θεώρηση του υλικού είτε ως γραμμικώς ελαστικό είτε με εισαγωγή του μοντέλου brittle cracking



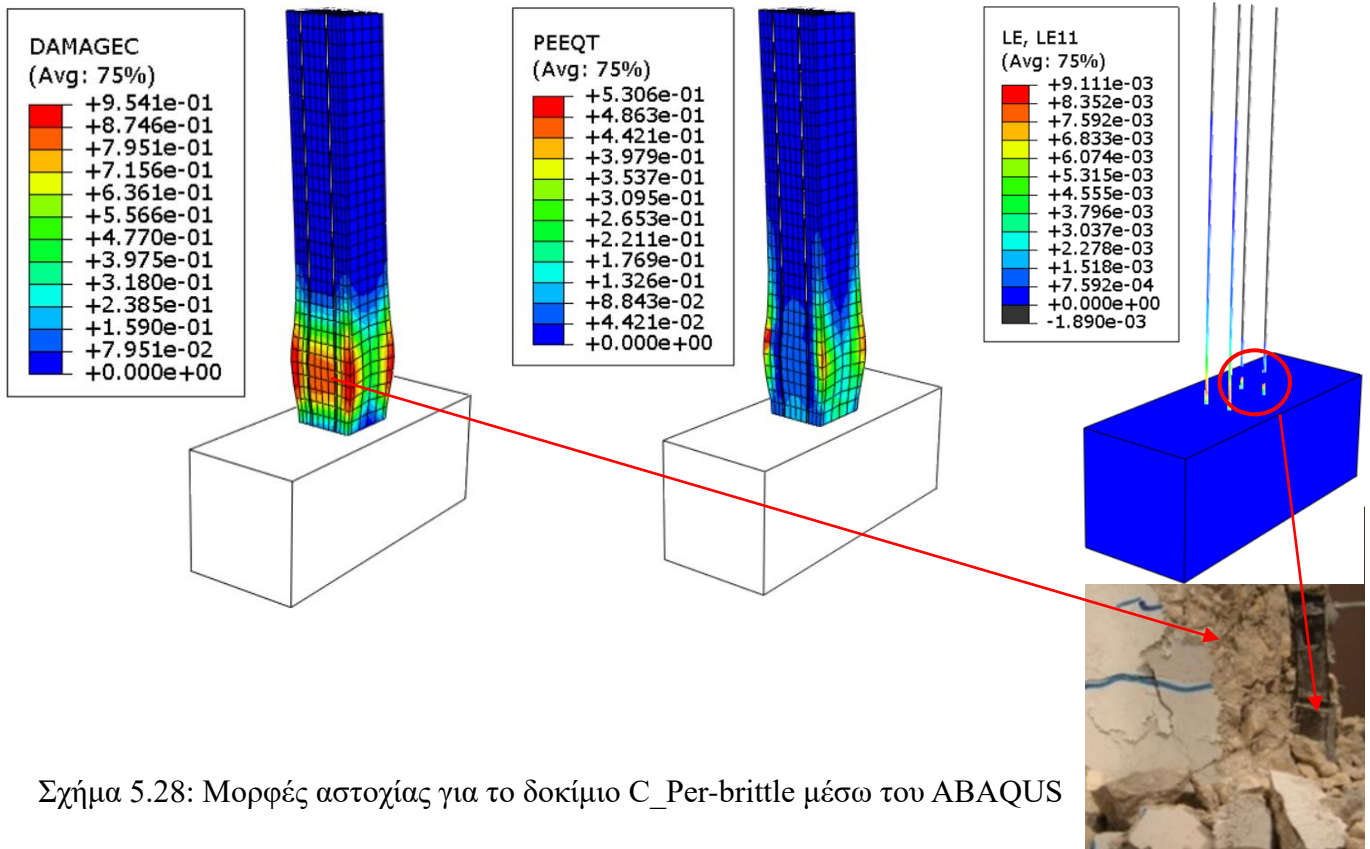
Σχήμα 5.26: Μορφές αστοχίας για το δοκίμιο G μέσω του ABAQUS: θλίψη, εφελκυσμός, θραύση NSM



C\_Per (ενίσχυση NSM με CFRP λωρίδες καμπτόμενες περί τον ισχυρό τους άξονα)

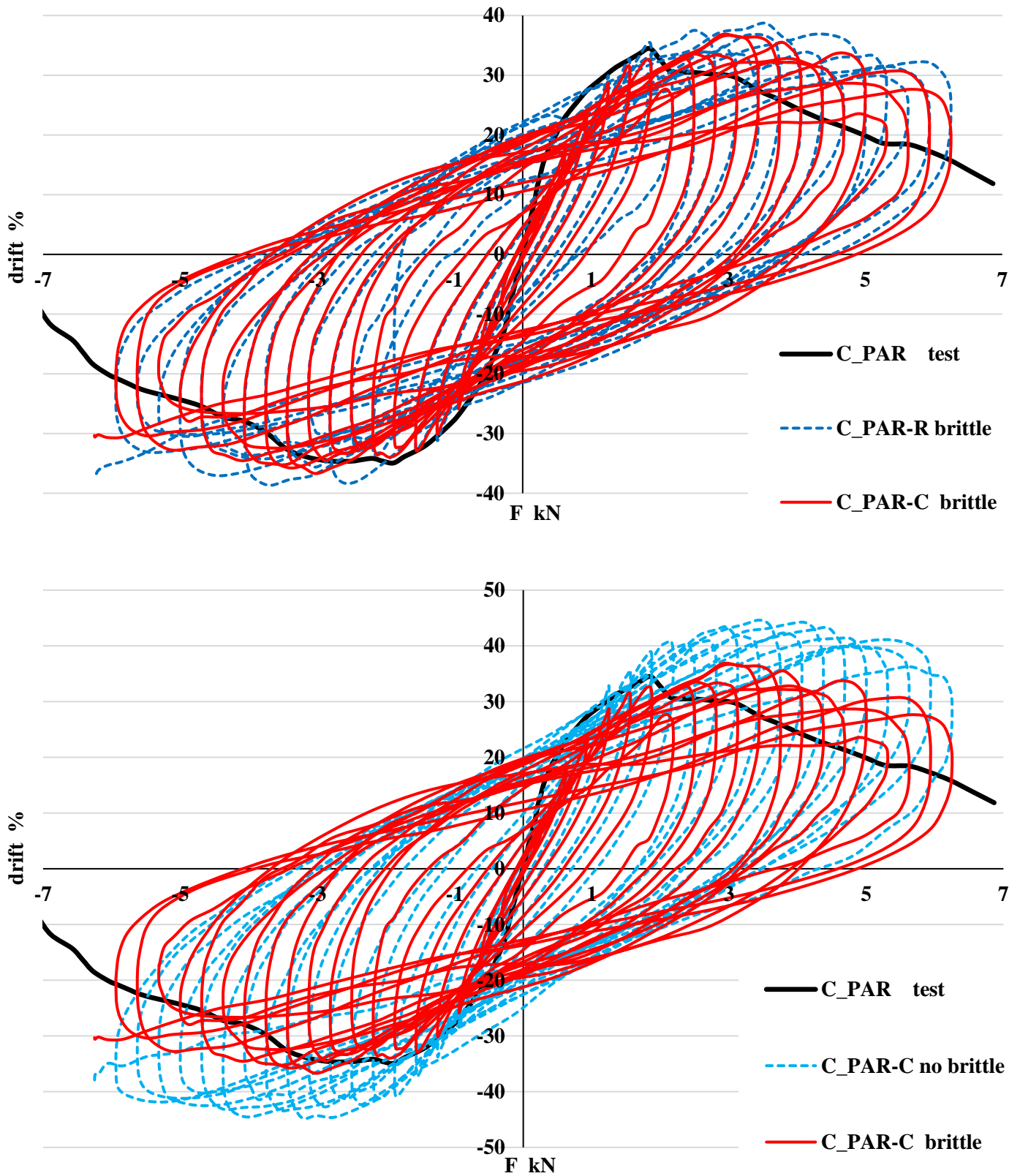


Σχήμα 5.27: Υστερητικές καμπύλες για το δοκίμιο C\_Per με χρήση ή όχι του brittle cracking μοντέλου



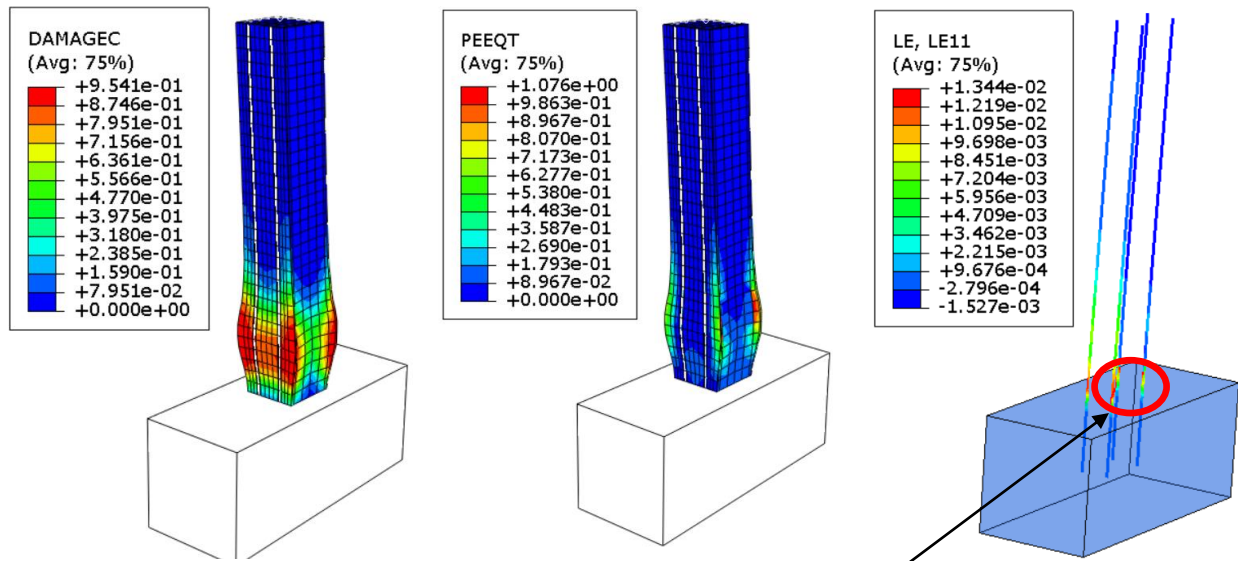
Σχήμα 5.28: Μορφές αστοχίας για το δοκίμιο C\_Per-brittle μέσω του ABAQUS

## C\_Par (ενίσχυση NSM με CFRP λωρίδες καμπτόμενες περί τον ασθενή τους άξονα)

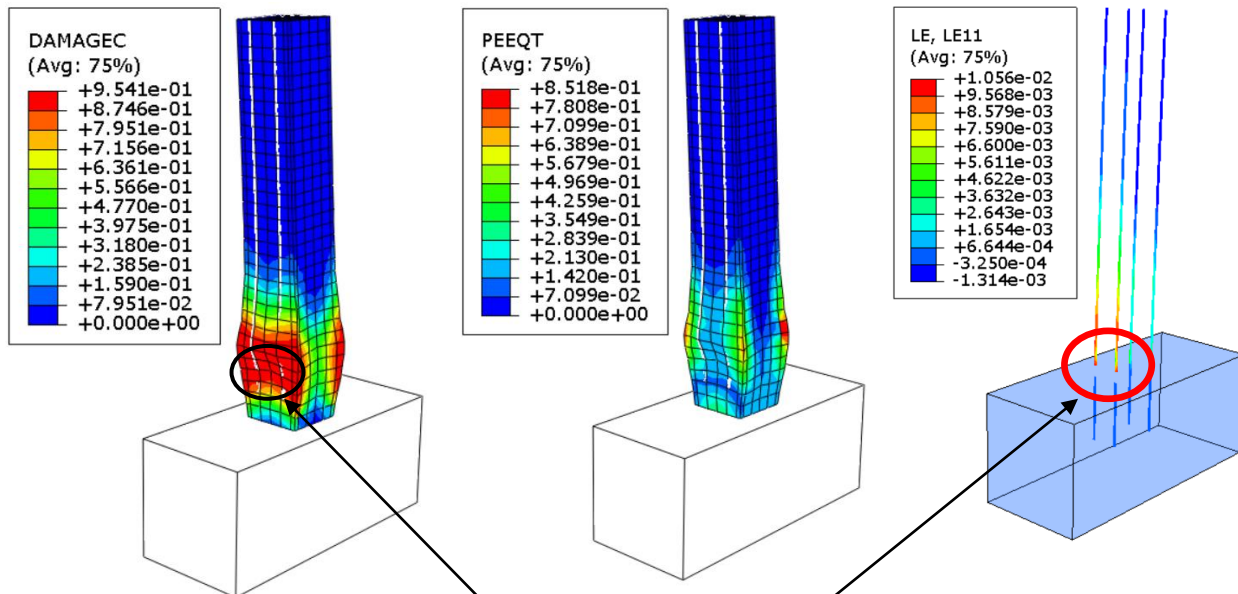


Σχήμα 5.29: Συγκριτικές υστερητικές καμπύλες μεταξύ πειράματος και μοντέλου για το δοκίμιο C\_Par





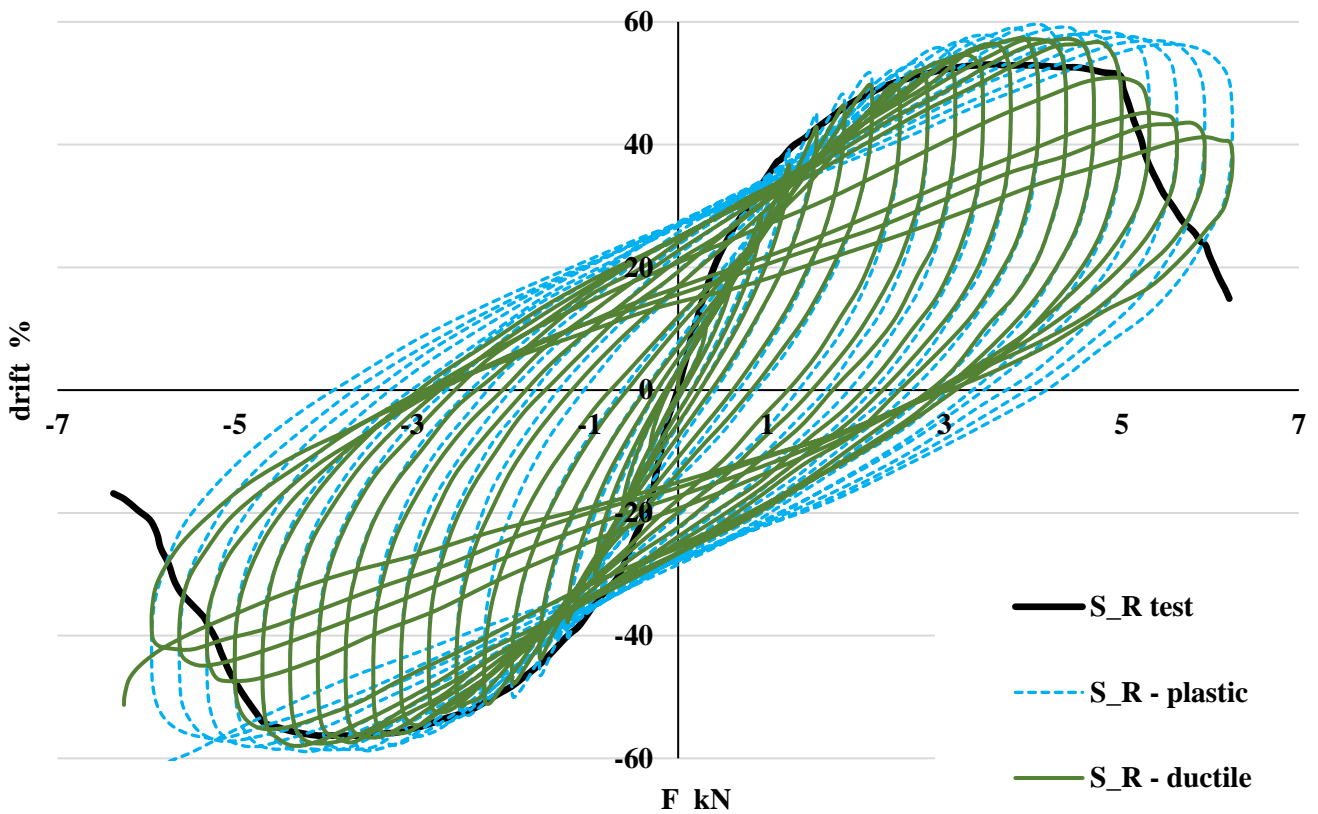
Σχήμα 5.30: C\_Par-R (brittle): Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη (αριστερά) και σε εφελκυσμό (δεξιά) και θραύση των CFRP λωρίδων



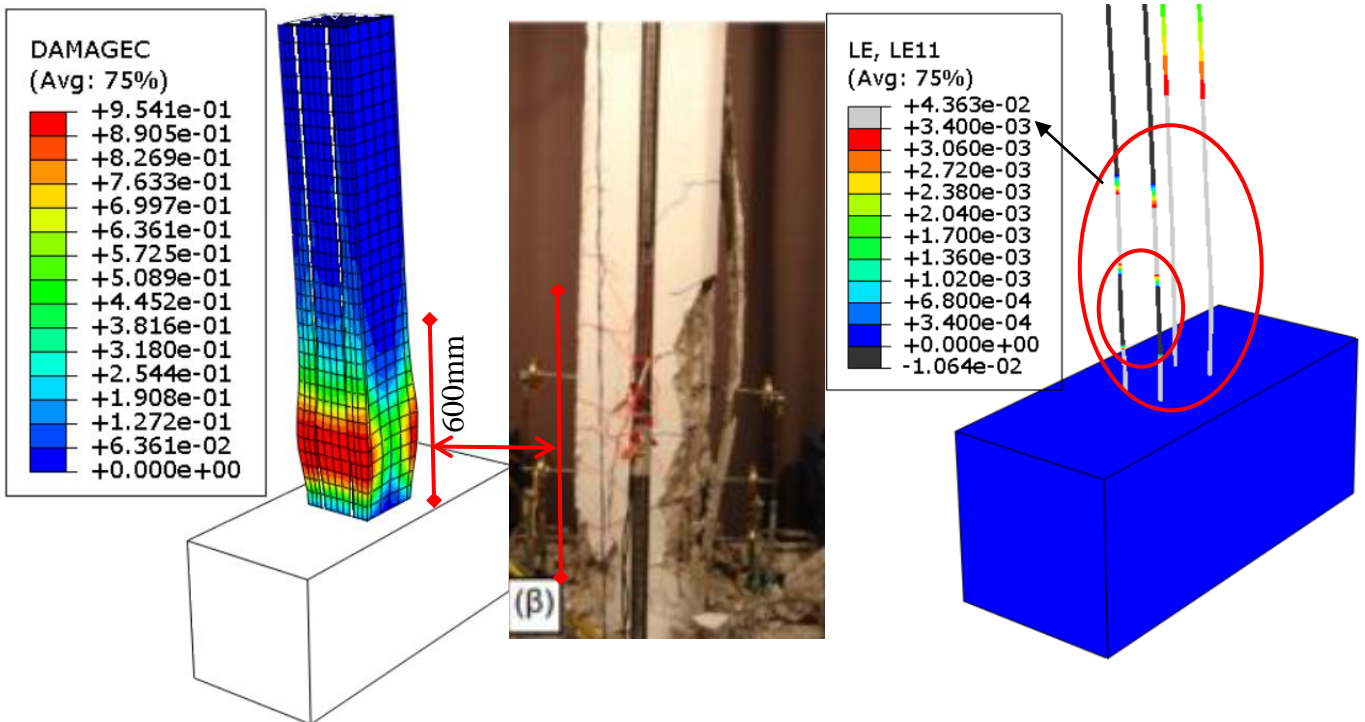
Σχήμα 5.31: C\_Par-C (brittle): Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη (αριστερά) και σε εφελκυσμό (δεξιά) και θραύση των CFRP λωρίδων

Γενικότερα, η αστοχία στο λογισμικό παρατηρήθηκε σε μεταγενέστερο χρονικό σημείο (μεγαλύτερη μετακίνηση αστοχίας) σε σχέση με το πείραμα, πράγμα που είναι λογικό και αποδεκτό λόγω μη δυνατότητας προσομοίωσης του λυγισμού.

