

18



36

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ



ΑΓΓΕΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΝΤΑΤΣΙΟΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ABAQUS

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΣ

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΑΠΟ
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ABAQUS

ΑΓΓΕΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΝΤΑΤΣΙΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2023



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING

MASTER THESIS

SIMULATION OF NOVEL WAYS OF STRENGTHENING BEAM – COLUMN JOINTS
MADE OF REINFORCED CONCRETE USING THE COMPUTER PROGRAM ABAQUS

ANGELOS CONSTANTINE NTATSIOS
SUPERVISOR: EMMANOUIL A. VOUGIOUKAS

ATHENS 2023

Η παρούσα εργασία διεκπεραιώθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος. Η χρήση του προγράμματος Abaqus έγινε εντός των νόμιμων πλαισίων όπως αυτά ορίζονται από τους όρους χρήσης της ακαδημαϊκής άδειάς του και θέτονται σαφώς στην ιστοσελίδα: <https://www.3ds.com/edu/education/students/solutions/abaqus-le>.

δός μοι πᾶ στῶ καί τάν γᾶν κινήσω

- Αρχιμήδης

Ευχαριστίες

Καθώς το ταξίδι της ακαδημαϊκής μου πορείας φθάνει στο τέλος του, δεν μπορώ παρά να νιώσω μια βαθιά αίσθηση ολοκλήρωσης και ευγνωμοσύνης για το πέρας των σπουδών μου. Τα χρόνια μου στην σχολή ήταν έντονα, απαιτητικά και πολλές φορές δύσκολα, όμως το μονοπάτι αυτό με γέμισε γνώσεις και αναμνήσεις που θα κουβαλάω μαζί μου για το υπόλοιπο της ζωής μου. Τώρα που αυτός ο δρόμος φθάνει στο τέλος του, ανασκοπώντας τις ημέρες που πέρασα ως φοιτητής μπορώ με ειλικρίνεια να ομολογήσω ότι το θεωρώ τιμή και προνόμιο να είμαι μέλος αυτής της μεγάλης ακαδημαϊκής οικογένειας.

Γράφω αυτό το ευχαριστήριο σημείωμα με εγκάρδια εκτίμηση και ευγνωμοσύνη για όλα τα άτομα που βοήθησαν στην περάτωση αυτής της εργασίας. Αρχικώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κύριο Εμμανουήλ Βουγιούκα για την αταλάντευτη καθοδήγησή του σε αυτό το έργο, την ευκαιρία που μου έδωσε να δουλέψω πάνω σε αυτό το θέμα, την υπομονή και την προθυμία του να με βοηθήσει όποτε το χρειαζόμουν. Επιπλέον, εκφράζω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τις σχολαστικές διορθώσεις και τις πολύτιμες προτάσεις του που αναμφίβολα βελτίωσαν την ποιότητα της παρούσας εργασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτερες ευχαριστίες μου στην υποψήφιο διδάκτορα Μαρίνα Κουντούρη για την ανεκτίμητη συνεισφορά της στη διατριβή μου. Οι γνώσεις της και η κατανόηση του λογισμικού Abaqus ήταν κρίσιμες κατά τη διάρκεια αυτού του έργου. Σε στιγμές αβεβαιότητας και όταν αντιμετώπισα προβλήματα σχετικά με το πρόγραμμα, η καθοδήγηση και η βοήθειά της απεδείχθησαν σημαντικότερες.

Στους αγαπημένους μου φίλους, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες που στάθηκαν δίπλα μου σε όλη την απαιτητική διαδικασία ολοκλήρωσης αυτού του έργου. Η αταλάντευτη υποστήριξή τους, η ενθάρρυνση και η κατανόησή που μου έδειξαν ήταν πηγή δύναμης για μένα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την αφοσίωση στο πρόσωπό μου και τις θυσίες που έκαναν για να μου δώσουν την ευκαιρία να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Είμαι για πάντα ευγνώμων για την αγάπη, την ενθάρρυνση και την ακλόνητη πίστη που μου έδωσαν. Αυτό το επίτευγμα δεν θα ήταν δυνατό χωρίς εκείνους και έχω την αγάπη και την καθοδήγησή τους πάντα στην καρδιά μου.

Μέσα από την στήριξη των όλων των προσώπων που προαναφέρθηκαν κατάφερα να ολοκληρώσω αυτή τη διατριβή. Ευχαριστώ για άλλη μια φορά για την αμέριστη υποστήριξη και καθοδήγηση όλων, από τον προσωπικό μου κύκλο μέχρι και τον ακαδημαϊκό. Είναι τιμή μου που διασταυρώθηκα με τόσο αξιόλογα άτομα κατά τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής. Θα λατρεύω για πάντα τις αναμνήσεις και τις γνώσεις που απέκτησα από αυτή την εμπειρία.

Περίληψη:

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά την προσομοίωση καινοτόμων μεθόδων ενίσχυσης αρμών δοκού-υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα με τη χρήση του λογισμικού Abaqus. Με το οπλισμένο σκυρόδεμα να είναι το κυρίαρχο δομικό υλικό στη σύγχρονη κοινωνία, η ανθεκτικότητά του έναντι σεισμών έχει αναχθεί σε βασική προτεραιότητα του κατασκευαστικού κλάδου. Ενώ υπάρχουν κανόνες σχεδιασμού για να καθοδηγούν τις απαιτήσεις οπλισμού και τις παραμέτρους σχεδιασμού για τους αρμούς δοκού-κολόνων, αυτοί οι σύνδεσμοι εξακολουθούν να παραμένουν ευάλωτοι σε αστοχία κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων.