S\_R (ενίσχυση NSM με ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα)

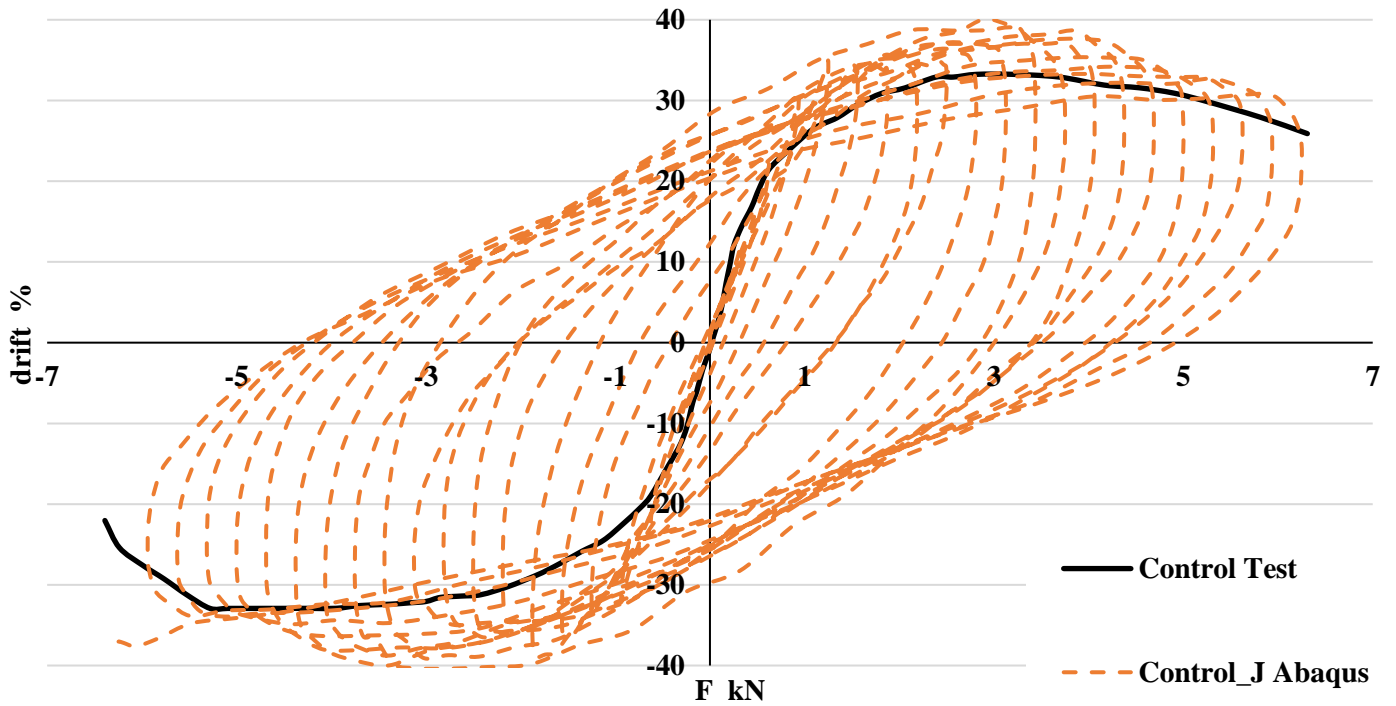


Σχήμα 5.32: Υστερητικές καμπύλες πειράματος και λογισμικού για το δοκίμιο S\_R

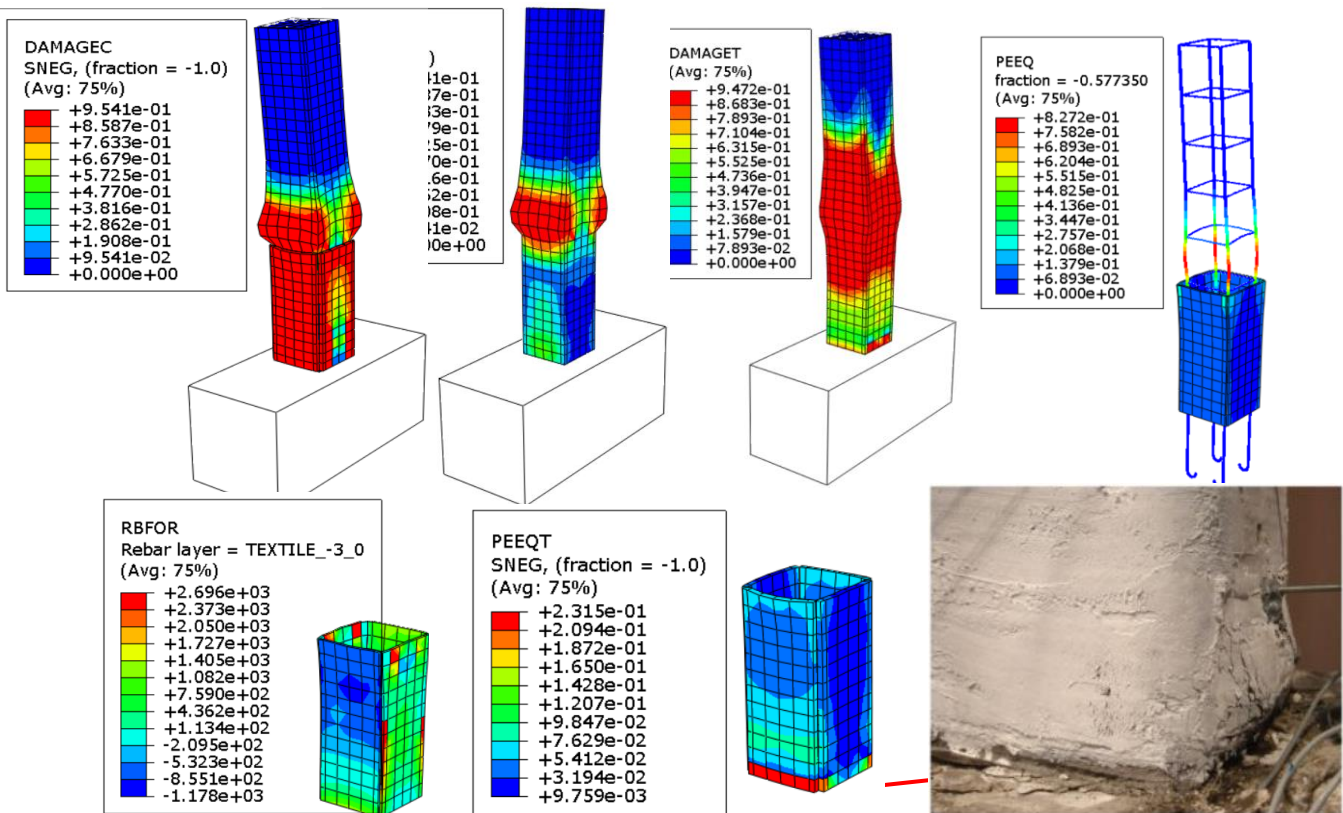


Σχήμα 5.33: Δοκίμιο S\_R: Σύνθλιψη επικάλυψης - (πιθανότητα) λυγισμού των ράβδων ανοξείδωτου χάλυβα λόγω θλίψης πλαστικοποιημένου τμήματος,  $u=85\text{mm}$

Control J (ενίσχυση μόνο με IAM-TRM)



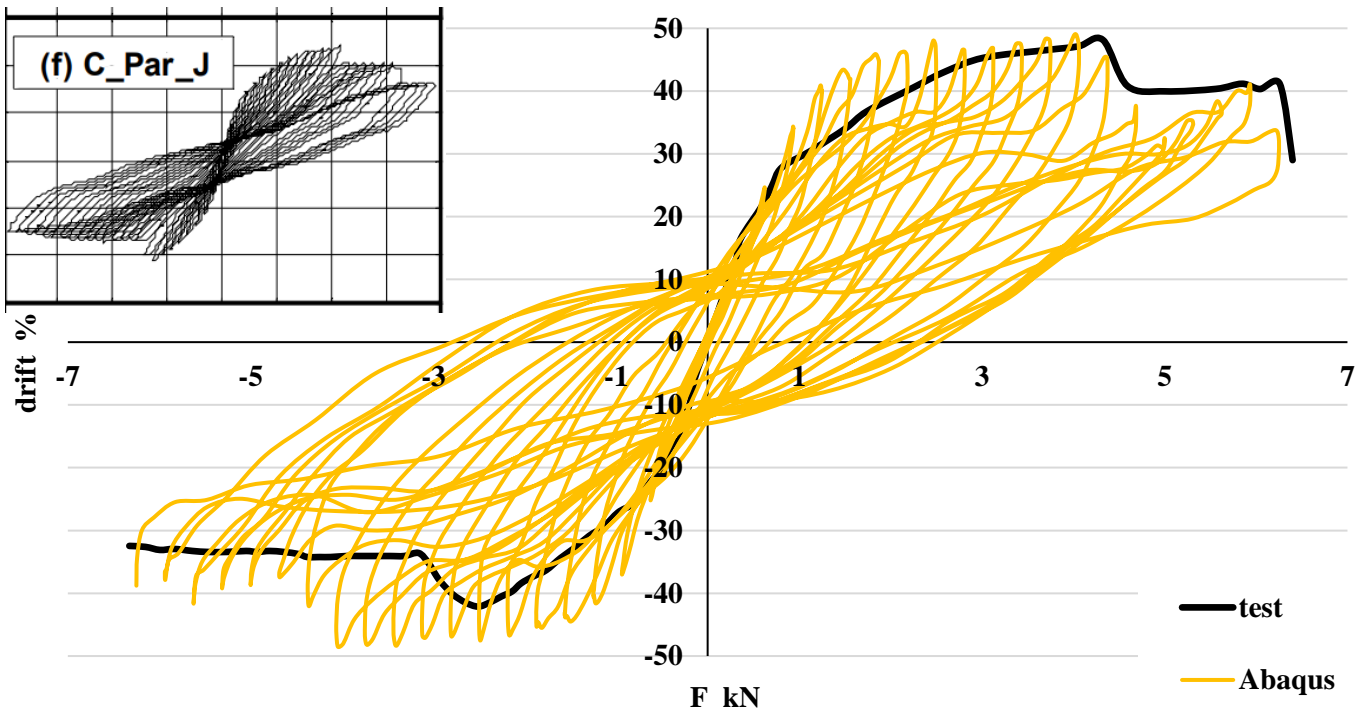
Σχήμα 5.34: Σύγκριση καμπύλων Control\_J και Control



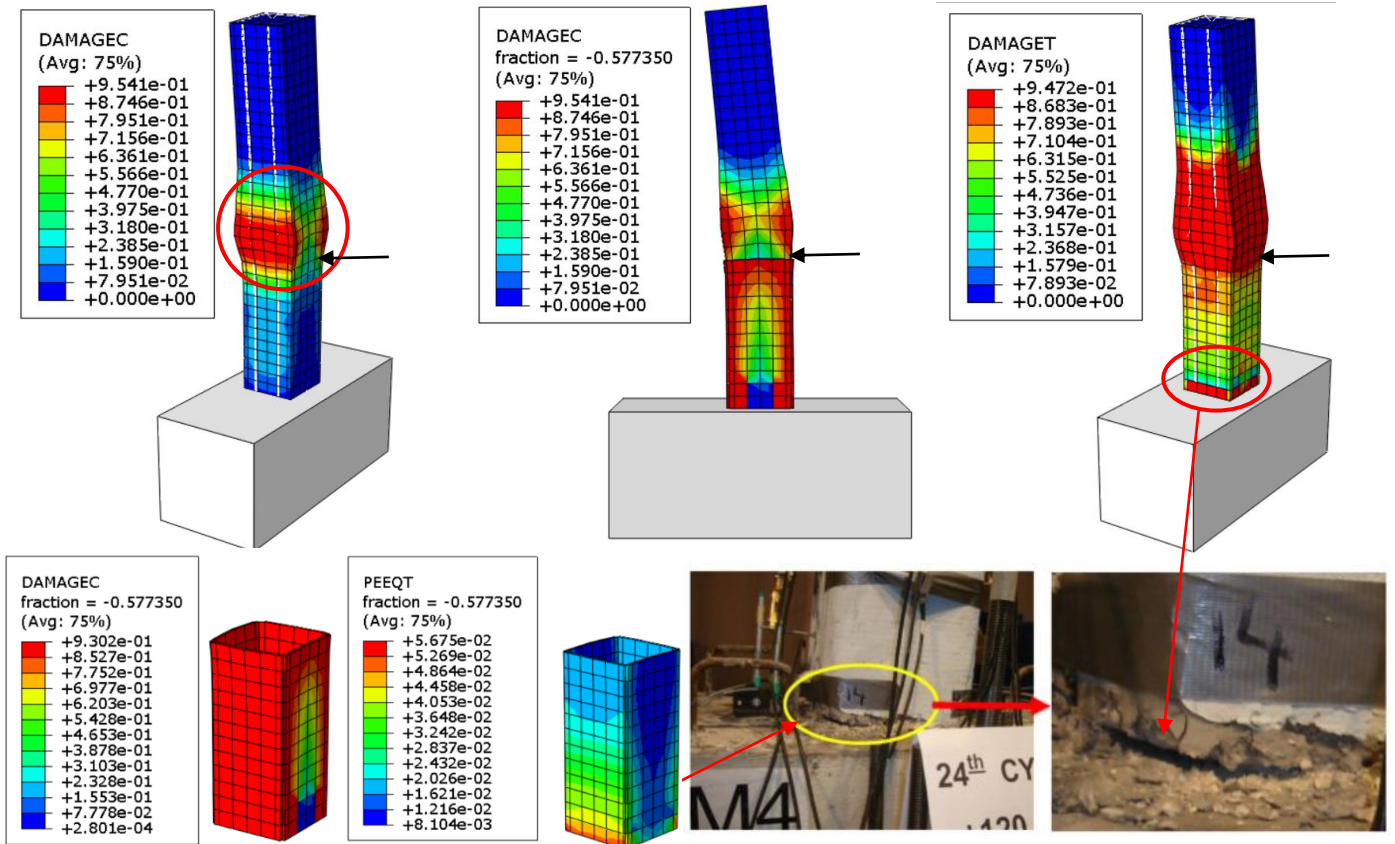
Σχήμα 5.35: Control\_J: Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό – πλαστική περιοχή διαμήκους οπλισμού στο πέρας ενίσχυσης με TRM – Φορτία στις ίνες και ρηγμάτωση του μανδύα IAM



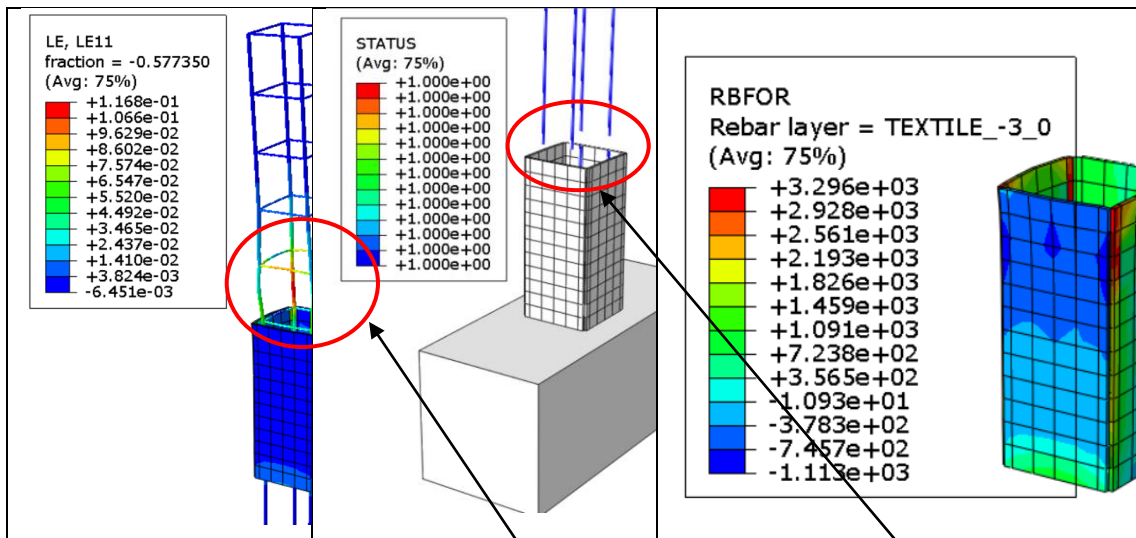
C\_Par\_J (ενίσχυση με CFRP λωρίδες και TRM)



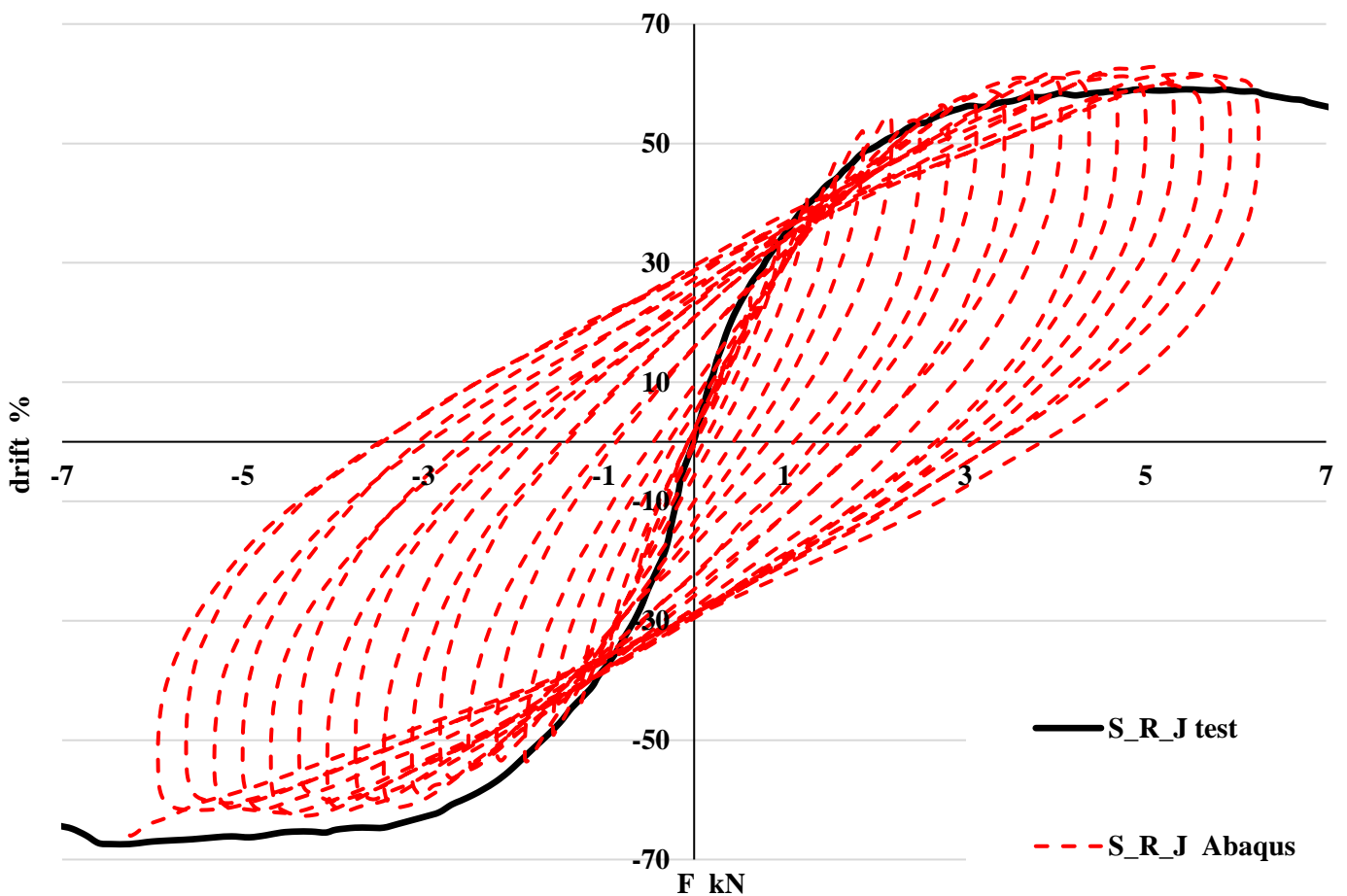
Σχήμα 5.36: Υστερητικές καμπύλες πειράματος και ABAQUS για το C\_Par\_J



Σχήμα 5.37: Δοκίμιο C\_Par\_J : Αστοχία σε θλίψη και εφελκυσμό σχεδόν μόνο πέραν του σημείου ενίσχυσης με TRM – ρηγμάτωση, σε αρχικό στάδιο, του κατώτερου μη ενισχυμένου τμήματος (10 mm)



Σχήμα 5.38: Δοκίμιο C\_Par\_J : Πλαστικοποίηση διαμήκουσ οπλισμού και θραύση λωρίδων CFRP ακριβώς στο πέρας (και έπειτα) της ενίσχυσης με TRM – Φορτία στις ίνες άνθρακα



Σχήμα 5.39: Υστερητική καμπύλη για το δοκίμιο S\_R\_J σε σύγκριση με το πειραματικό αποτέλεσμα

ΔΟΚΙΜΙΟ	CPU time (s)	Μέση Απόκλιση (%)	Fmax (+)		Fmax (-)	
			kN	Απόκλιση %	kN	Απόκλιση %
Control-Unconfined	708	13.48	35.59	7.59	35.66	5.85
Control-Confined	791	5.37	33.57	1.48	33.62	0.21
Control-52.5mm	791	5.37	33.57	1.48	33.62	0.21
Control-26.25mm	1986	4.95	35.37	6.92	35.81	6.29
G elastic	914	18.83	41.84	5.71	41.37	1.57
G brittle	1091	9.21	41.45	4.72	42.30	0.64
C_Per no brittle	1298	42.23	54.07	30.29	52.94	23.92
C_Per brittle	1334	16.20	40.76	1.78	47.28	10.67
C_Par-R brittle	2882	14.71	38.71	12.04	38.66	10.39
C_Par-C no brittle	845	33.68	44.61	29.12	36.71	4.83
C_Par-C brittle	995	14.98	35.70	3.33	36.01	2.83
S_R plastic	1097	10.58	59.51	12.86	57.58	1.88
S_R ductile	1141	7.66	57.18	8.44	57.09	1.01
Control_J	3120	-	40.11	-	40.35	-
C_Par_J	3324	11.72	47.90	0.63	48.34	14.61
S_R_J	3297	2.14	62.84	6.08	62.13	8.23

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων από τις υστερητικές συγκριτικές καμπύλες

Άρα, για τα επιλεγμένα μοντέλα, οι τιμές για τις μέσες αποκλίσεις ήταν 2.14% έως και 16.20%, οι οποίες κρίθηκαν αποδεκτές λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραδοχές ώστε, εκτός από ακριβή, τα μοντέλα να θεωρηθούν και υπολογιστικά συμφέροντα.