Με την πάροδο των χρόνων, έχουν διερευνηθεί πολυάριθμες μέθοδοι για την ενίσχυση των αρμών δοκού-υποστυλωμάτων, αλλά η πρακτική εφαρμογή τους φέρει συχνά δυσκολίες. Σε αυτή τη μελέτη, διερευνήθηκε η μέθοδος της βαθιάς ενσωμάτωσης, όπου ενισχυτικά στοιχεία όπως ράβδοι χάλυβα και ράβδοι πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες άνθρακα (CFRP) ενσωματώθηκαν στον πυρήνα της άρθρωσης για να ενισχύσουν την αντοχή της σε τάσεις που προκαλούνται από σεισμό. Σε διερευνητικό πλαίσιο διάφορα πειράματα διεξήχθησαν για να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα των ράβδων χάλυβα και CFRP στην ενίσχυση των αρμών.

Με βάση τα πειραματικά ευρήματα, αυτή η διατριβή εστιάζει στην προσομοίωση των ερευνητικών συνθηκών χρησιμοποιώντας το λογισμικό Abaqus. Ολόκληρη η πειραματική διάταξη αντιγράφηκε στην προσομοίωση, με σκοπό να αξιολογηθεί η συνέπεια των αποτελεσμάτων. Εξετάστηκαν τρεις τύποι συνδέσμων δοκού-κολόνων: ένα δείγμα ελέγχου χωρίς πρόσθετα ενισχυτικά στοιχεία, ένα ενισχυμένο με χαλύβδινες ράβδους και ένα άλλο ενισχυμένο με ράβδους CFRP.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συμπερίληψη ενισχυτικών στοιχείων στα δοκίμια βελτίωσε την απόδοση των αρθρώσεων σε σύγκριση με το δείγμα ελέγχου. Ωστόσο, η χρήση ράβδων CFRP παρουσίασε αξιοσημείωτη αύξηση στην αντίσταση της άρθρωσης, ξεπερνώντας τη βελτίωση που επιτεύχθηκε από τις χαλύβδινες ράβδους. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα των ράβδων CFRP ως μια πρακτική και αποτελεσματική λύση για την ενίσχυση της σεισμικής ανθεκτικότητας των αρμών δοκού-υποστυλωμάτων.

Το Abaqus, είναι ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ενώ το λογισμικό αποτύπωσε αποτελεσματικά τη συνολική συμπεριφορά των αρθρώσεων, αξίζει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση του σκυροδέματος παρουσίασε ορισμένους περιορισμούς. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των δοκιμίων έγινε εντός του ελαστικού εύρους αντί του ανελαστικού, το οποίο μπορεί να επηρέασε την ακρίβεια ορισμένων πτυχών των αποτελεσμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στο σύνολο των ερευνών σχετικά με την ενίσχυση των αρμών δοκού-κολόνων σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η προσέγγιση που βασίζεται στην προσομοίωση παρέχει πληροφορίες για την απόδοση διαφόρων μεθόδων ενίσχυσης και προσφέρει μια πλατφόρμα για περαιτέρω εξερεύνηση και βελτιστοποίηση των στρατηγικών ενίσχυσης των αρθρώσεων. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της ενσωμάτωσης ράβδων CFRP σε πρακτικές ενίσχυσης αρμών για την ενίσχυση της σεισμικής ανθεκτικότητας των κατασκευών.

Λέξεις-κλειδιά: οπλισμένο σκυρόδεμα, αρμοί δοκού-κολόνων, μέθοδοι ενίσχυσης, βαθιά ενσωμάτωση, ράβδοι χάλυβα, ράβδοι πολυμερών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα (CFRP), Abaqus, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, σεισμική ανθεκτικότητα.

Abstract:

The subject of this thesis revolves around the simulation of novel methods for strengthening beam-column joints made of reinforced concrete using the software Abaqus. With reinforced concrete being the predominant construction material in modern society, its seismic resilience against earthquakes has become a significant concern. While design rules exist to guide the reinforcement requirements and design parameters for beam-column joints, these joints still remain vulnerable to failure during seismic events.

Over the years, numerous methods have been explored to strengthen beam-column joints, but practical implementation has often posed challenges. In this study, the method of deep embedment was investigated, wherein strengthening elements such as steel rods and Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) rods were embedded within the joint core to enhance its resistance to earthquake-induced stresses. Real-life experiments were conducted to test the efficacy of steel and CFRP rods in joint strengthening.

Building upon the experimental findings, this thesis focuses on simulating the tested conditions using Abaqus software. The entire experimental setup was replicated in the simulation to assess the consistency of the results. Three types of beam-column joints were considered: a control specimen with no additional strengthening elements, one reinforced with steel rods, and another reinforced with CFRP rods.

The results demonstrated that the inclusion of strengthening elements improved the performance of the joints compared to the control specimen. However, the use of CFRP rods exhibited a remarkable increase in joint resistance, surpassing the improvement achieved by steel rods. These findings highlight the effectiveness of CFRP rods as a practical and efficient solution for enhancing the seismic resilience of beam-column joints.

Abaqus, a finite element analysis software, was employed for simulating and analyzing the experimental results. While the software effectively captured the overall behavior of the joints, it is worth noting that the simulation of concrete exhibited some limitations. The elastic range was utilized for concrete behavior simulation instead of the anelastic range, which may have influenced the accuracy of certain aspects of the results.

This thesis contributes to the body of knowledge on strengthening beam-column joints in reinforced concrete structures. The simulation-based approach provides insights into the performance of various strengthening methods and offers a platform for further exploration and optimization of joint

reinforcement strategies. The findings underscore the significance of incorporating CFRP rods in joint strengthening practices to enhance the seismic resilience of structures.

Keywords: reinforced concrete, beam-column joints, strengthening methods, deep embedment, steel rods, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) rods, Abaqus, finite element analysis, seismic resilience.