## 6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Προκειμένου να διερευνηθούν περαιτέρω σενάρια ως προς τον τρόπο ενίσχυσης των υποστρωμάτων, δόθηκε σε αυτό το κεφάλαιο έμφαση στην μονοτονική φόρτιση των δοκιμίων με σκοπό την κατασκευή εμπειρικών διαγραμμάτων – διαγράμματα αλληλεπίδρασης. Για τα διαγράμματα αυτά, οι βασικές παραμετροποιήσεις αφορούσαν είτε στον αριθμό των στοιχείων ενίσχυσης ( $n$ ), για την μέθοδο NSM, και τον αριθμό των στρώσεων ινοπλέγματος ( $s$ ) και ανόργανης μήτρας ( $s+1$ ), για την μέθοδο TRM, είτε στην διατομή των στοιχείων ενίσχυσης, αποκλειστικά για την μέθοδο NSM (σχήμα 6.1 – 6.4). Απώτερος σκοπός ήταν να καταγραφεί η γενικότερη σχέση μεταξύ αύξησης της τελικής διατομής ενισχύσεων και αύξησης ή όχι, και κατά πόσο, του τελικού μεγέθους της μέγιστης ροπής κάμψης και του μέγιστου θλιπτικού φορτίου. Τα εντατικά μεγέθη ( $N, M$ ) ανά ανάλυση, υπολογίσθηκαν από τις αντιδράσεις στήριξης στην πάκτωση του θεμελίου έχοντας προηγουμένως θέσει ένα σημείο αναφοράς για ολόκληρη την επιφάνεια πακτώσεως προκειμένου να μην απαιτείται κάθε φορά το άθροισμα του συνόλου των διακριτών μεγεθών στην επιφάνεια αυτή. Συγκεκριμένα:

- 1) Για την μέθοδο NSM, χρησιμοποιήθηκαν, στα δοκίμια G, C\_Per, S\_R,  $n=1, 2, 3$  στοιχεία ενίσχυσης ανά ενισχυόμενη πλευρά, δηλαδή ράβδοι GFRP, λωρίδες CFRP και ράβδοι Ανοξειδωτού Χάλυβα, αντίστοιχα (σχήμα 6.6-6.11). Κάθε περίπτωση  $n$  αποτελούσε και διαφορετικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης συμπεριλαμβάνοντας και το μη ενισχυμένο δοκίμιο, Control (σχήμα 6.5), για τον λόγους σύγκρισης. Σημειώνεται εδώ, πως, ως διατομές επιλέχθηκαν οι ίδιες με τις αρχικές του πειράματος. Κρίσιμη παράμετρος ήταν η φέρουσα ικανότητα του στοιχείου έναντι εφελκυστικών φορτίων και όχι η διατομή ή η δυσκαμψία. Λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη την διαφορετικότητα στην οριακή τάση του κάθε υλικού επιλέχθηκε αντίστοιχα η διατομή του κάθε στοιχείου ώστε να υπάρχει σχετική συμφωνία των στοιχείων ως προς το μέγιστο δυνατό εφελκυστικό φορτίο, όσο επιτρεπόταν αυτό βέβαια από τις παρεχόμενες διατομές του εμπορίου και γενικά αλλά και κατά την περίοδο υλοποίησης του πειράματος. Για τα στοιχεία που επιλέχθηκαν, φαίνεται η σχέση τους ως προς τις μεταξύ τους μηχανικές ιδιότητες στον πίνακα 6.1.
- 2) Για την μέθοδο NSM επίσης, για τα δοκίμια G, C\_Per, S\_R, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές διατομές ανά περίπτωση στοιχείου ενίσχυσης σε κάθε δοκίμιο

(σχήμα 6.12-6.14). Επιχειρήθηκε, οποιεσδήποτε αυξήσεις ή μειώσεις στην συνολική διατομή ενίσχυσης να διατηρηθούν όσο το δυνατόν γίνεται και επιτρέπεται, από τους γεωμετρικούς περιορισμούς, ίσες μεταξύ των δοκιμίων. Στον πίνακα 6.2, φαίνονται οι διαφοροποιήσεις ανά δοκίμιο. Μοναδική ανομοιομορφία αποτελεί η αύξηση της διατομής στην περίπτωση χρήσης CFRP λωρίδων, και αυτό συνέβη λόγω του περιορισμού στο πλάτος της διατομής λόγω των διαστάσεων της αυλακώσεως στις πλευρές του υποστυλώματος (20\*10).

- 3) Για την μέθοδο TRM, διερευνήθηκαν οι περιπτώσεις  $s=2, 3$  και 4 στρώσεων ινοπλέγματος (και επομένως  $s+1 = 3, 4$  και 5 αντίστοιχα ανόργανης μήτρας – τσιμεντοειδούς κονιάματος) (σχήμα 6.15-6.20). Κατασκευάστηκαν 6 διαγράμματα με παράμετρο κάθε φορά είτε τον  $s$  αριθμό στρώσεων TRM είτε το είδος ενίσχυσης NSM. Παρέχονται και τα συγκριτικά διαγράμματα ενίσχυσης μόνο με NSM και TRM.
- 4) Επίσης, έγιναν 3 ακόμα διαγράμματα συνδυαστικών σεναρίων, πέραν των προηγούμενων, αποκλειστικά για την περίπτωση ενίσχυσης με λωρίδες CFRP, κυρίως λόγω του τρόπου τοποθέτησης των τελευταίων (κάμψη περί τον ασθενή άξονα των λωρίδων) προκειμένου να φανεί η αποδοτικότητα του συνδυασμού NSM/TRM σε μία δυσμενή περίπτωση και αρκετά συνήθη περίπτωση (σχήμα 6.21-6.23).

NSM στοιχείο	ft (N/mm <sup>2</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	Ft (N)	% αλλαγή	E (N/mm <sup>2</sup> )	E*A (N)	% αλλαγή
CFRP	2173	32	69536	-	144900	4636800	-
GFRP	1491	50	74550	7.21065	65200	3260000	-29.7
S.Steel	761	113	85993	23.6669	200000	22600000	387.4

Πίνακας 6.1: Σχέσεις μηχανικών ιδιοτήτων για τις αρχικές διατομές των στοιχείων NSM

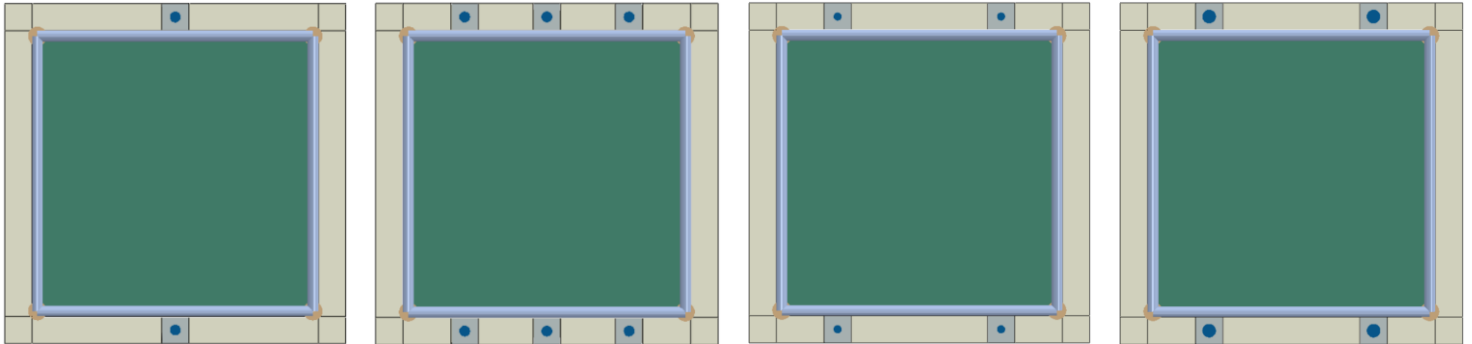
Περίπτωση διατομής	GFRP ράβδος			CFRP λωρίδα			Stainless Steel ράβδος		
	Στοιχείο	A (mm <sup>2</sup> )	Μεταβολή (%)	Στοιχείο	A (mm <sup>2</sup> )	Μεταβολή (%)	Στοιχείο	A (mm <sup>2</sup> )	Μεταβολή (%)
Αυξημένη	Φ10	78.54	+56.25	3*16	48	+50	Φ15	176.71	+56.25
Αρχική	Φ8	50.27	0	2*16	32	0	Φ12	113.10	0
Μειωμένη	Φ6	28.27	-43.75	1.5*12	18	-43.75	Φ9	63.62	-43.75

Πίνακας 6.2: Μεταβολές στις διατομές για τα στοιχεία NSM, στην παραμετρική ανάλυση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης

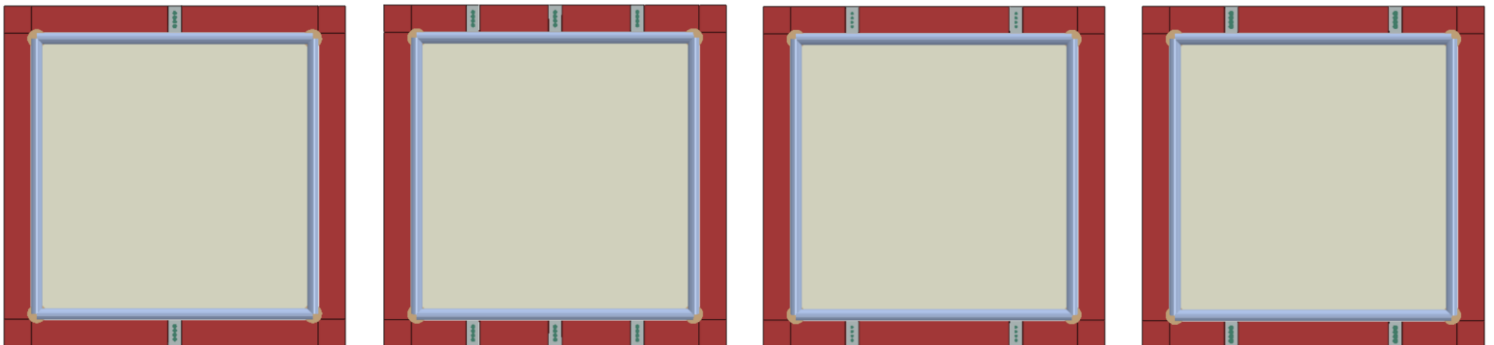
Για τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία:



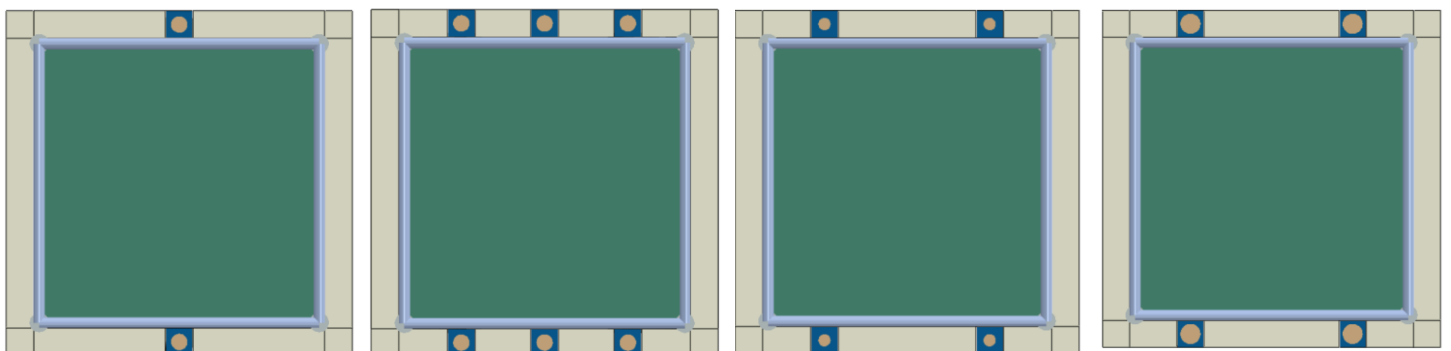
- 1) Υπολογισμός των χαρακτηριστικών σημείων  $\rightarrow$  μέγιστος – καθарός – εφελκυσμό ( $N=N_{max}, M=0$ ), μέγιστη – καθарή – θλίψη ( $N=N_{min}, M=0$ ), και καθарή κάμψη ( $N=0, M$ ),
- 2) Εύρεση των ενδιάμεσων σημείων με υπολογισμό της ροπής κάμψης  $M$  για  $N=N_{max}/2, N_{min}/2, N_{min}/5$  και  $N_{min}/10$  διαδοχικά,
- 3) Υπολογισμός μέγιστης ροπής κάμψης ( $N, M=M_{max}$ ) και καταγραφή μορφής αστοχίας στο σημείο ισοροπίας (balanced condition).



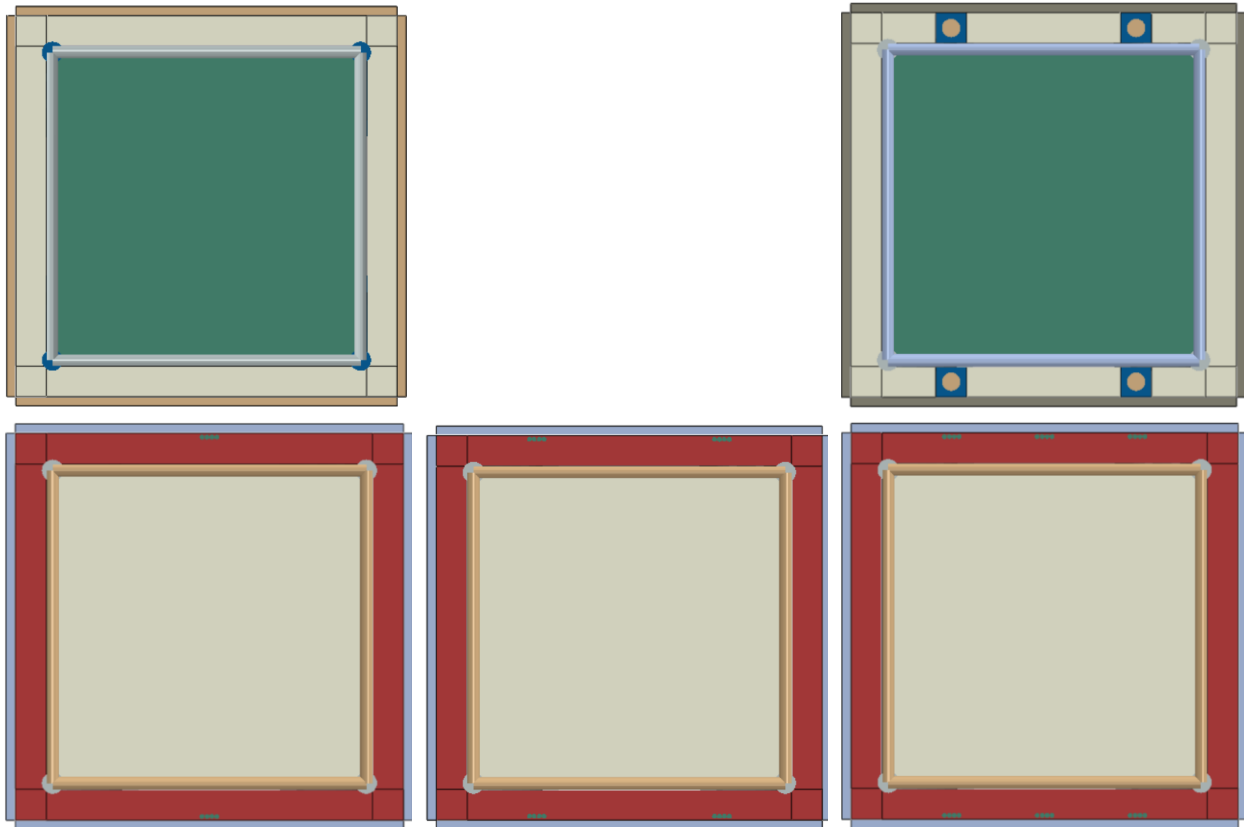
Σχήμα 6.1: Παραλλαγές του δοκιμίου G (n=1 και n=3 για Φ8 και n=2 για Φ6 και Φ10 αντίστοιχα)



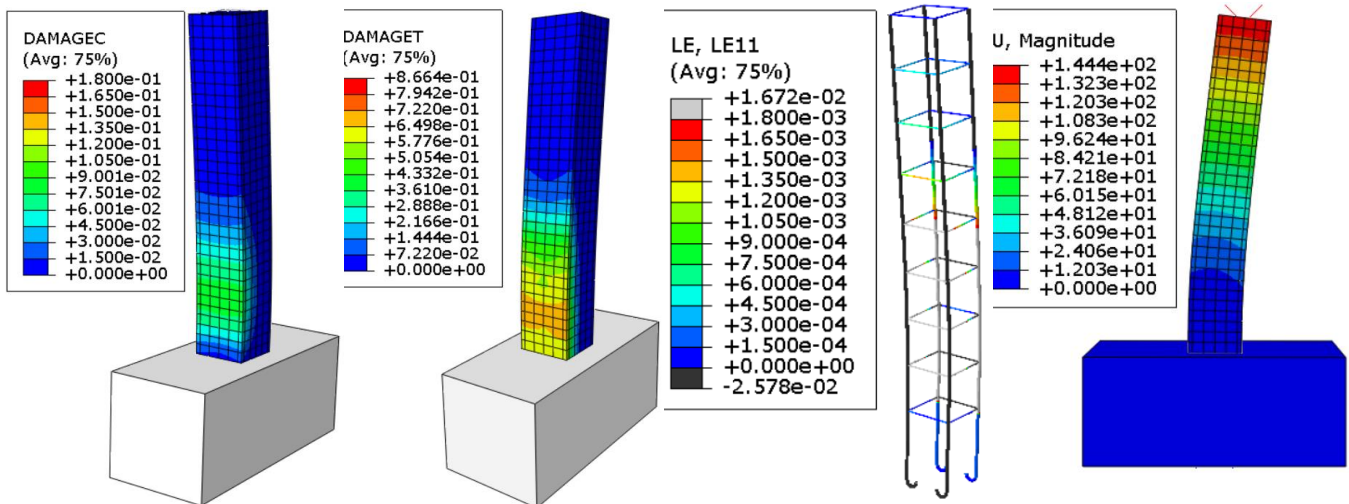
Σχήμα 6.2: Παραλλαγές του δοκιμίου C\_Per (n=1 και n=3 για 2\*16 και n=2 για 1.5\*12 και 3\*16 αντίστοιχα)



Σχήμα 6.3: Παραλλαγές του δοκιμίου S\_R (n=1 και n=3 για Φ12 και n=2 για Φ9 και Φ15 αντίστοιχα)

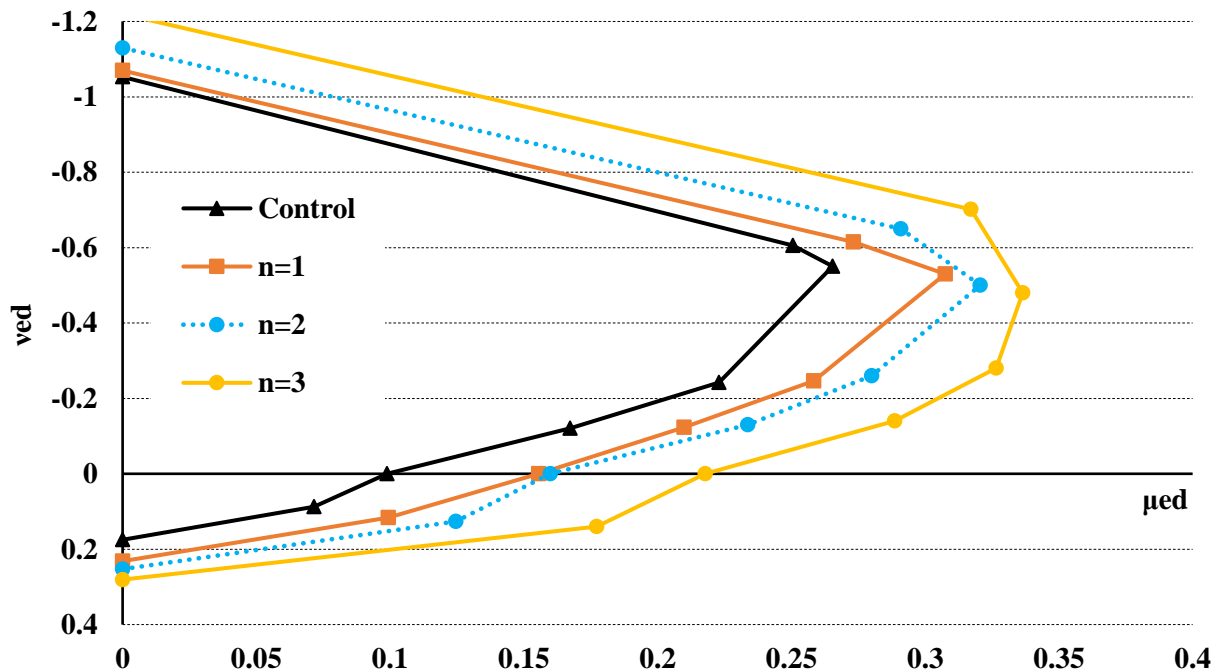


Σχήμα 6.4: Δοκίμια με  $s=2$  στρώσεις ενίσχυσης TRM (Control\_J, S\_R\_J και C\_Par\_J)

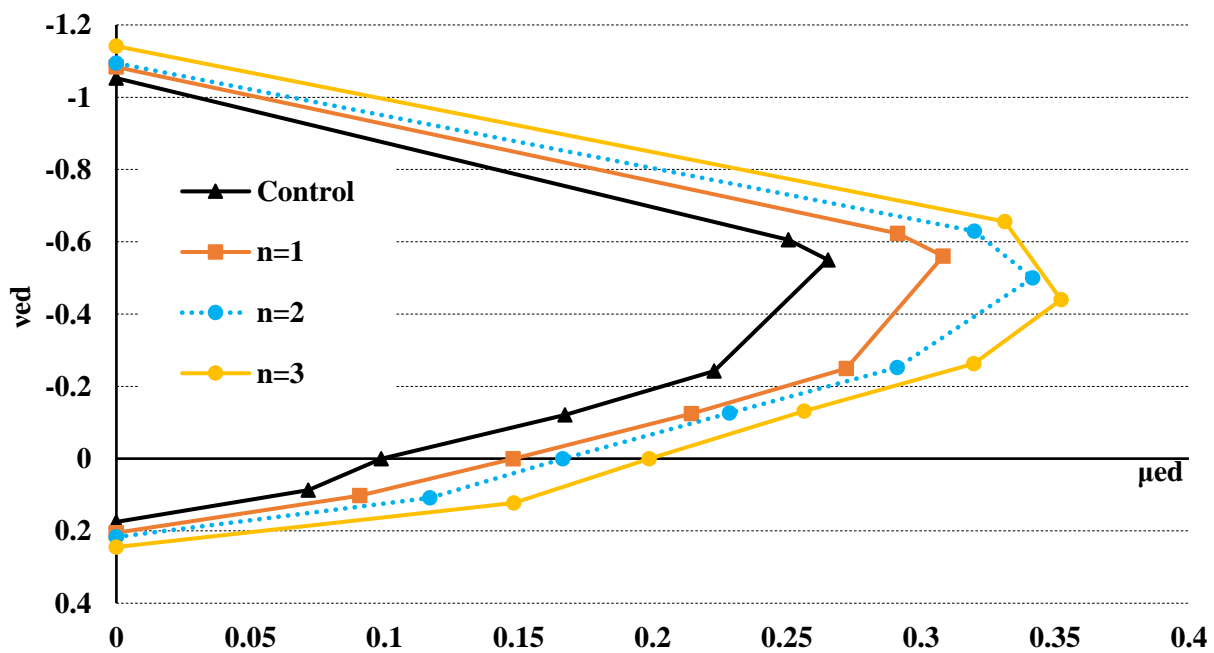


Σχήμα 6.5: Μορφή και μετακίνηση αστοχίας για το μη ενισχυμένο - Control - δοκίμιο υπό μονοτονική φόρτιση

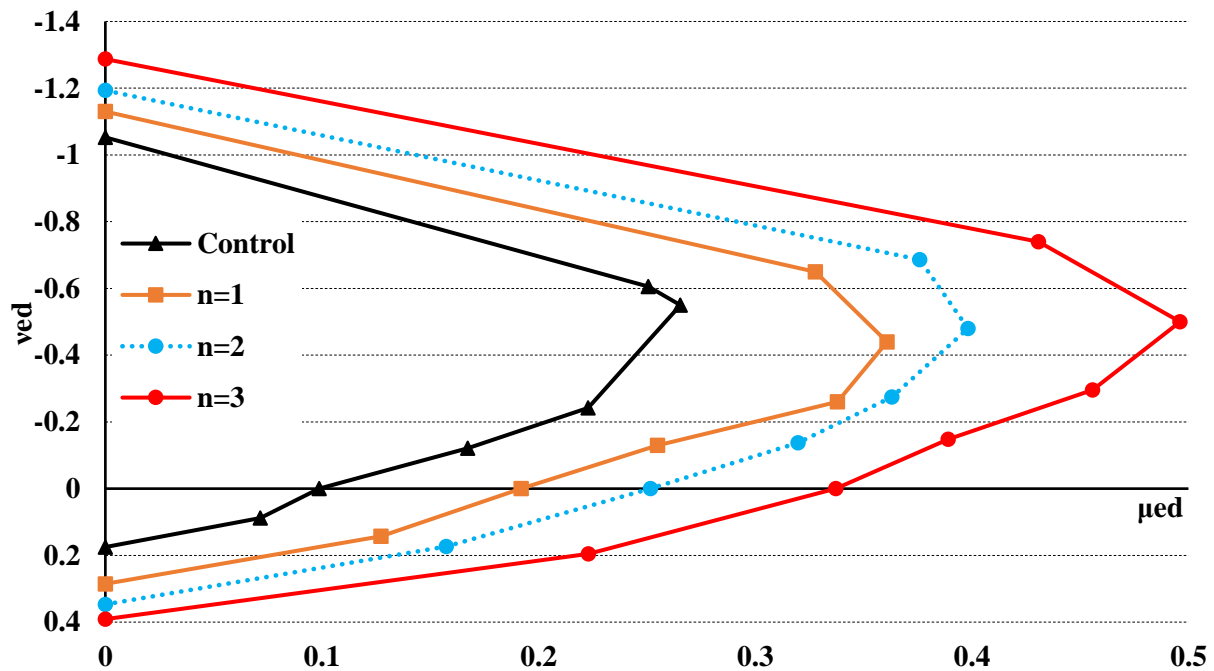
### 6.1 Παραμετροποίηση ως προς τον αριθμό $n$ των στοιχείων ενίσχυσης NSM ανά πλευρά



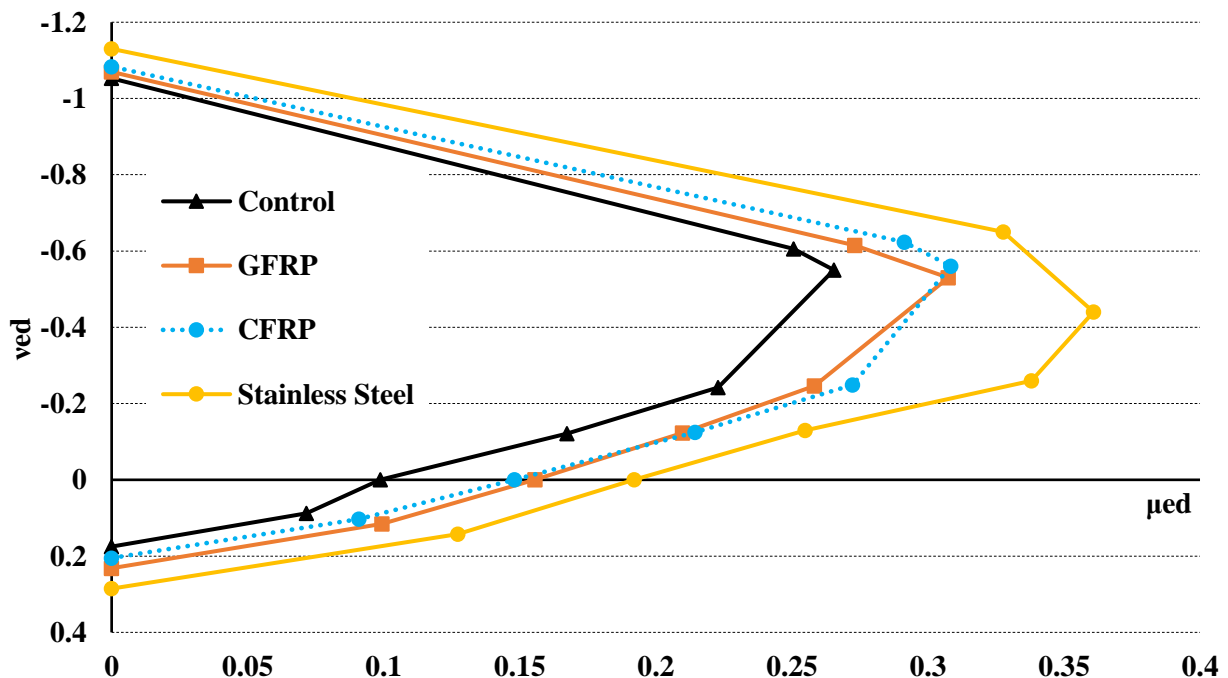
Σχήμα 6.6: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για  $n=1,2$  ή 3 ράβδους GFRP ανά ενισχυμένη πλευρά



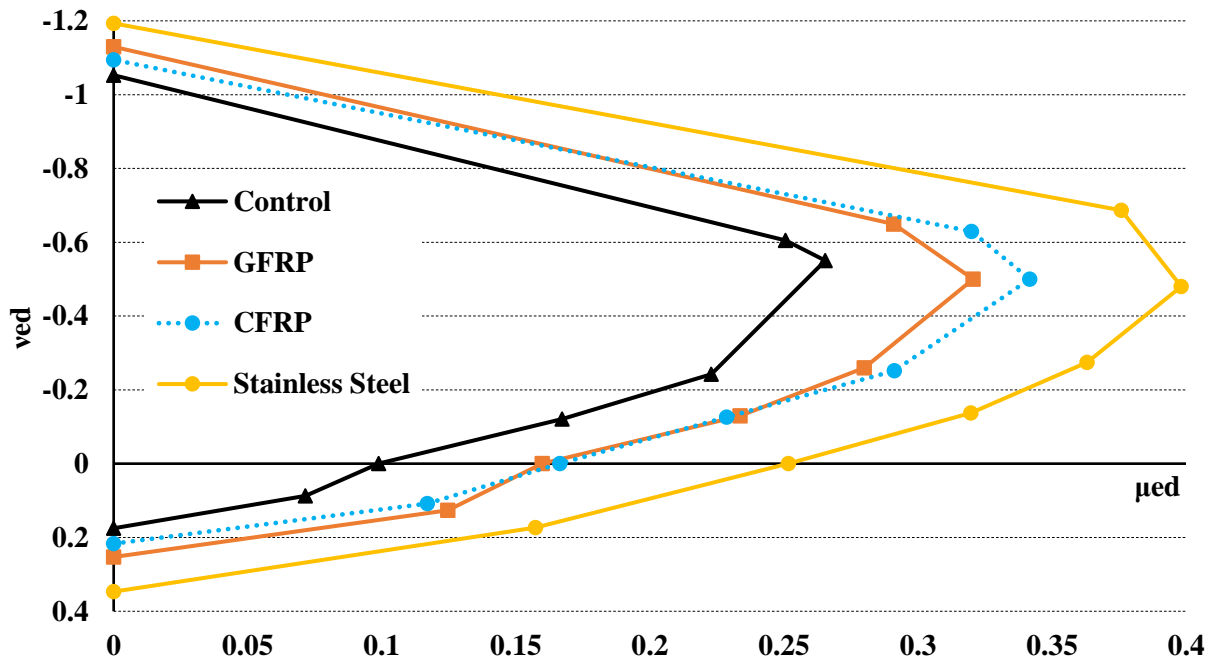
Σχήμα 6.7: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για  $n=1,2$  ή 3 λωρίδες CFRP ανά ενισχυμένη πλευρά



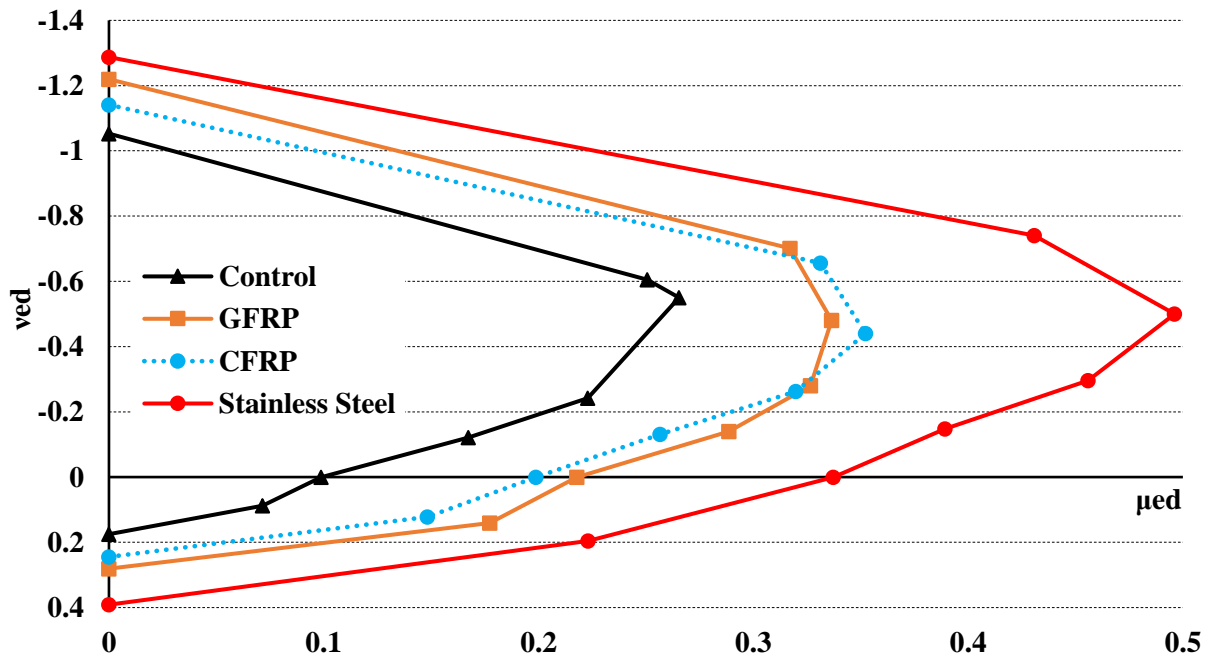
Σχήμα 6.8: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για n=1,2 ή 3 ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα ανά ενισχυμένη πλευρά



Σχήμα 6.9: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση με n=1 στοιχείο NSM (GFRP/CFRP/ Stainless Steel) ανά ενισχυμένη πλευρά

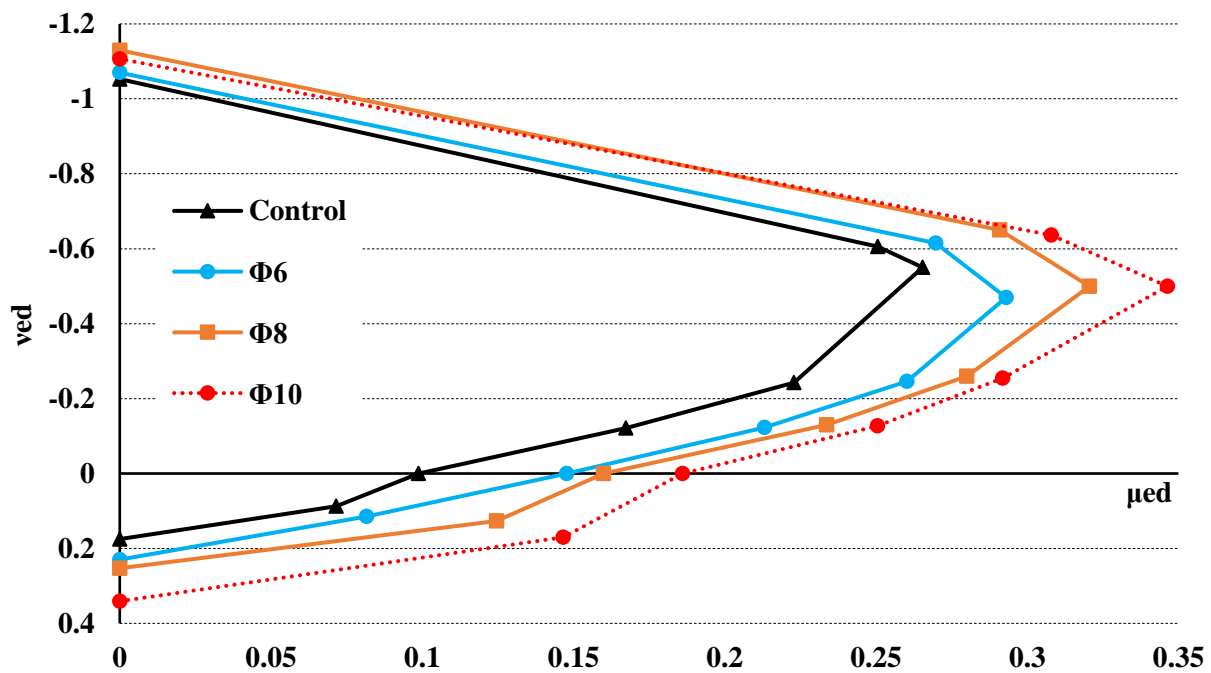


Σχήμα 6.10: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση με  $n=2$  στοιχεία NSM (GFRP/CFRP/Stainless Steel) ανά ενισχυμένη πλευρά