Περιεχόμενα

Πίνακας εικόνων	x
1. Εισαγωγή	1
1.1 Θεωρητικό πλαίσιο	1
1.1.1 Οπλισμένο σκυρόδεμα – Ορισμός	1
1.1.2 Ιστορική αναδρομή:	1
1.2 Κτήρια και αντισεισμικός σχεδιασμός	6
1.2.1 Κόμβοι δοκών και υποστυλωμάτων	7
1.2.2 Αρχές αντισεισμικού σχεδιασμού κόμβων	9
1.3 Παραδοσιακοί μέθοδοι ενισχύσεως και επιδιορθώσεως κόμβων	14
1.3.1 Μέθοδος αφαίρεσης και αντικατάστασης:	14
1.3.2 Μέθοδος εποξειδικών ενέσεων:	14
1.3.3 Μέθοδος χρήσης μανδυών (jacketing):	15
1.3.4 Μέθοδος χρήσης χαλύβδινων μανδυών και ειδικών χαλύβδινων στοιχείων	16
1.3.5 Μέθοδος χρήσης ινωδώς ενισχυμένων πολυμερών υλικών:	17
1.4 Στόχος εργασίας	20
1.4.1 Δομή της εργασίας	20
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση	22
2.1.1 Εισαγωγή και πειραματική μελέτη της μεθόδου βαθιάς ενσωμάτωσης (BE)	22
2.1.2 Ενίσχυση κόμβων με τη μέθοδο BE	24
2.2.1 Προσομοιώσεις μελών από Ο/Σ με το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus	26
3. Μεθοδολογία	29
3.1 Καθορισμός πειραματικών συνθηκών με βάση το πείραμα αναφοράς	29
3.2 Υπολογιστικό περιβάλλον του προγράμματος Abaqus	33
4. Διαδικασία προσομοίωσης και αναλύσεως	38
4.1 Σχεδιασμός των τμημάτων	38
4.2 Ορισμός υλικών	40
4.3 Ορισμός διατομών	43
4.4 Συναρμολόγηση των τμημάτων	44
4.5 Ορισμός βημάτων αναλύσεως	50
4.6 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφανειών	56
4.7 Ορισμός φορτίων	60

4.8 Ορισμός πλέξης των στοιχείων	64
4.9 Ανάλυση της κατασκευής	66
5. Αποτελέσματα	68
5.1 Δοκίμιο JBOV	68
5.2 Δοκίμιο JBOR	73
5.3 Δοκίμιο JBOVFX.....	79
6. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	84
7. Συμπεράσματα	88
7.1 Αξιολόγηση της αποκρίσεως των δοκιμίων	88
7.2 Αξιολόγηση της χρήσης και αξιοπιστίας του προγράμματος Abaqus	89
Βιβλιογραφία	91

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1.1.1.2: Λεπτομέρεια που δείχνει την χρήση παλαιών χαλύβδινων σκοινιών ανύψωσης ως πρώτη μορφή	19
Εικόνα 1.1.2.2: Λεπτομέρεια που δείχνει την χρήση παλαιών χαλύβδινων σκοινιών ανύψωσης ως πρώτη μορφή σπλισμού.....	19
Εικόνα 1.1.2.2: Αυθεντικά σχέδια του Francois Coignet που απεικονίζουν τις πρώτες κολώνες από Ο/Σ.....	20
Εικόνες 1.1.2.4, 1.1.2.5: (Αριστερά) Το οίκημα στην οδό 72 Rue Charles Michels, το πρώτο κτήριο στον κόσμο που περιλάμβανε στοιχεία από Ο/Σ, (Δεξιά) Η οικία Αλεξάνδρου Αφεντούλη στέκεται πίσω από το άγαλμα του Κολοκοτρώνη.....	22
Εικόνα 1.2.1.1: (Από αριστερά προς τα δεξιά) Παράδειγμα τυπικού εσωτερικού, εξωτερικού και γωνιακού κόμβου.....	24
Εικόνα 1.2.1.2: Οι σκηνές Βιβλικής καταστροφής που άφησε πίσω του ο φονικότατος σεισμός της Πόλης του Μεξικού το έτος 1985.....	26
Εικόνα 1.2.2.1: Η κατανομή των βαρυτικών φορτίων διαφέρει από αυτήν του συνδυασμού βαρυτικών και πλαγίων φορτίων.....	27
Εικόνα 1.2.2.2: Στοιχεία της αλληλεπίδρασης κόμβου – υποστυλωμάτων.....	28
Εικόνα 1.2.2.3: Στοιχεία της ισορροπίας κόμβου.....	29
Εικόνα 1.2.2.4: Σχεδιάγραμμα ροής των διατμητικών τάσεων που καταλήγουν στον κόμβο.....	30
Εικόνα 1.2.2.5: Απεικόνιση τυπικού σπλισμού σε σύνδεση υποστυλώματος – δοκού με εγκάρσιες ράβδους.....	32
Εικόνα 1.3.2.1: Απεικόνιση της μεθόδου εποξειδικού εμποτισμού ρηγματωμένου κόμβου με χρήση κενού αέρα.....	34
Εικόνα 1.3.4.1: Απεικόνιση της μεθόδου των κυματοειδών χαλύβδινων φύλλων.....	36
Εικόνα 1.3.5.1: Απεικόνιση των τυπικών μορφών ενισχύσεως κόμβων με χρήση φύλλων πολυμερούς ενισχυμένου με ανθρακόνημα (CFRP).....	40
Εικόνα 2.1.1.1: Διάγραμμα δυνάμεων – παραμορφώσεων[29] από 5 δείγματα δοκών που μελετήθηκαν με την άσκηση φορτίου ίδιας τάξεως σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο ενισχύσεως.....	41
Εικόνα 2.1.1.2: Στιγμιότυπα από την εφαρμογή της μεθόδου βαθιάς ενσωμάτωσης.....	43
Εικόνα 2.1.2.1: Η διάταξη της ενίσχυσης δύο διαφορετικών τύπων.....	44
Εικόνα 2.1.2.2: (Άνω): Ενδεικτικά διαγράμματα δυνάμεων – παραμορφώσεων δύο δειγμάτων του πειράματος κάτω από κυκλικές φορτίσεις. (Κάτω): Καμπύλη S όλων των μελετημένων δειγμάτων με τις αντίστοιχες αποκρίσεις τους[31].....	45