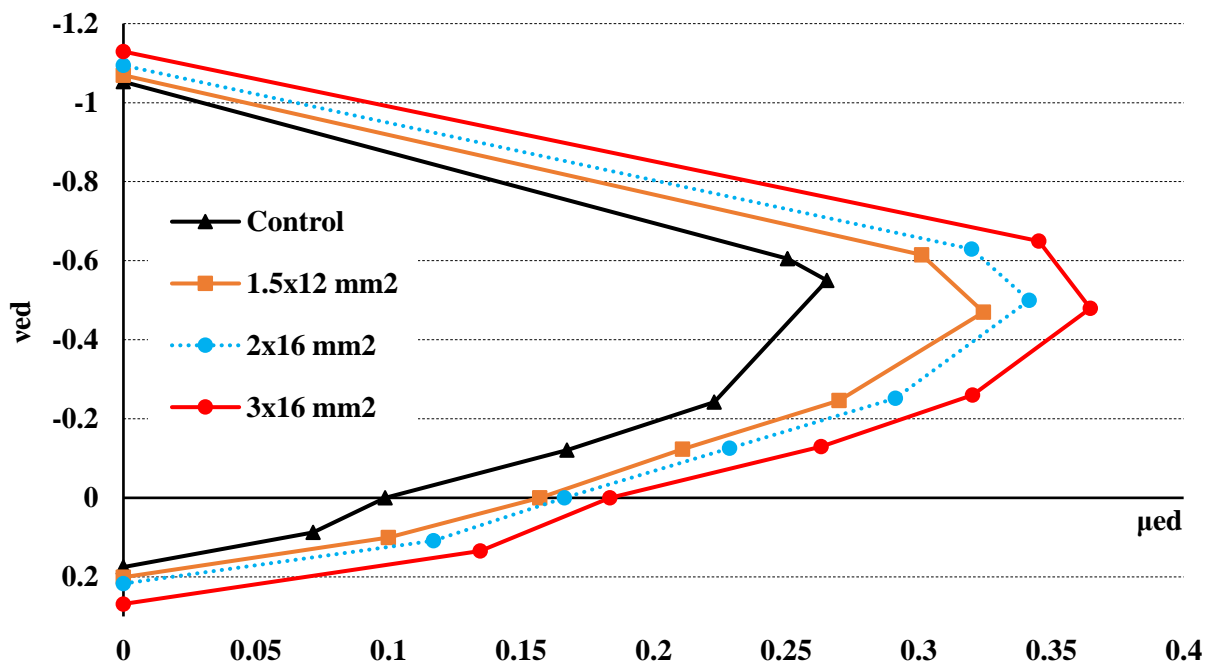


Σχήμα 6.11: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση με  $n=3$  στοιχεία NSM (GFRP/CFRP/Stainless Steel) ανά ενισχυμένη πλευρά

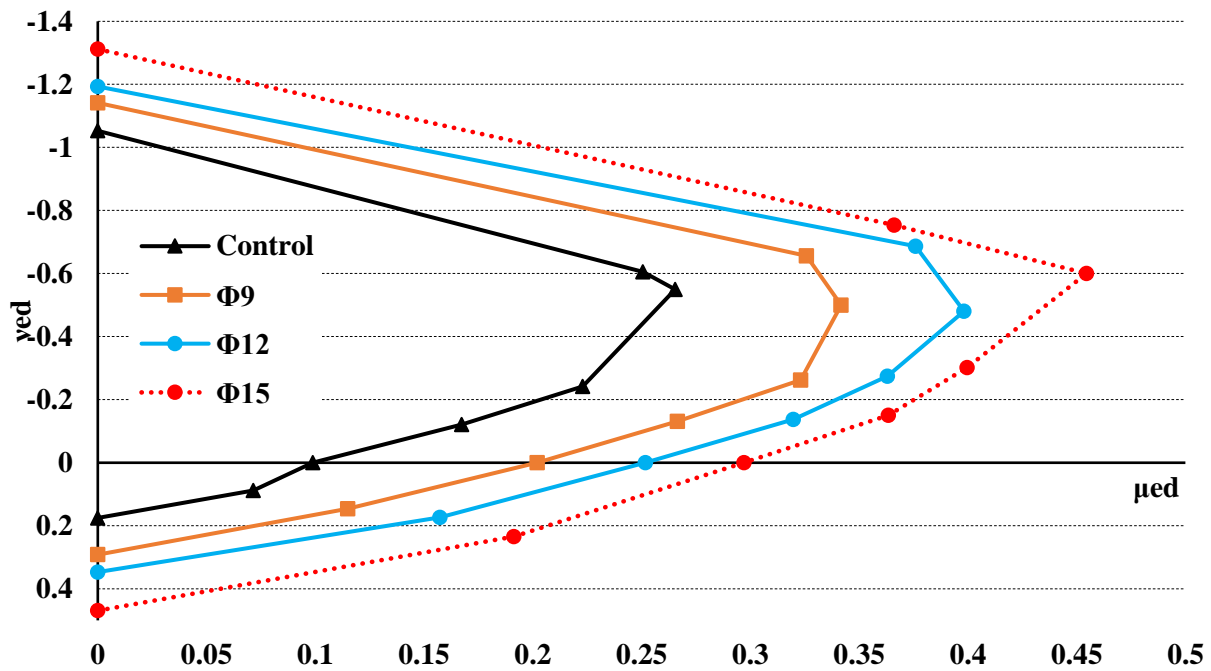
## 6.2 Παραμετροποίηση ως προς την διατομή Αι των στοιχείων ενίσχυσης NSM ανά μονάδα



Σχήμα 6.12: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση NSM-GFRP με διατομές  $\Phi 6$ ,  $\Phi 8$ ,  $\Phi 10$

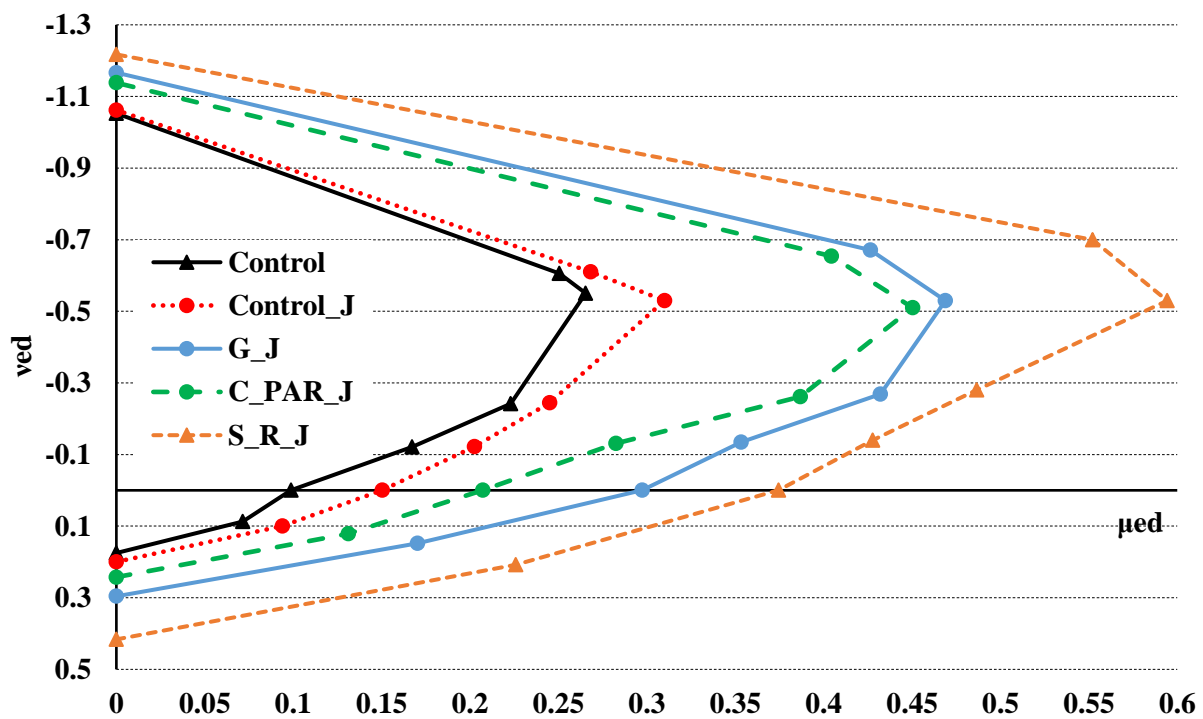


Σχήμα 6.13: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση NSM-CFRP με διατομές  $1.5 \times 12$ ,  $2 \times 16$ ,  $3 \times 16$

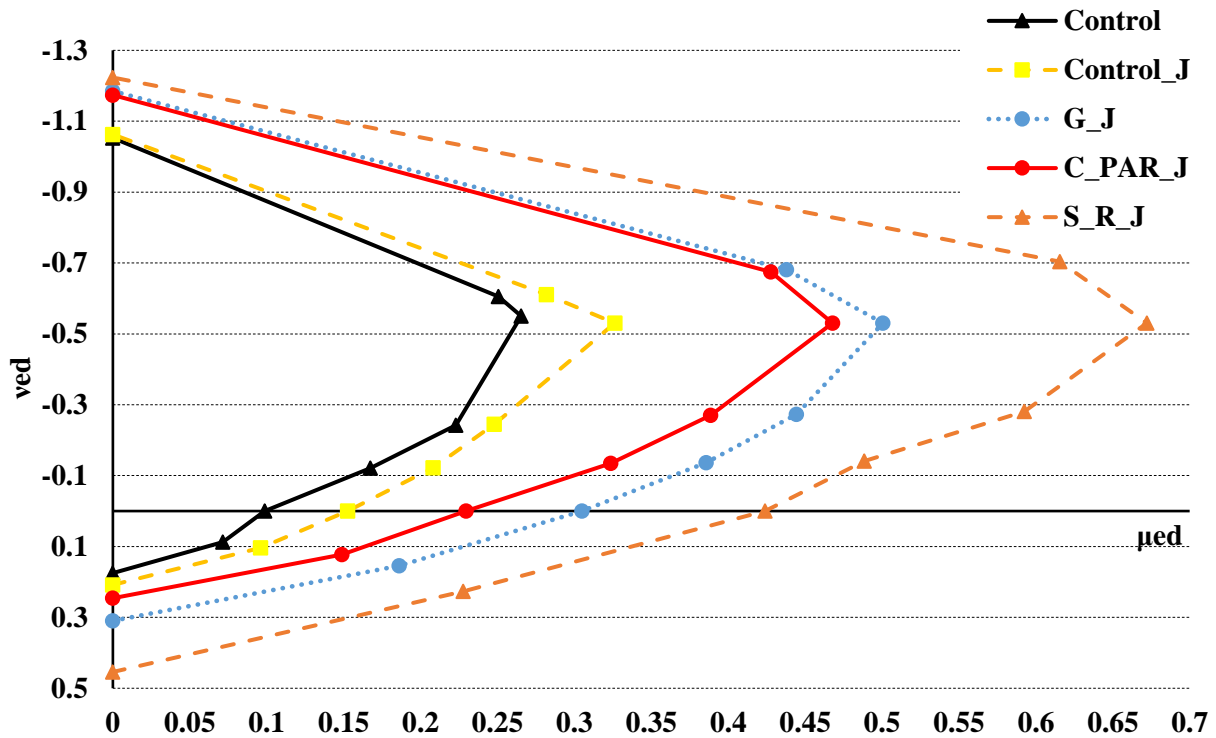


Σχήμα 6.14: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για ενίσχυση NSM-Stainless Steel με διατομές Φ9, Φ12, Φ15

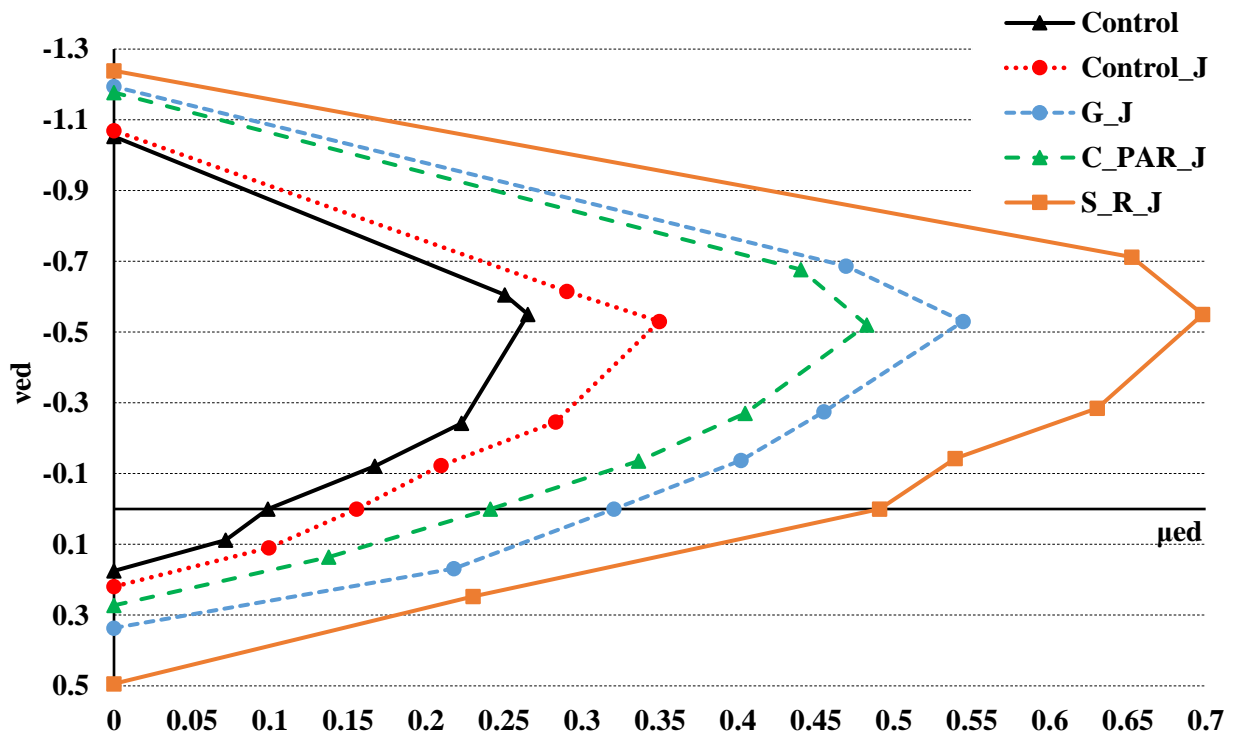
### 6.3 Παραμετροποίηση ως προς τον αριθμό $s$ των στρώσεων για την μέθοδο TRM



Σχήμα 6.15: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-TRM με  $s=2$  στρώσεις

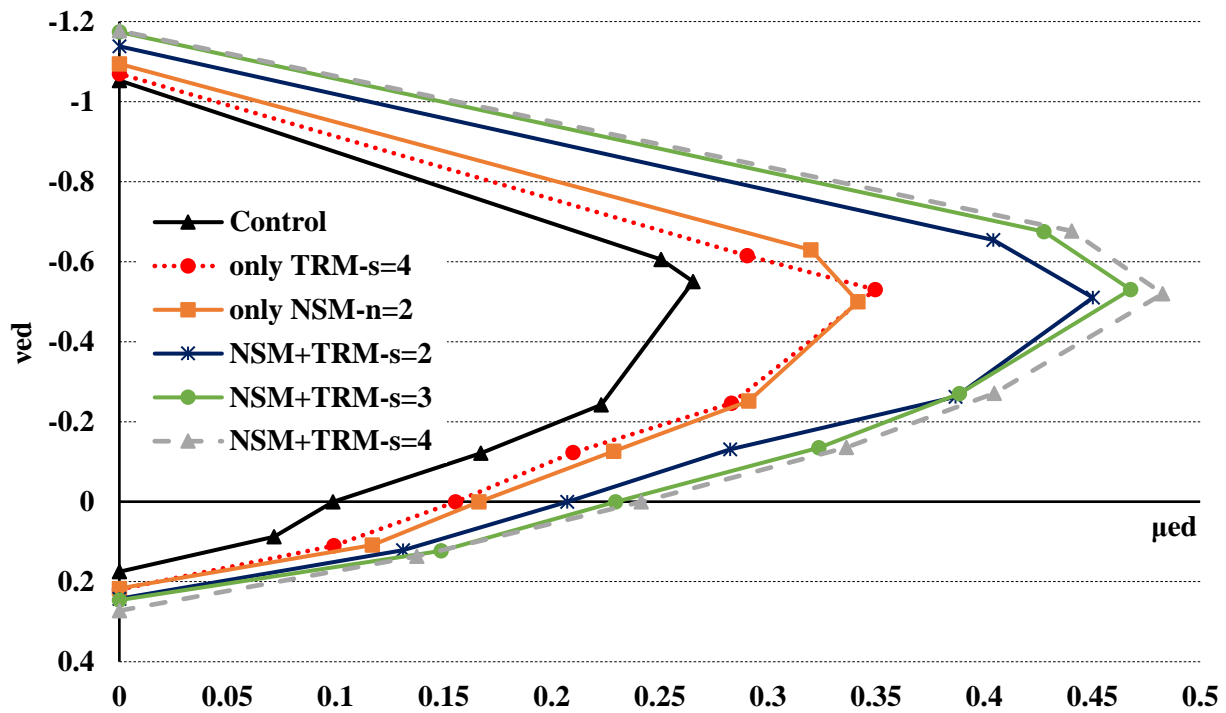


Σχήμα 6.16: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-TRM με  $s=3$  στρώσεις

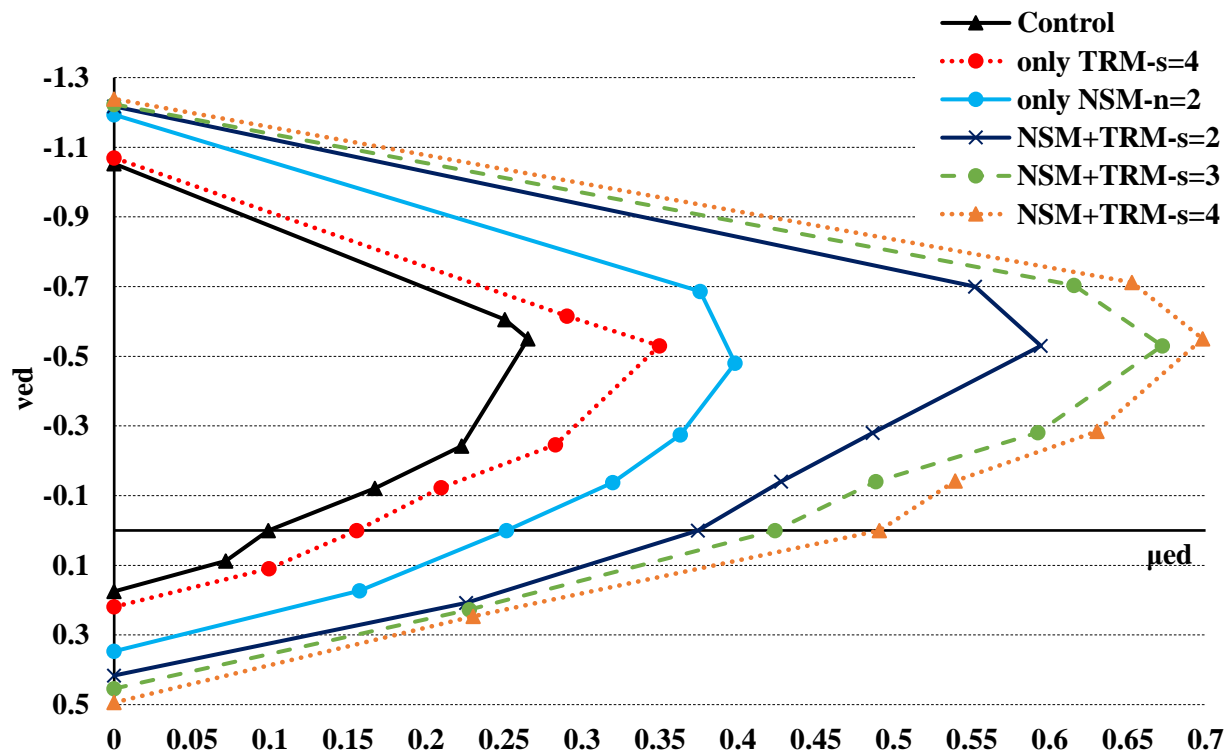


Σχήμα 6.17: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-TRM με  $s=4$  στρώσεις