Εικόνα 2.2.1.1: Σύγκριση πειραματικά καθορισμένων και αριθμητικά προβλεπόμενων σχηματισμών ρωγμών που εμφανίστηκαν προ αστοχίας για εσωτερικές αρθρώσεις[34].....	48
Εικόνα 2.2.1.2: Σύγκριση μεταξύ του σχηματισμού ρωγμών διάτμησης αρμού που λήφθηκε από την ανάλυση σε Abaqus και αυτού που παρατηρήθηκε στη δοκιμή.....	49
Εικόνα3.1.1: (Ανω): Σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις και τον τοποθετημένο οπλισμό του δείγματος ελέγχου JBOV. (Κάτω): Σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις και τον τοποθετημένο οπλισμό του δοκιμίου JBOR.....	50
Εικόνα 3.1.2: (Αριστερά): Σχεδιάγραμμα της ενίσχυσης του δοκιμίου JBOR με ράβδους χάλυβα μέσω της μεθόδου BE. Σημειώνονται οι διαστάσεις των ράβδων. (Δεξιά): Σχεδιάγραμμα και λεπτομέρεια της ενίσχυσης του δοκιμίου JBOVFX με ράβδους CFRP.....	51
Εικόνα 3.1.3: (Ανω αριστερά): Διάγραμμα δυνάμεων – μετατόπισης όλων των δοκιμίων. (Δεξιά και κάτω): οι καμπύλες S για τα τρία δοκίμια για τα μέγιστα φορτία κατά τον πρώτο κύκλο φορτίσεως (δεξιά και άνω), τον δεύτερο κύκλο φορτίσεως (αριστερά και κάτω) και τον τρίτο (δεξιά και κάτω).....	53
Εικόνα 3.2.1: Το περιβάλλον εργασίας του Abaqus.....	56
Εικόνα 3.2.2: Τα τμήματα που αποτελούν τα λειτουργικά στοιχεία του Abaqus.....	57
Εικόνα 4.1.1: Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό μιας δοκού. Έχει γίνει απεικόνιση της διατομής σε δύο διαστάσεις και στην εντολή εκβολής εισάγεται το μήκος της ως το τρισδιάστατο «βάθος» της.....	58
Εικόνα 4.1.2: Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό μιας δοκού. Μετά της εκβολής της διατομής στον χώρο η δοκός αποκτά την πλήρη μορφή της. Πανομοιότυπη διαδικασία ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και των υποστυλωμάτων των δοκιμίων.....	59
Εικόνα 4.2.1: Στιγμιότυπο από την εισαγωγή τιμών που περιγράφουν αριθμητικά την θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Σημειώνονται οι τιμές καταπόνησεως διαρροής και ανελαστικής παραμόρφωσης.....	59
Εικόνα 4.2.3: Στιγμιότυπο από τις υποενότητες εισαγωγής τιμών του Abaqus που περιγράφουν την αντιστοιχία ανελαστικών παραμορφώσεων με παραμέτρους αστοχίας σύμφωνα με το σύστημα Park&Ang[37].....	60
Εικόνα 4.2.4: Τα δύο σημεία αντιστοίχισης τάσεων διαρροής με πλαστική καταπόνηση. Δεν είναι απαραίτητος ο ορισμός περαιτέρω σημείων για τον χάλυβα.....	61
Εικόνα 4.3.1: (Αριστερά): Η ορισμένη διατομή σκυροδέματος που αφορά τις δοκούς και τα υποστυλώματα. (Δεξιά): Μια ενδεικτική διατομή των ράβδων διαμέτρου 12mm. Σημειώνεται πως το εμβαδόν εισήχθη χειροκίνητα ως 113.097 mm ²	62
Εικόνα 4.4.1: Ο οπλισμός του υποστυλώματος κατασκευασμένος εντός του υποστυλώματος το οποίο έχει «κρυφτεί» για διευκόλυνση.....	63
Εικόνα 4.4.2: Η δοκός σε ειδική διάφανη όψη και ο οπλισμός της εσωτερικά. Σημειώνονται τα τμήματα των διαμήκους ράβδων που προεκτείνονται εκτός της δοκού. Αυτά είναι τα τμήματα που εισχωρούν στα υποστυλώματα και δημιουργούν τον κόμβο.....	64