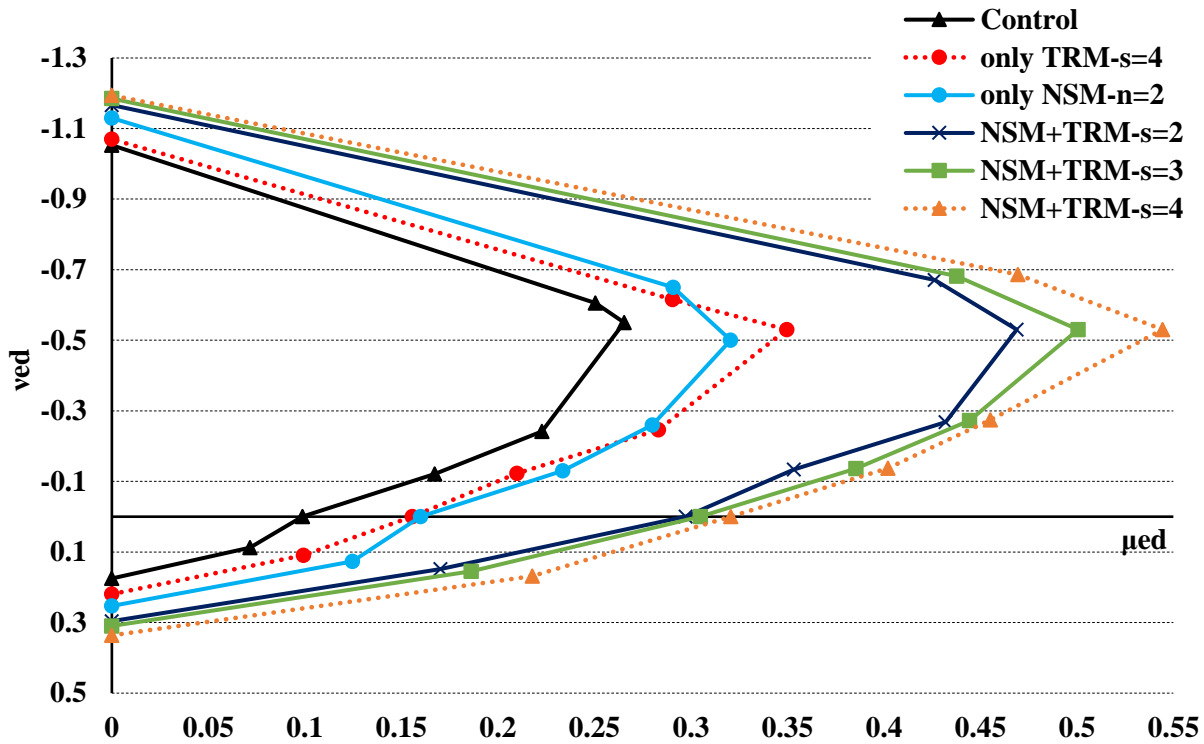




Σχήμα 6.18: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-CFRP/TRM

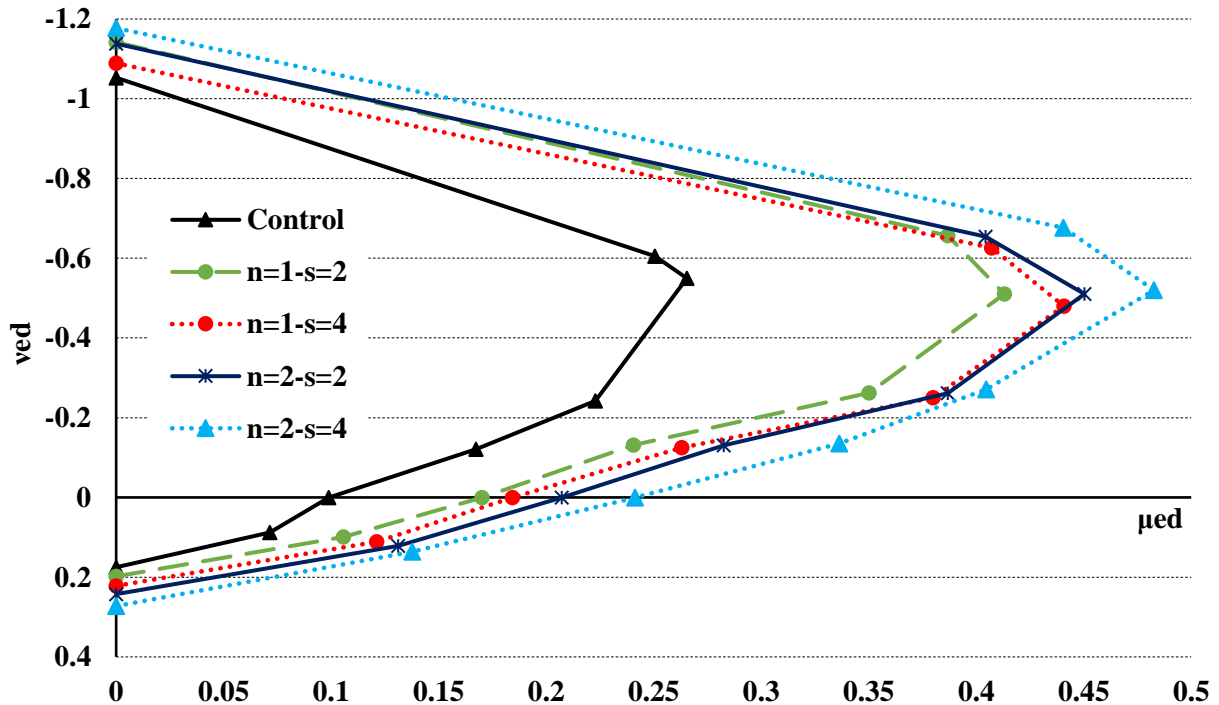


Σχήμα 6.19: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-Stainless Steel/TRM

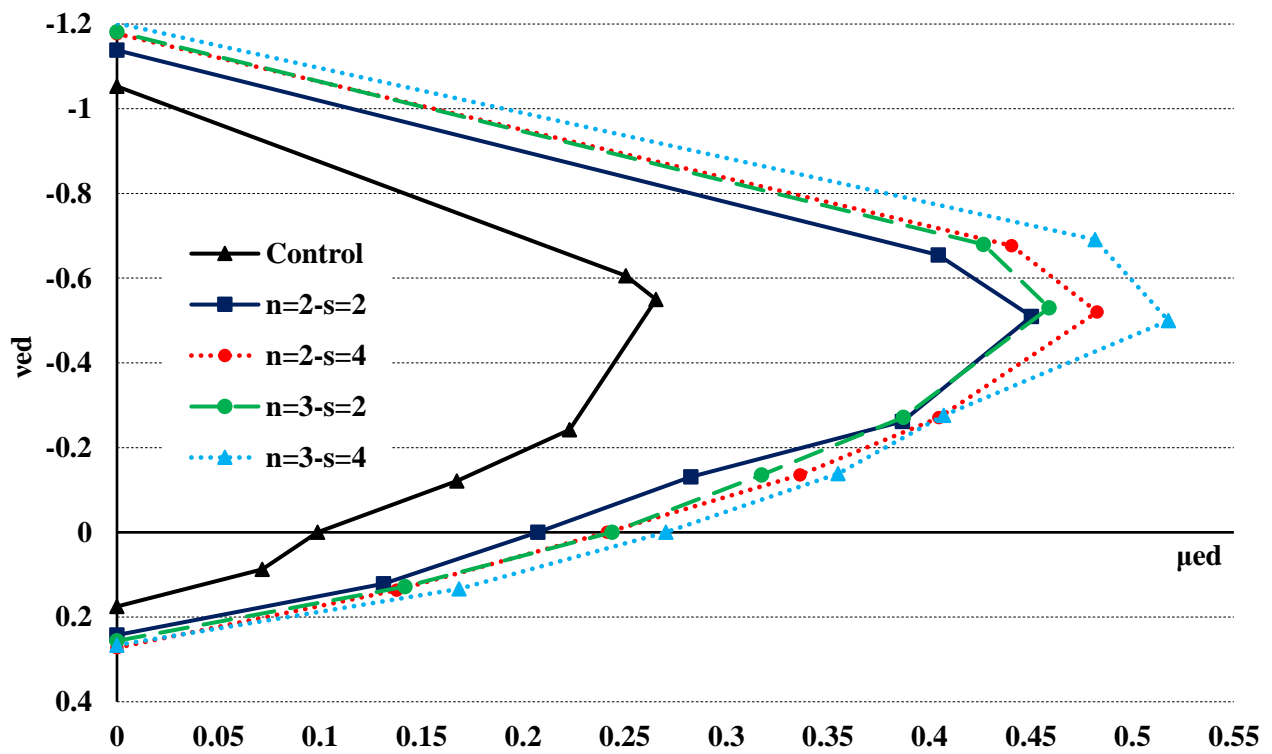


Σχήμα 6.20: Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για συνδυαστική ενίσχυση NSM-GFRP/TRM

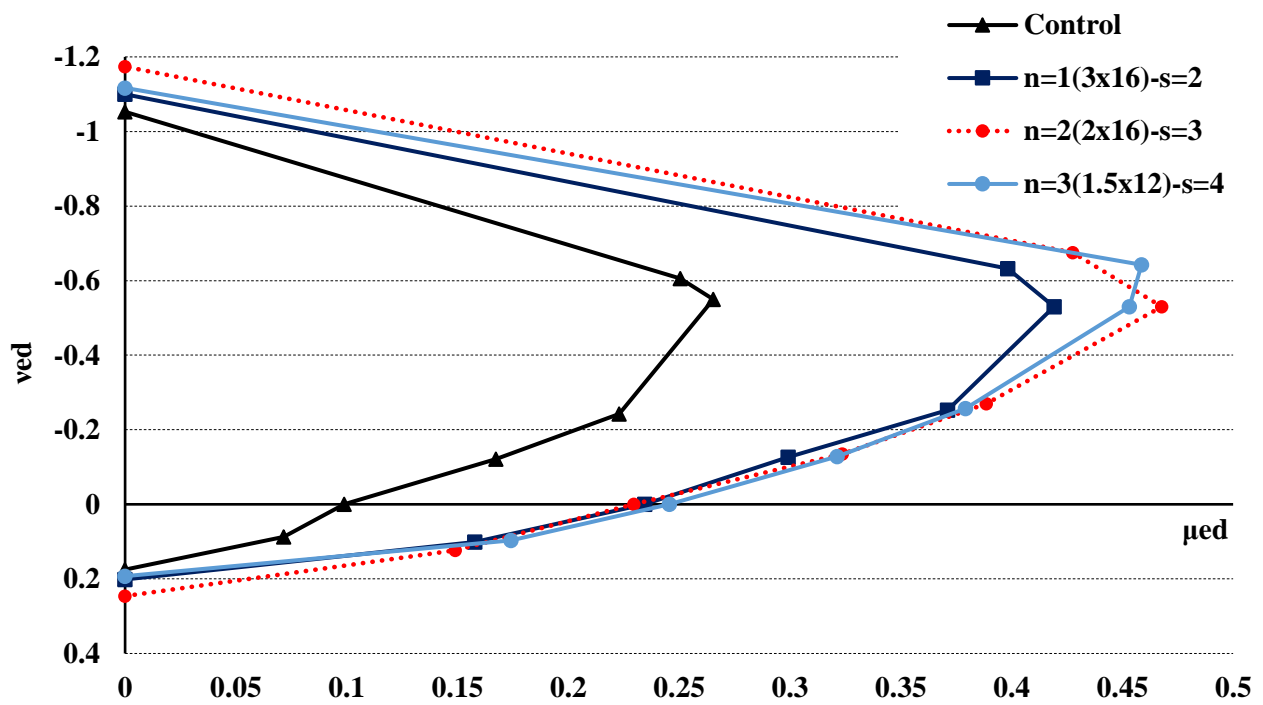
#### 6.4 Συγκριτικά σενάρια ενίσχυσης NSM-CFRP/TRM



Σχήμα 6.21: Συγκριτικά Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για NSM-CFRP με  $n=1,2$  και TRM με  $s=2, 4$



Σχήμα 6.22: Συγκριτικά Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για NSM-CFRP με  $n=2,3$  και TRM με  $s=2, 4$



Σχήμα 6.23: Συγκριτικά Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης για 3 διαφορετικούς συνδυασμούς ενίσχυσης με NSM-CFRP και TRM

## 6.5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με GFRP ή CFRP, παρατηρήθηκε θραύση του πρόσθετου οπλισμού ενώ σε αυτά όπου έγινε χρήση ράβδων ανοξειδωτου χάλυβα η σημαντική απομείωση της ικανότητας επήλθε λόγω αυξημένης πλαστικοποίησης του οπλισμού NSM με αποτέλεσμα την αδυναμία παραλαβής των επιπρόσθετων εφελκυστικών φορτίων και άρα την έντονη ρηγμάτωση του υποστρώματος.

Όπως είναι φυσιολογικό, για κάθε μία από τις περιπτώσεις παραμετροποίησης στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ως προς την μέθοδο NSM, εκείνη με το μεγαλύτερο ποσοστό οπλισμού είχε σαν αποτέλεσμα και την μεγαλύτερη αύξηση στην ροπή αντοχής. Αρχικά, μπορεί να υποτεθεί ότι είτε αύξηση της ίδιας της διατομής των στοιχείων είτε αύξηση του αριθμού των στοιχείων έχει πάντα τον ίδιο σκοπό – την αύξηση του εμβαδού ενίσχυσης. Όμως, είναι γνωστό πως, στην περίπτωση στοιχείων ενσωμάτωσης σε σκυρόδεμα ή άλλα υλικά με ζήτηση συνάφειας, μικρότερες διατομές / διαστάσεις των ενσωματωμένων στοιχείων συμβάλλουν στην ανάπτυξη μεγαλύτερων τάσεων συνάφειας. Πέραν αυτού, σε όρους φέρουσας ικανότητας παρατηρήθηκαν και πρέπει να τονισθούν τα εξής:

- Για κάθε συγκριτική περίπτωση, η ενίσχυση μόνο με NSM με ράβδους ανοξειδωτου χάλυβα ήταν αυτή με την μεγαλύτερη προοπτική αύξησης της αντοχής, έως και 86.91%. Σε τέτοια ποσοστά, παρατηρήθηκε αύξηση με τα υπόλοιπα δύο υλικά μόνο κατόπιν συνδυασμού NSM-TRM.
- Για το GFRP και τον ανοξειδωτο χάλυβα, αποδοτικότερη (26.76% και 86.91%) ήταν η μετάβαση από  $n=2$  σε  $n=3$  στοιχεία (αύξηση μεταξύ των περιπτώσεων κατά 4.94% και 24.59% αντίστοιχα) ανά πλευρά ενώ για την περίπτωση του CFRP αποδοτικότερη (28.73%) ήταν η μετάβαση από  $n=1$  σε  $n=2$  (αύξηση κατά 10.82%).
- Για τα διαγράμματα με σταθερό αριθμό στοιχείων ανά πλευρά και διαφοροποίηση στο είδος του στοιχείου, η παραμετροποίηση, έμμεσα, αφορούσε στην αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού χρήσης. Επομένως, για κάθε αύξηση του αριθμού  $n$  οι αυξήσεις στην φέρουσα ικανότητα ήταν 7.21%, 15.35% και 23.67% μεταξύ CFRP – GFRP, GFRP – Ανοξειδωτου Χάλυβα και CFRP – Ανοξειδωτου Χάλυβα.

Στην περίπτωση  $n=1$ , GFRP και CFRP προσέφεραν την ίδια τελική μέγιστη ροπή κάμψης ενώ η χρήση ανοξειδωτου χάλυβα δικαιολογούσε σε κάποιο βαθμό την

αλλαγή αυτή προσφέροντας τελική αύξηση (35.94%), μεγαλύτερη κατά 17.02% έναντι των άλλων δύο. Για  $n=2$  και 3, η χρήση CFRP προσέφερε μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την χρήση GFRP ενώ η υπεροχή του ανοξειδωτού χάλυβα και στις δύο αυτές περιπτώσεις μεταφραζόταν σε έως και 170% διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης.

- Για τις περιπτώσεις όπου έγινε αλλαγή στην διατομή των ενισχύσεων μέσω είτε αύξησης του αριθμού στοιχείων είτε αύξησης της διατομής του εκάστοτε στοιχείου, οι διαφοροποιήσεις στις τελικές ροπές αντοχής ήταν κατά βάση ομαλές και δικαιολογημένες, με μοναδική εξαίρεση την περίπτωση χρήσης  $n=3$  έναντι  $n=2$  (24.60% αύξηση ροπής) ράβδων ανοξειδωτού χάλυβα όπου η αντοχή αυξήθηκε κατά 161.64% σε σχέση με την μετάβαση από  $n=1$  σε  $n=2$  (10.36% αύξηση ροπής).
- Παρατηρήθηκε πως η χρήση μόνο της μεθόδου TRM προσέφερε σχεδόν ισάξια αύξηση αντοχής με την μέθοδο NSM, εκτός από την περίπτωση του δοκιμίου S\_R όπου η υπεροχή της NSM ήταν αισθητή. Φυσικά, ο συνδυασμός των δύο, ακόμα και στην απλούστερη περίπτωση με  $s=2$  στρώσεις TRM και  $n=1$  λωρίδα CFRP, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόκρισης ξεπερνώντας ακόμα και την ευμενέστερη περίπτωση οπλισμού μόνο με NSM, δηλαδή  $n=2$  ράβδους ανοξειδωτού χάλυβα (55.63% έναντι 50.02%).
- Για τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης όπου τα στοιχεία  $n$  και οι στρώσεις  $s$  παρέμειναν σταθερά, η διαφοροποίηση αφορούσε στο υλικό NSM δηλαδή στις μηχανικές ιδιότητες του επιπρόσθετου οπλισμού. Επομένως, όπως προαναφέρθηκε, η φέρουσα ικανότητα αυξανόταν ουσιαστικά κατά 7.21%, 15.35% και 23.67% μεταξύ CFRP – GFRP, GFRP – Ανοξειδωτού Χάλυβα και CFRP – Ανοξειδωτού Χάλυβα αντίστοιχα. Μεταξύ CFRP – GFRP, η διαφορά στην αύξηση της αντοχής ήταν 10.02% έως και 28.42% (αυξανόμενη με την διαδοχική προσθήκη στρώσεων  $s$ ). Στην περίπτωση επιλογής Ανοξειδωτού Χάλυβα έναντι GFRP, η αύξηση αφορούσε σε κατά μέσο όρο ποσοστό 63.23%, δηλαδή περίπου τετραπλάσια της αύξησης στην φέρουσα ικανότητα του στοιχείου έναντι εφελκυσμού. Ακόμα μεγαλύτερα ήταν τα ποσοστά βελτίωσης μεταξύ Ανοξειδωτού Χάλυβα έναντι CFRP με μέσο ποσοστό αύξησης 99.96%. Έτσι, όλες οι επιλογές ενίσχυσης με στοιχεία μεγαλύτερης αντοχής σε εφελκυσμό κρίθηκαν λογικές και δικαιολογημένες.

- Σχετικά με τα διαγράμματα όπου η ενίσχυση αφορούσε στο ίδιο υλικό στοιχείο NSM, μεταβάλλοντας την παράμετρο  $s$ , αρχικά, σημαντική υπεροχή της NSM μεθόδου έναντι της TRM παρατηρήθηκε μόνο κατά την χρήση ράβδων Ανοξειδωτου Χάλυβα και αυτό οφείλεται στην μεγάλη πλαστιμότητα του ανοξειδωτου χάλυβα έναντι της ψαθυρότητας (θραύσης) των ΙΟΠ. Επίσης, η αύξηση διαδοχικά των στρώσεων TRM οδηγούσε σε σταδιακή και λογική αύξηση της τελικής ροπής αντοχής (περίπου 16.52%), με μοναδική σημαντική αποχή από αυτό την περίπτωση αύξησης από  $s=2$  σε  $s=3$  με ταυτόχρονα  $n=2$  ράβδους Ανοξειδωτου Χάλυβα όπου η αύξηση (23.68%) ήταν σχεδόν τετραπλάσια της αντίστοιχης από  $s=2$  σε  $s=3$  (μόλις 6.37%). Πιθανή δικαιολογία: οι  $s=3$  στρώσεις TRM επαρκούσαν για την πλήρη εκμετάλλευση της ικανότητας των ράβδων ενώ η αύξηση σε 4 στρώσεις προσέδιδε επιπρόσθετη αντοχή κυρίως λόγω μόνο της ίδιας της προστιθέμενης στρώσης (όπου για  $s=1$  μετρήθηκε 7.32% αύξηση άρα δικαιολογημένη).

Την υψηλότερη αποδοτικότητα, όπως είναι προφανές, παρείχε ο συνδυασμός  $n=2$  ράβδων Ανοξειδωτου Χάλυβα και  $s=4$  στρώσεων TRM (162.99% αύξηση), ενώ την χαμηλότερη (η οποία παρόλα αυτά είναι επίσης ικανοποιητική)  $n=2$  CFRP λωρίδα και  $s=2$  στρώσεις TRM (55.63% αύξηση).