Εικόνα 4.4.3: Το υποστύλωμα με την περιοχή επαφής που ορίστηκε να διακρίνεται στην μέση. Πάνω στα τέσσερα άκρα της περιοχής στην άνω όψη της θα αγκυρωθεί η δοκός.....	65
Εικόνα 4.4.4: (Άνω): Το ολοκληρωμένο πλαίσιο με διαφανή όψη που επιτρέπει την επισκόπηση του σπλισμού εσωτερικά. (Κάτω): Λεπτομέρεια του κόμβου με τον σπλισμό. Το συγκεκριμένο δοκίμιο είναι το JBOV και δεν φέρει επιπλέον ενίσχυση.....	66
Εικόνα 4.4.5: Λεπτομέρεια του κόμβου από το δοκίμιο JBOR. Σημειώνονται οι τέσσερις ράβδοι ενίσχυσης από χάλυβα στις θέσεις 1,2,3,4.....	67
Εικόνα 4.4.6: Λεπτομέρεια του κόμβου από το δοκίμιο JBOVFX. Σημειώνονται οι δύο ράβδοι από CFRP που δένονται διαγωνίως όχι πάνω στον σπλισμό αλλά στις επιφάνειες του σκυροδέματος στο υποστύλωμα και στην δοκό.....	69
Εικόνα 4.5.1: Οι ρυθμίσεις των βημάτων που ορίστηκαν, ως προς τις μονάδες χρόνου και τις προσαυξήσεις.....	70
Εικόνα 4.5.2: Το σημείο αναφοράς στο εξωτερικό άκρο της δοκού. Το σημείο ορίστηκε κυρίως για την καταγραφή δεδομένων μετακινήσεως.....	71
Εικόνα 4.5.3: Το σημείο αναφοράς στην επιφάνεια άσκησης του παραμοφωσιακού φορτίου στην δοκό. Το σημείο συγκεντρώνει και καταγράφει όλα τα δεδομένα της επιφάνειας.....	71
Εικόνα 4.5.4: Το σημείο αναφοράς στο άκρο του υποστυλώματος.....	73
Εικόνα 4.5.5: Τα δεδομένα εξόδου από τον χρονικό επεξεργαστή.....	74
Εικόνα 4.6.1: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το πλαίσιο με τον ενσωματωμένο σπλισμό.....	75
Εικόνα 4.6.2: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το πλαίσιο σε διάφανη όψη που επιτρέπει την επισκόπηση του ενσωματωμένου σπλισμού.....	76
Εικόνα 4.6.3: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το πλαίσιο με τις στηρίξεις αρθρώσεων να φαίνονται στο κάτω τμήμα του.....	77
Εικόνα 4.6.4: Λεπτομέρεια που απεικονίζει το κάτω μέρος του πλαισίου όπου οι ακριβείς θέσεις των αρθρώσεων είναι πιο διακριτές.....	78
Εικόνα 4.7.1: Τα δεδομένα εισαγωγής για το σταθερό αξονικό φορτίο που ασκείται στο υποστύλωμα....	79
Εικόνα 4.7.2: Τα δεδομένα εισαγωγής για το φορτίο κυκλικής φορτίσεως.....	80
Εικόνα 4.7.3: Το πινακοειδές εύρος που ορίστηκε για την προσομοίωση της κυκλικής φορτίσεως της δοκού.....	81
Εικόνα 4.8.1: Το ορισμένο πλέγμα του υποστυλώματος. Σημειώνονται οι διαστάσεις 20x2 που είναι ίδιες ανά πλευρά για την διατήρηση συνοχής.....	82
Εικόνα 4.8.2: Το ορισμένο πλέγμα της δοκού. Σημειώνονται οι διαστάσεις 13x2 που είναι ίδιες ανά πλευρά για την διατήρηση συνοχής.....	82
Εικόνα 4.8.3: Η πλέξη ενός σπλισμού περισφίξεως. Σημειώνονται οι 10 υποδιαίρέσεις του.....	83

Εικόνα 5.1.1: Το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων του δοκιμίου JBOV.....	85
Εικόνα 5.1.2: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής εντάσεως του δοκιμίου JBOV.....	86
Εικόνα 5.1.3: Στιγμιότυπα της τρισδιάστατης απεικόνιση της εντάσεως του δοκιμίου JBOV κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της κυκλικής φορτίσεως.....	87
Εικόνα 5.1.4: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπονήσεως του οπλισμού κατά Von Mises.....	87
Εικόνα 5.1.5: Λεπτομέρεια της τρισδιάστατης απεικόνισης της καταπονήσεως του οπλισμού κατά Von Mises.....	88
Εικόνα 5.1.6: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης που δείχνει που είναι πιθανότερη η εμφάνιση αστοχιών.....	88
Εικόνα 5.1.7: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης του οπλισμού που δείχνει που είναι πιθανό να διαρρεύσει ο οπλισμός με βάση την αρχή.....	89
Εικόνα 5.2.1: Το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων του δοκιμίου JBOR.....	89
Εικόνα 5.2.2: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής εντάσεως του δοκιμίου JBOR.....	90
Εικόνα 5.2.3: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της θλιπτικής εντάσεως του δοκιμίου JBOR.....	91
Εικόνα 5.2.4: Στιγμιότυπα της τρισδιάστατης απεικόνιση της εντάσεως του δοκιμίου JBOR κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της κυκλικής φορτίσεως.....	92
Εικόνα 5.2.5: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπονήσεως του οπλισμού κατά Von Mises.....	92
Εικόνα 5.2.6: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης που δείχνει που είναι πιθανότερη η εμφάνιση αστοχιών.....	93
Εικόνα 5.2.7: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης του οπλισμού που δείχνει που είναι πιθανό να διαρρεύσει ο οπλισμός με βάση την αρχή.....	94
Εικόνα 5.3.1: Το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων του δοκιμίου JBOVFX.....	95
Εικόνα 5.3.2: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής εντάσεως του δοκιμίου JBOVFX.....	96
Εικόνα 5.3.3: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της θλιπτικής εντάσεως του δοκιμίου JBOVFX.....	97
Εικόνα 5.3.4: Στιγμιότυπα της τρισδιάστατης απεικόνιση της εντάσεως του δοκιμίου JBOVFX κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της κυκλικής φορτίσεως.....	97
Εικόνα 5.3.5: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπονήσεως του οπλισμού κατά Von Mises.....	98
Εικόνα 5.3.6: Λεπτομέρεια της τρισδιάστατης απεικόνισης της καταπονήσεως του οπλισμού κατά Von Mises.....	98
Εικόνα 5.3.7: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης του οπλισμού που δείχνει που είναι πιθανό να διαρρεύσει ο οπλισμός με βάση την αρχή.....	98
Εικόνα 6.1: Συγκέντρωση των διαγραμμάτων δυνάμεων – μετατοπίσεων από το πραγματικό πείραμα και των τριών δοκιμών ξεχωριστά παρακάτω του.....	104

1. Εισαγωγή

1.1 Θεωρητικό πλαίσιο

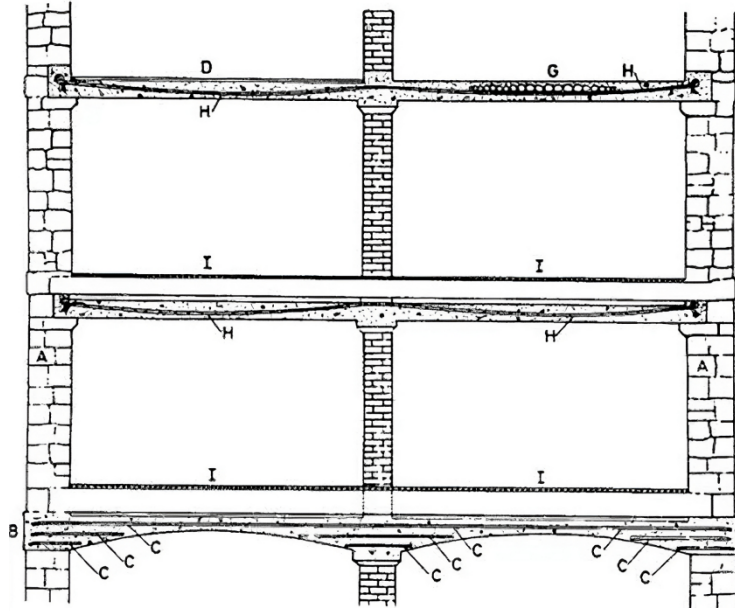
1.1.1 Οπλισμένο σκυρόδεμα – Ορισμός

Το οπλισμένο ή σιδηροπαγές σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που συνδυάζει την θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος με την εφελκυστική αντοχή του χάλυβα. Αποτελεί ένα από τα πλέον θεμελιώδη οικοδομικά υλικά του σύγχρονου κόσμου και στην εποχή μας εφαρμόζεται ευρέως ως δομικό συστατικό σε αμέτρητες κατασκευές ανεξαρτήτως κλίμακας ή είδους. Η επικράτησή του αποδίδεται τρίπτυχα στην αφθονία των στοιχειωδών συστατικών που το συντελούν (κροκάλες, άμμος, νερό, τσιμέντο και χάλυβας), την ευκολία παρασκευής του και την υψηλή αντοχή που προσφέρει σε σχέση με το κόστος του. Με τις χρήσεις του να έχουν πολλαπλασιαστεί από την προ δύο αιώνων εφεύρεσή του, το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει αδιαμφισβήτητα αναδειχθεί ως η πιο επαναστατική ανθρώπινη καινοτομία πάνω στον τομέα της δόμησης.

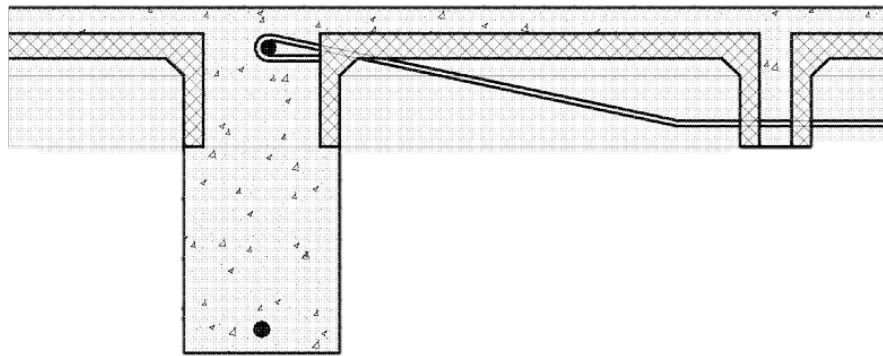
1.1.2 Ιστορική αναδρομή:

Οι κινητήριοι λόγοι που οδήγησαν στην εφεύρεσή του ήταν η ανάγκη ενός ανθεκτικού, μονωτικού και πυρίμαχου δομικού υλικού, καθώς και η γενικότερη τάση της εποχής που καλούσε για την αντικατάσταση της ξυλείας σε κατασκευαστικές χρήσεις. Οι πρώτες καταγεγραμμένες δημιουργίες από σιδηροπαγές σκυρόδεμα ήταν ταπεινές ζαρντινιέρες κήπου και δεξαμενές όμβριων υδάτων που έγιναν από τον Γάλλο κηπουρό Joseph Monier περί το 1850^[1]. Ο Monier έπαιξε σημαντικό ρόλο στην πρόωμη ανάπτυξη του οπλισμένου σκυροδέματος και πειραματίστηκε αρχικά με την δημιουργία δεξαμενών από σκυροκονίαμα ενισχυμένο με ένα πλέγμα σιδηρών ράβδων που προορίζονταν αρχικά για την στήριξη δενδρυλλίων. Η εφεύρεση του αυτή κατοχυρώθηκε ως ευρεσιτεχνία το 1867 και σύντομα ακολούθησαν και άλλες κατασκευές με τη χρήση του ως υλικό σε σωλήνες, πλάκες και κλίμακες^[3]. Άλλοι εφευρέτες σύγχρονοι του Monier δοκίμασαν πιο εξωτικές εφαρμογές για την καινοτόμα εφεύρεση, δίχως όμως να βρίσκουν απήχηση και επιχειρηματική επιτυχία. Χαρακτηριστική του κλίματος πειραματισμού που επικρατούσε είναι η κατασκευή από τον Γάλλο εφευρέτη Joseph Louis Lambot ενός πλήρως πλεύσιμου πλοίου εξ' ολοκλήρως κατασκευασμένου από σιδηροπαγές σκυρόδεμα, με τη πεποίθηση ότι αυτό το υλικό μελλοντικά θα εκτόπιζε την ξυλεία στην ναυπηγική^[1,7]. Την ίδια εποχή και ανεξάρτητα από αυτές τις εξελίξεις στο γαλλικό έδαφος, ξεκινάει μια δοκιμαστική χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος στον κατασκευαστικό κλάδο του Ηνωμένου Βασιλείου, αρχικά ως υλικό μονώσεως και πυροπροστασίας σε βιομηχανικά δάπεδα, αποσκοπώντας στην θωράκιση του χάλυβα από φθορά λόγω πυρκαγιάς^[2]. Πρωτοπόρος θεωρείται ο W. B. Wilkinson, ο οποίος το 1854 εξασφάλισε την πρώτη ευρεσιτεχνία για την χρήση σιδηροπαγούς σκυροκονιάματος για αποκλειστικά οικοδομικούς σκοπούς^[1,2,3]. Η εφεύρεση του

προέβλεπε την κατασκευή βιομηχανικών δαπέδων χρησιμοποιώντας γύψινα καλούπια που θα γεμίζονταν με έγχυτο σκυρόδεμα. Στην συνέχεια, εντός αυτών θα βυθίζονταν παλιά χαλύβδινα σκοινιά ανυψώσεως για ενίσχυση. Η διαδικασία αυτή κατοχυρώθηκε αλλά δεν υλοποιήθηκε μέχρι το έτος 1865 σε μικρότερη κλίμακα για την ανέγερση ενός οικήματος.