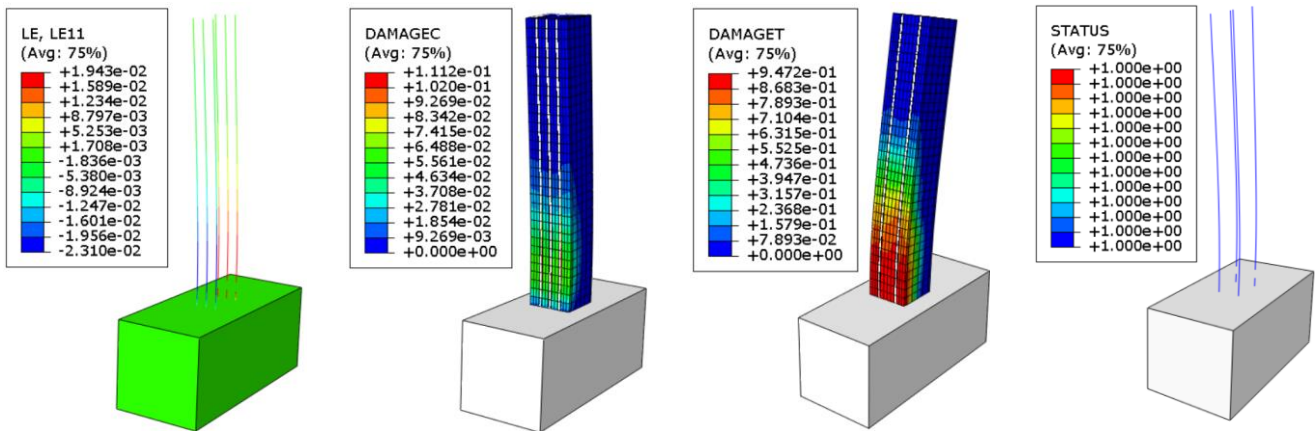
- Σε 2 περιπτώσεις με κοινή ενίσχυση TRM ( $s=2$ ) και ίδια αύξηση του συνολικού εμβαδού ενίσχυσης (κατά 50%) αλλά με διαφορετικό τρόπο ( $n=1-2 \times 16 \rightarrow n=1-3 \times 16$  και  $n=2-2 \times 16 \rightarrow n=3-2 \times 16$ ), δηλαδή με αύξηση κατά 50% είτε του αριθμού των στοιχείων είτε της διατομής  $A_i$  του κάθε στοιχείου, επιτεύχθηκε παρόμοια αύξηση της αντοχής, 4.10% και 4.97% για την αύξηση της διατομής  $A_i$  και του αριθμού  $n$  αντίστοιχα. Η μικρή διαφορά θα μπορούσε να δικαιολογηθεί αλλά και να αποδείξει ταυτόχρονα έναν αρχικό ισχυρισμό που είναι κοινώς αποδεκτός: ότι δηλαδή περισσότερα ενσωματωμένα στοιχεία με μικρότερες διατομές παρουσιάζουν ισχυρότερους δεσμούς (τάση συνάφειας) με το υλικό σύνδεσης άρα και πιθανώς καλύτερη συμπεριφορά.
- Στα τρία τελευταία διαγράμματα (σχήματα 6.21 έως 6.23), οι αναλύσεις επικεντρώθηκαν γύρω από την περίπτωση ενίσχυσης με την δυσμενή διάταξη λωρίδων CFRP για κάμψη περί τον ασθενή άξονα, ώστε να διερευνηθούν λύσεις δυνατότητας εκμετάλλευσης της μέγιστης φέρουσας ικανότητας που παρέχουν τέτοια στοιχεία NSM σε ένα αρκετά διαδεδομένο σενάριο της πραγματικότητας

(μη επάρκεια επικάλυψης του σκυροδέματος). Στα δύο αρχικά διαγράμματα συγκρίθηκαν  $n=1, 2$  και  $3$  NSM στοιχεία με ταυτόχρονα TRM  $s=2$  και  $4$  στρώσεις. Φάνηκε πως η ενίσχυση με λιγότερα στοιχεία NSM αλλά περισσότερες στρώσεις TRM παρείχε παραπλήσια ή και μεγαλύτερη ροπή αντοχής σε σχέση με ενίσχυση με περισσότερα στοιχεία NSM αλλά λιγότερες στρώσεις TRM. Αναλυτικότερα, στο μοντέλο με  $2$  λωρίδες CFRP και  $2$  στρώσεις TRM (τελική  $69.66\%$ ) υπολογίστηκε αύξηση μόλις  $5.57\%$  σε σχέση με το μοντέλο με  $1$  λωρίδα CFRP και  $4$  στρώσεις TRM (τελική  $66.07\%$ ). Επίσης, στο μοντέλο με  $2$  λωρίδες CFRP και  $4$  στρώσεις TRM η αύξηση (τελική  $81.84\%$ ) ήταν  $12.51\%$  μεγαλύτερη σε σχέση με το μοντέλο με  $3$  λωρίδες CFRP και  $2$  στρώσεις TRM (τελική  $72.92\%$ ).

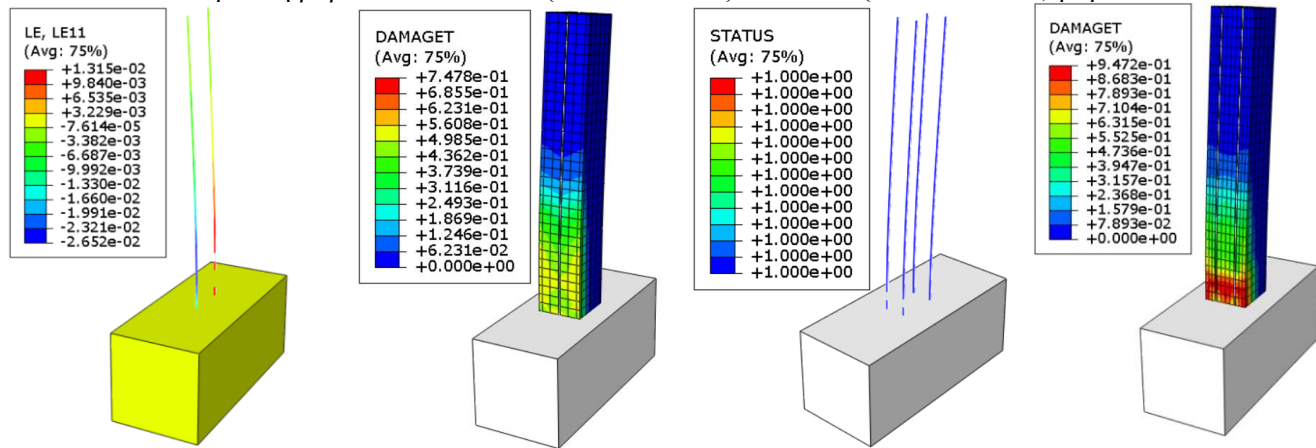
Στο τελευταίο διάγραμμα, συγκρίθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ως προς τις παραμέτρους  $n$  και  $s$ . Η διαφορά μεταξύ του  $n=1(3 \times 16)-s=2$  και των άλλων δύο δοκιμίων φάνηκε δικαιολογημένη λόγω της μικρότερης συνολικής διατομής ενίσχυσης και των λιγότερων στρώσεων TRM (μειωμένη ροπή αντοχής κατά  $8.92\%$ ). Για την περίπτωση  $n=2(2 \times 16)-s=3$  υιοθετήθηκαν οι ενδιάμεσες τιμές για κάθε παράμετρο ( $n, A_i, s$ ) και διαπιστώθηκε πως έστω και οριακά παρείχε την μεγαλύτερη αύξηση στην αντοχή ( $76.25\%$  έναντι  $70.73\%$ ). Τα παραπάνω λοιπόν, σημειώνουν την σημασία που έχει η χρήση (και μάλιστα η εμπεριστατωμένη) της μεθόδου TRM για την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των στοιχείων NSM. Μπορούν να θεωρηθούν (όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως) επίσης απόδειξη του γιατί συνηθίζεται να επιλέγεται μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων ενίσχυσης έναντι απλής αύξησης της διατομής του στοιχείου αυτού για παραπλήσια ποσοστά αύξησης της αντοχής.

- Υπολογισμός Ροπής Αντοχής Control Δοκιμίου για  $N=0$  με αναλυτική μέθοδο:  $x=21.52\text{mm} \rightarrow \varepsilon_s'=-0.00025 \rightarrow N=0.026\text{ kN} \rightarrow M=M_{\max}=31.504\text{ kNm}$  (μέσω του Abaqus  $39.83\text{ kNm} \rightarrow 19.51\%$  απόκλιση, ANEKTH).
- Υπολογισμός Μέγιστης Ροπής Αντοχής Control Δοκιμίου με αναλυτική μέθοδο:  $x=150.2\text{mm} \rightarrow \varepsilon_s'=-0.00303 \rightarrow N=-888.7\text{kN} \rightarrow M=M_{\max}=99.62\text{ kNm}$  (μέσω του Abaqus  $107.10\text{ kNm} \rightarrow 6.55\%$  απόκλιση, ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΗ).
- Στα σχήματα 6.24-6.30, φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές αστοχίες μετά από τις παραπάνω μονοτονικές αναλύσεις.

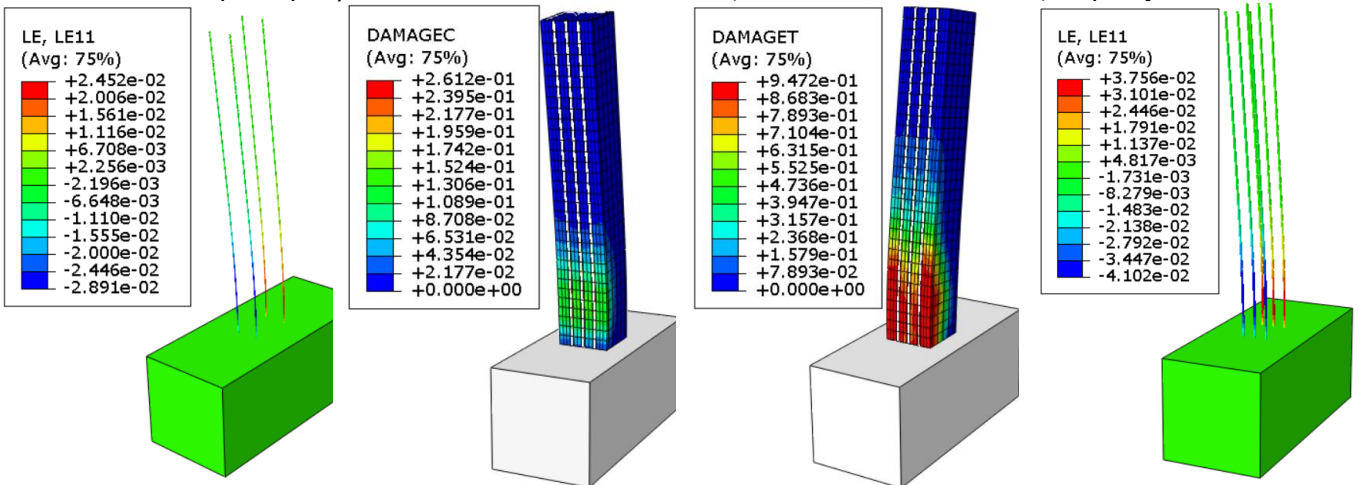
- Στον πίνακα 6.3, συγκεντρώνονται όλα τα τελικά αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων μαζί με τα δεδομένα ενίσχυσης του κάθε δοκιμίου.



Θραύση ράβδων GFRP: 3Φ8 ( $u_{max}=122\text{mm}$ ) και 2Φ10 ( $u_{max}=139\text{mm}$ ) ράβδοι



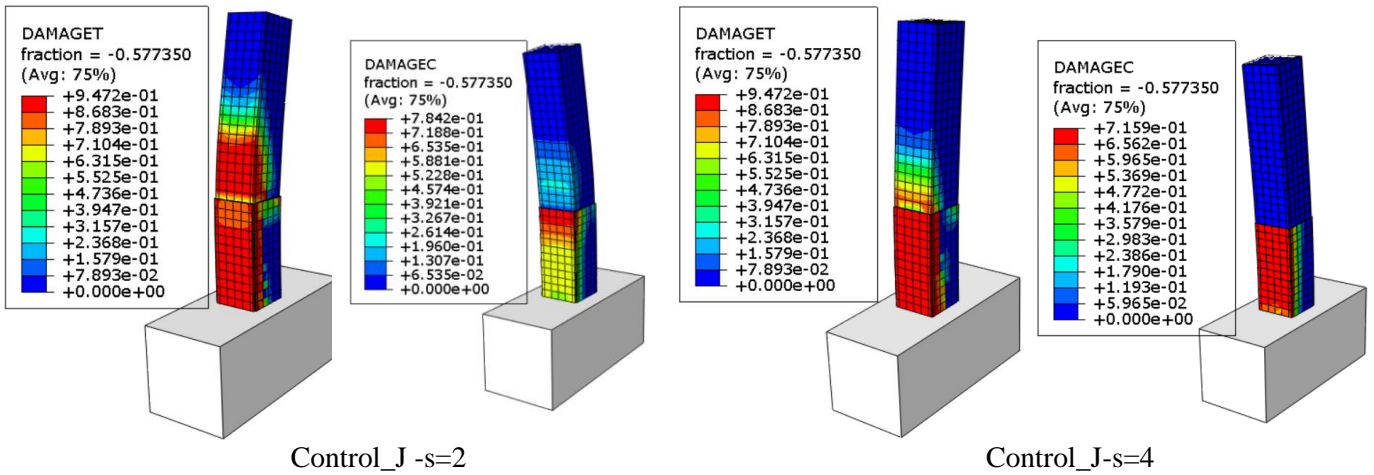
Θραύση λωρίδων CFRP: 2x16 ( $u_{max}=88\text{mm}$ ) και 3x16 ( $u_{max}=116\text{mm}$ ) λωρίδες



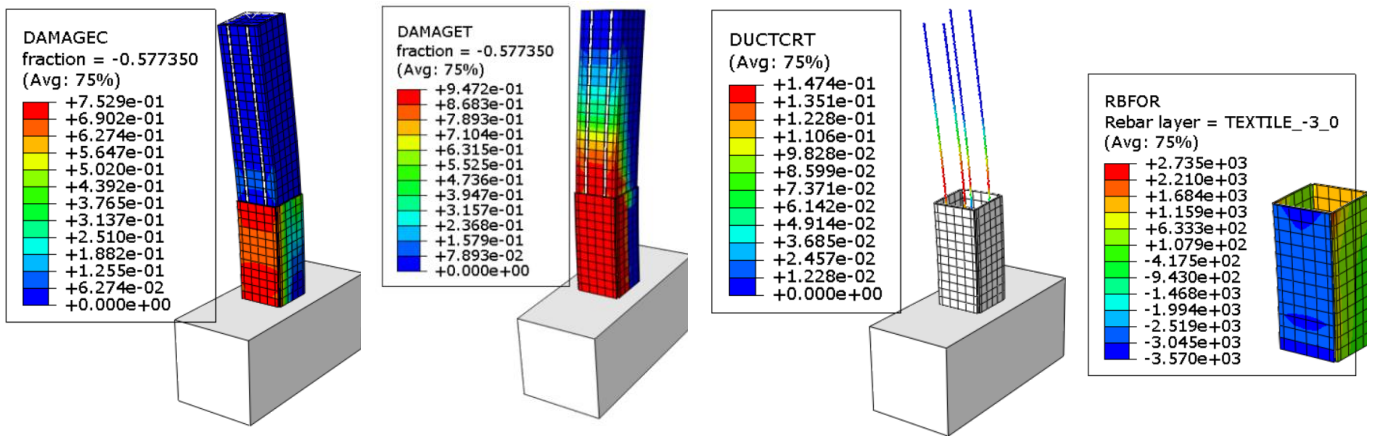
Πλαστικοποίηση ράβδων Ανοξειδωτου Χάλυβα: 2Φ9 ( $u=141\text{mm}$ ) και 3Φ12 ( $u=188\text{mm}$ ) ράβδοι

Σχήμα 6.24: Αστοχίες σε δοκίμια ενισχυμένα μόνο με NSM

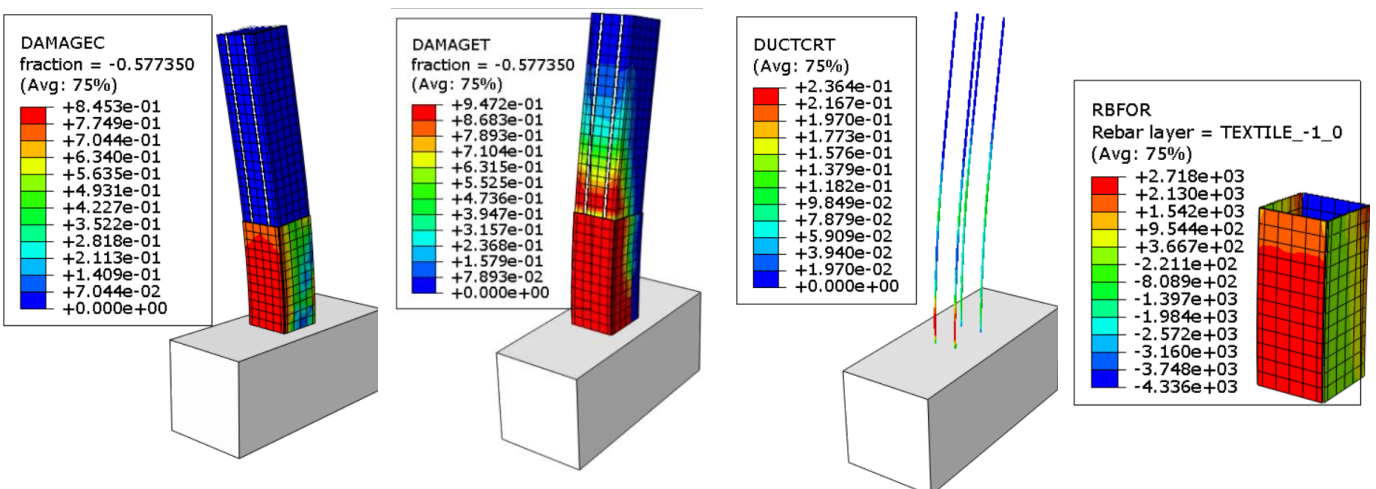




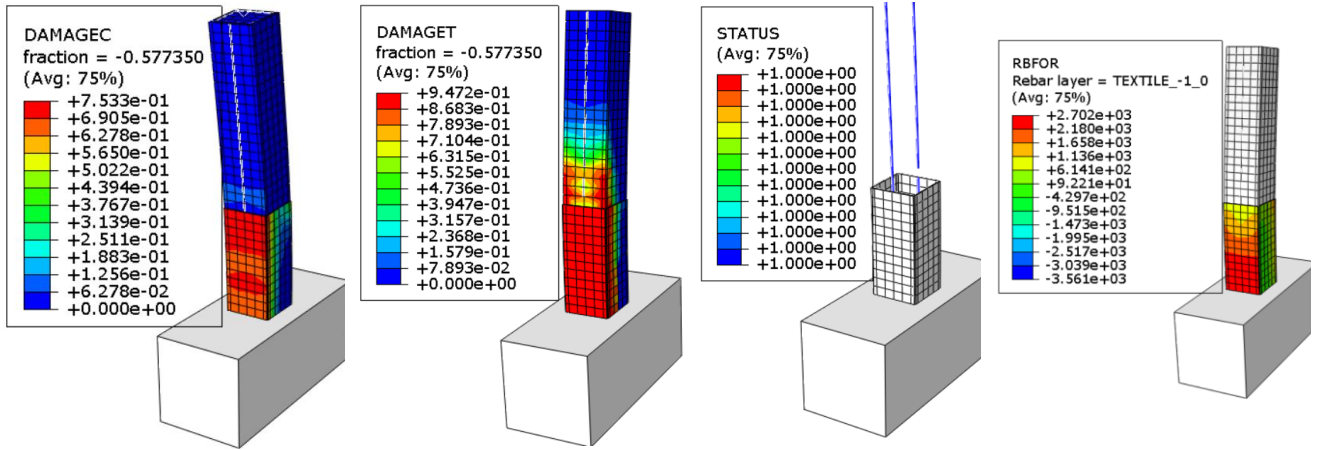
Σχήμα 6.25: Αστοχία δοκιμίων μόνο με ενίσχυση TRM ( $u_{max}=120mm$ )