Εικόνα 3.1.2.1: Η ευρεσιτεχνία του Wilkinson (1854) καθιστά την πρώτη χρήση Ο/Σ για δομικούς σκοπούς

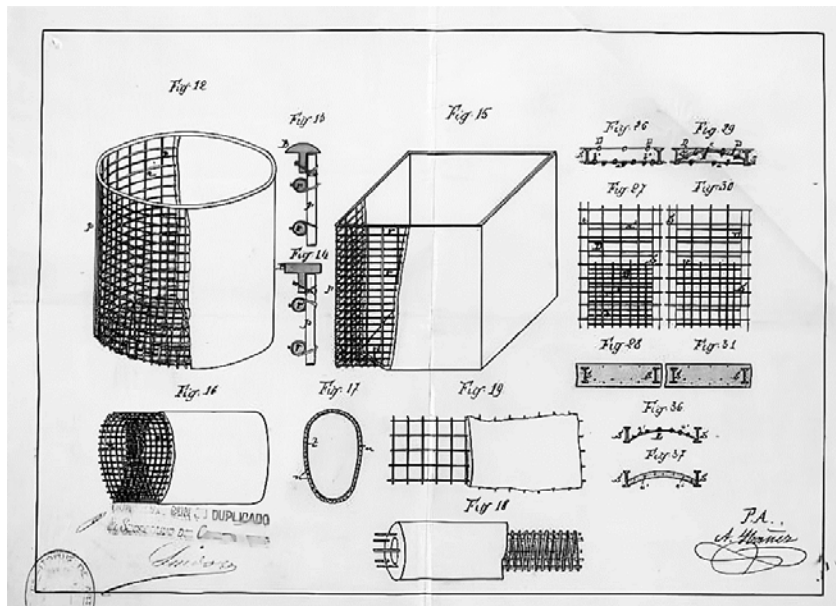


Εικόνα 1.1.4.2: Λεπτομέρεια που δείχνει την χρήση παλαιών χαλύβδινων σκοινιών ανύψωσης ως πρώτη μορφή οπλισμού

Οι πρώτες αυτές χρήσεις και πειραματισμοί πάνω στο σιδηροπαγές σκυρόδεμα μαρτυρούν τον πραγματικό λόγο εφευρέσεώς του, ο οποίος δεν είχε τόσο να κάνει με την σκόπιμη δημιουργία ενός σύνθετου υλικού που θα συνδύαζε την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με την εφελκυστική αντοχή ενός δεύτερου στοιχείου όπως ο χάλυβας ή ο απλός σίδηρος. Παραδόξως, η εφεύρεση του υλικού που ριζικώς άλλαξε τον τρόπο που κτιζουμε είχε πιο πολύ να κάνει με μια εμπειρική αναζήτηση ενός φθηνού αντικατάστατου της ξυλείας που θα έφερε παράλληλα μια ενισχυμένη ικανότητα μονώσεως έναντι

υδάτων και φωτιάς. Παρόλο που κάποιοι πρώιμοι οραματιστές – όπως ο Wilkinson – είχαν μια αρχική προαίσθηση και μπόρεσαν να αναγνωρίσουν τις πραγματικές του δυνατότητες και πού θα είχε μια πρακτικώς ορθή εφαρμογή, θα χρειαστεί να περάσουν αρκετά χρόνια μέχρι το νέο αυτό υλικό να αρχίσει να ελκύει την προσοχή επιστημόνων και ερευνητών.

Ύστερα των πρώιμων αυτών δράσεων, η ανάπτυξη του οπλισμένου σκυροδέματος άρχισε σταδιακά να επεκτείνεται σε Ευρώπη και Ηνωμένες Πολιτείες, παραμένοντας ωστόσο ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Το κατεστημένο της εποχής εμφάνισε αρχικώς μια ραθυμία σχετικά με την αποδοχή του νέου υλικού και την ενσωμάτωσή του στον κατασκευαστικό κλάδο. Από μεριάς της οικοδομικής βιομηχανίας υπήρχαν επιφυλάξεις σχετικά με τον – απροσδόκητο τότε – συνδυασμό του σκυροκονιάματος με χάλυβα ή καθαρό σίδηρο, αλλά και με την γενικότερη χρήση του πέραν αυτής για πυροπροστασία και μόνωση^[1]. Παρόλα αυτά, οι πρώτες θεωρητικές προσεγγίσεις αρχίζουν να εμφανίζονται στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Το έτος 1861 ο Γάλλος βιομήχανος Francois Coignet σε βιβλίο του απεικόνισε εφαρμογές σιδηροπαγούς σκυροδέματος, παρουσιάζοντας τις πρώτες δοκούς και κολώνες από σκυρόδεμα ενισχυμένο με ράβδους σιδήρου. Μερικά χρόνια αργότερα, ο Γερμανός επιστήμονας Matthias Koenen στην δημοσίευσή του ονόματι «Berechnung der Stärke der Monierschen Cementplatten» (1886) έθεσε τις ακαδημαϊκές βάσεις για την συστηματική μελέτη του οπλισμένου σκυροδέματος ως δομικού υλικού, καθώς για πρώτη φορά υπολογίστηκε η φέρουσα ικανότητα δοκιμών σκυροδέματος ενισχυμένων με ράβδους χάλυβα και σιδήρου, αναδεικνύοντας την αξιοσημείωτη αντοχή του υλικού^[1,4]. Πρωτοπόρος στην γενικότερη ακαδημαϊκή του υιοθέτηση ανεδείχθη η Γαλλία, με τον καθηγητή Charles Rabut να δίνει την πρώτη ομιλία πάνω στο σιδηροπαγές σκυρόδεμα σε φοιτητές μηχανικούς στο Ecole des Ponts et Chaussées ήδη από το 1897^[1].