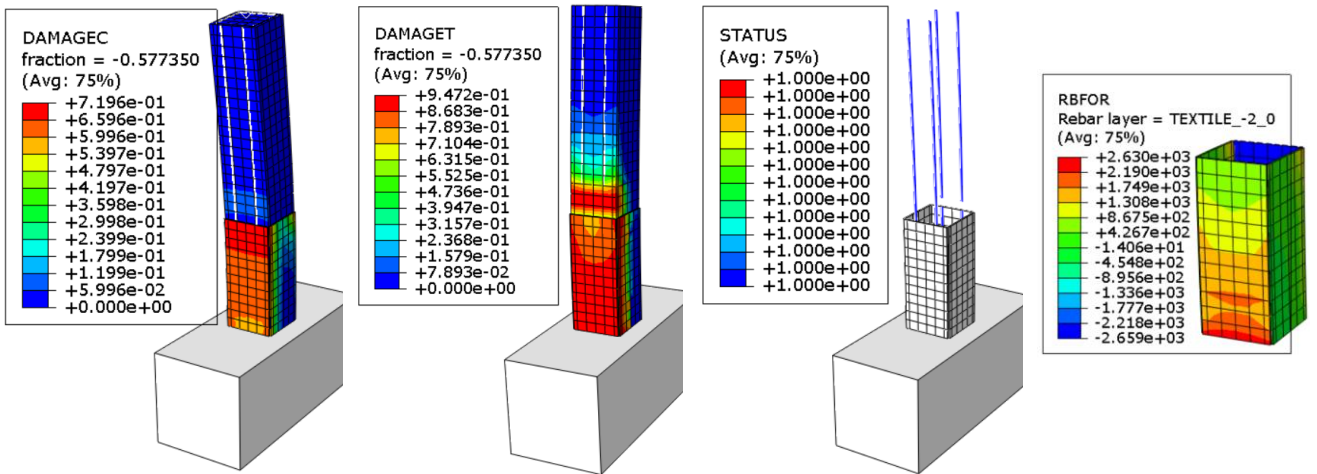
Σχήμα 6.26: Αστοχία δοκιμίου με NSM-Ανοξειδωτο Χάλυβα 2Φ12 και TRM-s=4 ( $u=209mm$ )



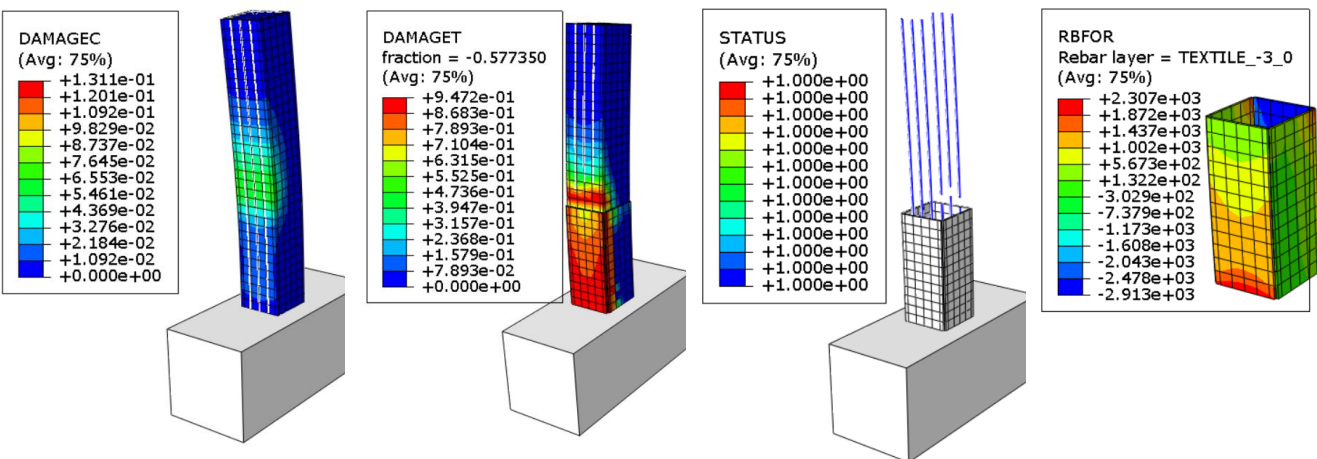
Σχήμα 6.27: Αστοχία δοκιμίου με NSM-Ανοξειδωτο Χάλυβα 2Φ12 και TRM-s=2 ( $u=172mm$ )



Σχήμα 6.28: Αστοχία δοκιμίου με NSM-1 λωρίδα CFRP 3x16 και TRM-s=2 (u=95mm→θραύση NSM)



Σχήμα 6.29: Αστοχία δοκιμίου με NSM-2 λωρίδες CFRP 2x16 και TRM-s=3 (u=108mm→θραύση NSM)



Σχήμα 6.30: Αστοχία δοκιμίου με NSM-3 λωρίδες CFRP 1.5x12 και TRM-s=4 (u=106mm→θραύση NSM)

NSM			TRM	Nmax -	Αύξηση από Control (%)	Mmax	Αύξηση από Control (%)
Στοιχείο	n	Διατομή(mm <sup>2</sup> )	s	(kN)		(kNm)	
-	-	-	-	1952.21	-	107.01	-
-	-	-	1	1958.03	0.30	114.84	7.32
-	-	-	2	1969.15	0.87	124.98	16.79
-	-	-	3	1970.55	0.94	130.55	22.00
-	-	-	4	1983.62	1.61	140.96	31.73
GFRP bar	1	Φ8	-	1983.62	1.61	123.97	15.85
GFRP bar	2	Φ6	-	1984.20	1.64	118.13	10.39
GFRP bar	2	Φ8	-	2094.93	7.31	129.25	20.78
GFRP bar	2	Φ8	2	2163.11	10.80	189.02	76.64
GFRP bar	2	Φ8	3	2197.53	12.57	201.82	88.60
GFRP bar	2	Φ8	4	2214.01	13.41	219.48	105.10
GFRP bar	2	Φ10	-	2052.20	5.12	139.64	30.49
GFRP bar	3	Φ8	-	2261.80	15.86	135.64	26.76
CFRP strip	1	2 x 16	-	2009.41	2.93	124.31	16.17
CFRP strip	1	2 x 16	2	2011.74	3.05	166.54	55.63
CFRP strip	1	2 x 16	4	2019.55	3.45	177.71	66.07
CFRP strip	1	3 x 16	2	2039.31	4.46	168.98	57.91
CFRP strip	2	1.5 x 12	-	1983.22	1.59	130.82	22.25
CFRP strip	2	2 x 16	-	2029.23	3.95	137.76	28.73
CFRP strip	2	2 x 16	2	2110.54	8.11	181.55	69.66
CFRP strip	2	2 x 16	3	2176.71	11.50	188.60	76.25
CFRP strip	2	2 x 16	4	2183.03	11.82	194.59	81.84
CFRP strip	2	3 x 16	-	2094.28	7.28	147.06	37.42
CFRP strip	3	1.5 x 12	4	2071.05	6.09	182.70	70.73
CFRP strip	3	2 x 16	-	2106.19	7.89	142.03	32.72
CFRP strip	3	2 x 16	2	2191.17	12.24	185.04	72.92
CFRP strip	3	2 x 16	4	2229.11	14.18	208.73	95.06
Stainless Steel bar	1	Φ12	-	2095.74	7.35	145.47	35.94
Stainless Steel bar	2	Φ9	-	2116.55	8.42	137.76	28.74
Stainless Steel bar	2	Φ12	-	2212.99	13.36	160.54	50.02
Stainless Steel bar	2	Φ12	2	2257.53	15.64	239.59	123.89
Stainless Steel bar	2	Φ12	3	2268.41	16.20	270.98	153.23
Stainless Steel bar	2	Φ12	4	2297.01	17.66	281.43	162.99
Stainless Steel bar	2	Φ15	-	2432.34	24.59	183.24	71.24
Stainless Steel bar	3	Φ12	-	2387.32	22.29	200.01	86.91

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων Διαγραμμάτων Αλληλεπίδρασης



## 7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

### 7.1 ΣΥΝΟΨΗ

Ανακεφαλαιώνοντας, αποδείχθηκε πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά, ακόμα και με σημαντικές απλοποιήσεις, ένα πρόβλημα ενίσχυσης υποστυλωμάτων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Οι απλοποιήσεις αυτές θεωρήθηκαν υποχρεωτικές προκειμένου οι αναλύσεις να έχουν διερευνητικό χαρακτήρα και να μπορέσουν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα υπό ανεκτό υπολογιστικό κόστος. Μέσα από ξεχωριστές αναλύσεις, τονίσθηκε η σημασία της χρήσης του ABAQUS/Explicit solver για την αξιόπιστη επίλυση του προβλήματος. Το μοντέλο Concrete Damage Plasticity απέδωσε, μετά από την απαραίτητη βαθμονόμηση των παραμέτρων  $\phi$ ,  $K_c$ ,  $E$  και  $G_f$ , αλλά και την σύγκριση ορισμένων μοντέλων της βιβλιογραφίας, πολύ καλά την μορφή των βλαβών στα δοκίμια. Σε συνδυασμό με την απλούστερη προσομοίωση για τα υλικά και τα στοιχεία ενίσχυσης καθώς και την χρήση στοιχείων C3D8R-Enhanced Hourglass Control για το σκυρόδεμα (μέσα από την κατά τ' άλλα πληθώρα επιλογών του ABAQUS), οι τελικές υστερητικές καμπύλες αποδόθηκαν με την καλύτερη – ιδανικότερη σχέση ακρίβειας αποτελεσμάτων και υπολογιστικού κόστους. Με εξαίρεση την αστοχία λόγω λυγισμού του NSM οπλισμού, θραύση και πλαστικοποίηση παρατηρήθηκαν στο μοντέλο, δίνοντας έτσι μία πολύ καλή εικόνα της τελικής κατάστασης των δοκιμίων. Επομένως, είναι σημαντικό να τονισθεί πως όλα τα αποτελέσματα αποτελούν προσεγγίσεις και σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να υιοθετούνται άκριτα χωρίς περαιτέρω έλεγχο. Άλλωστε πάντα ο μελετητής πρέπει να ελέγχει και να κατευθύνει το λογισμικό και ποτέ το αντίστροφο.

Για εμβάθυνση και διερεύνηση, έγιναν μονοτονικές φορτίσεις με απώτερο στόχο την κατασκευή των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης για τα υποστυλώματα λαμβάνοντας υπόψη διάφορες περιπτώσεις ως προς τον τρόπο και τον συνδυασμό των ενισχύσεων με NSM και TRM. Ορίσθηκαν οι παράμετροι  $n$  και  $s$  για τον αριθμό των στοιχείων NSM και των στρώσεων TRM ανά πλευρά της εκάστοτε ενίσχυσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, θεωρήθηκε δεδομένη η αύξηση της ροπής αντοχής με κάθε είδους επέμβαση. Φυσικά, η συνδυαστική εφαρμογή NSM και TRM πολλαπλασίαζε τα αντίστοιχα αποτελέσματα με χρήση είτε της μίας είτε της άλλης. Ενώ οι ενισχύσεις με ανοξείδωτο χάλυβα υπερτερούσαν ξεκάθαρα έναντι των υπολοίπων (άλλωστε εξ αρχής είναι γνωστή η αυξημένη αντοχή τους κατά 15.35% και 23.67% επομένως

δικαιολογημένη και λογική) σε κάθε σενάριο που διερευνήθηκε, το ίδιο δεν συνέβαινε και μεταξύ CFRP-GFRP. Η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής των GFRP ράβδων έναντι των λωρίδων CFRP κατά 7.21% μετουσιωνόταν σε περίπου αντίστοιχη αύξηση της ροπής αντοχής μόνο στις περιπτώσεις συνδυασμού των 2 μεθόδων. Αντίθετα, με χρήση μόνο NSM στοιχείων, η ενίσχυση μέσω λωρίδων CFRP φάνηκε πως παρέχει καλύτερη ενίσχυση, όμως όπως προαναφέρθηκε, θα πρέπει τα συγκεκριμένα αποτελέσματα να μην κρίνονται μονοδιάστατα, ειδικά λόγω του γεγονότος πως δεν ήταν δυνατή η προσομοίωση της αστοχίας λόγω λυγισμού, στην οποία οι λωρίδες αυτές είναι επιρρεπείς. Επιπλέον, μέσα από ορισμένους συνδυασμούς των 2 μεθόδων, επιχειρήθηκε να τονισθεί πόσο σημαντικό κομμάτι της ενίσχυσης είναι η μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης της φέρουσας ικανότητας των στοιχείων που προστίθενται προκειμένου αυτή να ορισθεί επιτυχής. Η αλόγιστη αύξηση των διατομών θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικό ποσοστό αύξησης, όμως αποδείχθηκε πως παρόμοιο ποσοστό μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς και πολλές φορές και οικονομικότερους τρόπους. Τελικά, αν και τα παρεχόμενα διαγράμματα αλληλεπίδρασης δίνουν μία σαφή και σημαντική εκτίμηση των τελικών καταστάσεων, αυτή η εκτίμηση παραμένει πάντα προσεγγιστική και θα πρέπει να τεκμηριώνεται μέσα από αναλυτικότερη έρευνα.

## 7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ

1. Σαν συγκριτική με την παρούσα εργασία θα μπορούσε να θεωρηθεί μία αντίστοιχη μελέτη αλλά με λεπτομερέστερη και αναλυτικότερη προσπάθεια προσομοίωσης (δηλαδή με προσπάθεια εξάλειψης όσο το δυνατόν περισσότερων απλοποιητικών παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν) έτσι ώστε να διερευνηθεί η διαφοροποίηση ή όχι και σε τι ποσοστό στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και φυσικά πάντα συναρτήσει του κόστους των υπολογισμών.
2. Μία εύκολη συμπλήρωση της εργασίας θα αποτελούσε η επέκταση των δεδομένων ως προς τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία σχετικά με τις ενισχύσεις NSM και TRM, δηλαδή ακόμα περισσότερα υλικά για τις ράβδους ενίσχυσης και τα ινοπλέγματα, όπως επίσης και διερεύνηση περιπτώσεων με διαφορετική γεωμετρία υποστρωμάτων, αντοχή σκυροδέματος και κλάση ή/και ποσοστό οπλισμού.
3. Καθώς στην συγκεκριμένη εργασία καλύφθηκε το θέμα της ενίσχυσης υποστρωμάτων σε προσεισμική κατάσταση δηλαδή με ασήμαντες ή

μηδενικές τυπικές βλάβες, θα μπορούσε να διερευνηθεί η περίπτωση μετασεισμικής ενίσχυσης, ως προς την καμπτική τους αντοχή, των υποστυλωμάτων δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη απομειώσεις στις υπάρχουσες αντοχές και φαινόμενα ρηγματώσεων και διάβρωσης των υλικών. Οπότε εισάγονται οι έννοιες της διάβρωσης άρα και απομείωση μηχανικών ιδιοτήτων λόγω διάβρωσης αλλά και της προσθήκης νέων στρώσεων σκυροδέματος άρα της διεπιφάνειας μεταξύ υπάρχοντος και νέου σκυροδέματος.





## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Abaqus 6.14 Documentation.
- [2] ACI Committee 318 (1989), Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89), Detroit, American Concrete Institute.
- [3] Alfarah B, Lopez-Almansa F, Oller S, (2017), New methodology for calculating damage variables evolution in plastic damage model for RC structures, *Engineering Structures* 132: 70–86.
- [4] Azadeh, P. and Mohannad, A. (2022), Finite-element analysis of textile-reinforced mortar strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams, *Journal of Composites for Construction*, American Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 4.
- [5] Barros J AO, Ferreira D RSM, Fortes A S, Dias S JE, (2006), Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, Pages 478-491.
- [6] Belarbi A, Hsu TT, (1994), Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete, *ACI Struct J* ;91(4).
- [7] Bournas, D. A., and T. C. Triantafyllou, (2009), Flexural strengthening of RC columns with NSM FRP or stainless steel, *ACI Struct. J.* 106 (4): 495–505.
- [8] Cuong-Le, T., Le-Minh, H., & Sang-To, T. (2022). A nonlinear concrete damaged plasticity model for simulation reinforced concrete structures using ABAQUS. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 59, 232-242.
- [9] D'Antino T, Pisani M., (2017), Evaluation of the effectiveness of current guidelines in determining the strength of RC beams retrofitted by means of NSM reinforcement. *ComposStruct*, 167:166–77.
- [10] Dehestani M., Mousavi S., (2015), Modified steel bar model incorporating bond–slip effects for embedded element method, *Build Mater* 81:284–290.
- [11] de Terán J.R.D., Haach V.G., (2018), Equivalent stress-strain law for embedded reinforcements considering bond-slip effects, *Eng Struct* 165:247–253.
- [12] European Committee for Standardization, EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium.
- [13] Fardis MN, (2009) Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings: based on EN-Eurocode 8, Springer Science & Business Media.
- [14] fib: Model Code 2010 – Final draft, Volume 1, fib Bulletin, No. 65, 2012.
- [15] Filippou C. A., Chrysostomou C. Z., (2020), Analytical model for textile reinforced mortar under monotonic loading, *Construction and Building Materials*.
- [16] Genikomsou A.S., (2015), Nonlinear finite element analysis of punching shear of reinforced concrete slab-column connections, PhD, University of Waterloo.
- [17] Genikomsou, A.S., Polak, M.A. (2015) Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *ENG STRUCT* 98:38-48.
- [18] Hordijk DA., (1992), Tensile and tensile fatigue behavior of concrete; experiments, modeling and analyses, *Heron*:37(1):3–79.
- [19] Lee, J., Fenves, G.L. (1998). Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *J. Eng. Mech.*, 124(8), pp. 892–900.

- [20] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of solids and structures* 25, pp. 299-326.
- [21] Mander, J. M., Priestley M. J. N, Park R., (1988), Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. Struct. Eng.*, 114 (8): 1804–1826.
- [22] Markou, G., and M. Al Hamaydeh, (2018), 3D finite element modeling of GFRP-reinforced concrete deep beams without shear reinforcement. *Int. J. Comput. Methods* 15 (2): 1850001.
- [23] Martin O., (2010), Comparison of different Constitutive Models for Concrete in ABAQUS/Explicit for Missile Impact Analyses, EUR 24151 EN, Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union.
- [24] Mourlas C, (2019), An Accurate and Computationally Efficient Three-Dimensional Nonlinear Model for the Analysis of Large-Scale RC Structures Subjected to Cyclic and Dynamic Loading Conditions, National Technical University of Athens, PhD thesis.
- [25] Mussche H. (2018), Development of a reliable and efficient 3D calculation model of a high-rise building under seismic loading, MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- [26] Pelfrene J., Van Dam S., Sevenois R., Gilabert F., Van Paepegem W., (2016), Fracture simulation of structural glass by element deletion in explicit FEM, *Challenging Glass Conference Proceedings*, Vol. 5, pp. 439-454.
- [27] Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol. 3, pp. 583-59, Pergamon Press, Inc Printed in the United States.
- [28] Reinhardt, H.W., Cornelissen, H.A.W. and Hordijk, D.A. (1986). Tensile tests and failure analysis of concrete. *Journal of Structural Engineering* 112(11), 2462–2477.
- [29] Rizzo A., Lorenzis L De, (2009), Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 4, Pages 1555-1567.
- [30] Sharaky I.A., Torres L., Sallam H.E.M., (2015) Experimental and analytical investigation into the flexural performance of RC beams with partially and fully bonded NSM FRP bars/strips, *Composite Structures*, Volume 122, Pages 113-126.
- [31] Sun E.Q., Shear Locking and Hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS and ANSYS, Jefferson Lab.
- [32] Wagner H.N.R., (2022), *The Ultimate Guide to Damage for Ductile Metals – Ductile Damage*, Technical University of Braunschweig.
- [33] Yurdakul Ö., Artagan S.S., Balaban E., Routil L., (2022), Evaluation of cyclic bond-slip behavior of smooth bars in low strength concrete: an experimental and stochastic study, In: *Structures*, vol 41, Elsevier, pp 568–585.
- [34] Δρίτσος Σ, (2001), Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, Πάτρα.
- [35] Μπουρνάς, Δ (2008), Ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών ή ανοξειδώτου χάλυβα σε εγκοπές. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.