Εικόνα 1.1.2.5: Αυθεντικά σχέδια του Francois Coignet που απεικονίζουν τις πρώτες κολώνες από Ο/Σ, κατοχυρωμένα ως ευρεσιτεχνίες στην Ισπανία (1884), (πηγή: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio Oficina Española de Patentes y Marcas. Archivo Histórico. Patente nº 4433)

Τα πρώτα βήματα στην οικοδόμηση κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα εντός του 19^{ου} αιώνα χαρακτηρίστηκαν από μεμονωμένες και σποραδικές προσπάθειες από ανθρώπους σε διάφορα μέρη του Δυτικού κόσμου, οι οποίες τελικώς απέτυχαν να διατηρήσουν κάποιου είδους ορμή και να γίνουν ευρέως γνωστές. Στην γενική βιβλιογραφία δεν είναι πλήρως ξεκάθαρο ποιος ήταν ο άνθρωπος που καινοτόμησε αναγείροντας το πρώτο οικοδόμημα με φέροντα οργανισμό εξ' ολοκλήρου από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι όμως γνωστό ότι το πρώτο κτήριο που ανεγέρθη περιλαμβάνοντας μερικώς στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα ήταν ένα τετραώροφο σπίτι στην διεύθυνση 72 Rue Charles Michels στην πόλη St. Denis της Γαλλίας ^[2]. Το οίκημα κτίστηκε από τον François Coignet και ήταν μια μονολιθική κατασκευή από σκυρόδεμα, η οροφή του οποίου ήταν ενισχυμένη με διαμήκεις ράβδους σιδήρου^[1,2]. Ως τεκμήριο της ιδιαίτερης αντοχής αυτού του τότε ανήκουστου δομικού υλικού είναι το γεγονός ότι η κατασκευή αυτή άντεξε την πάροδο των χρόνων και στέκει ακόμα και σήμερα, κατέχοντας πλέον θέση ανάμεσα στα ιστορικά μνημεία της Γαλλίας από το 1998. Εν συνεχεία των πρωτοβουλιών ανεγέρσεως αυτών των κτηρίων, στην άλλη άκρη του Ατλαντικού ωκεανού το έτος 1875 κτίστηκε το πρώτο σπίτι με στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος από τον μηχανολόγο μηχανικό William E. Ward, στην νήσο Long Island στην ανατολική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής^[4]. Την ίδια περίοδο – στην δυτική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών – ο E. L. Ransome πειραματίστηκε με μεθόδους ενισχύσεως του οπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ράβδους διαφόρων ειδών. Τα πειράματά του οδήγησαν τελικώς στην ιστορική εφεύρεση του χαλύβδινου οπλισμού με στρεβλώσεις – του προάγγελου των σύγχρονων χαλύβδινων ράβδων οπλισμού – ευρεσιτεχνία που κατοχυρώθηκε από τον ίδιο το έτος 1884^[4]. Η πρωτοποριακή αυτή εφεύρεση ενίσχυσε την αντοχή του σκυροδέματος σε τεράστιο βαθμό και επέτρεψε την ανέγερση του πρώτου κτηρίου πλήρως κατασκευασμένου από οπλισμένο σκυρόδεμα στις Ηνωμένες Πολιτείες^[4,5]. Ο στρεβλωμένος χάλυβας (twisted steel) ήταν επίσης καταλύτης για την δημιουργία του πρώτου «ουρανοξύστη» στην ιστορία από οπλισμένο σκυρόδεμα, του δεκαπενταόροφου κτηρίου Ingalls στην πόλη Cincinnati της πολιτείας του Ohio το έτος 1903^[5].

Η περίοδος που μεσολάβησε ανάμεσα στα έτη 1875 και 1900 έθεσε τις βάσεις για την γενική επικράτηση του οπλισμένου σκυροδέματος ως το βασικό οικοδομικό υλικό. Κύριος τροχός αναπτύξεως και μελέτης του υπήρξαν οι διάφορες ευρεσιτεχνίες που κατοχυρώνονταν, καθώς και η ευρύτερη ακαδημαϊκή βιβλιογραφία που πλέον είχε παγιωθεί και αναπτυσσόταν, προσφέροντας έναν μεγάλο όγκο δημοσιεύσεων και ερευνών. Αυτός ο εναγκαλισμός του σιδηροπαγούς σκυροκονιάματος από ερευνητές και σταδιακά από καινοτόμους επιχειρηματίες και επενδυτές βοήθησε στην προώθηση του υλικού και στην αντιστροφή της τάσης που κατέτρεχε την κατασκευαστική βιομηχανία: από ολιγωρία σε όλο και μεγαλύτερη ένδειξη ενδιαφέροντος για τις δυνατότητές του.

Η πραγματικά αλματώδης εδραίωση του οπλισμένου σκυροδέματος ξεκινάει με την αλλαγή του αιώνα, καθώς οι διάφορες ιδιωτικώς καθιερωμένες ευρεσιτεχνίες για την παραγωγή και την χρήση του γίνονται – επί το πλείστον – ελεύθερες στο κοινό. Επιστήμονες και ακαδημαϊκοί στον Δυτικό κόσμο καθιέρωσαν μια κοινώς αποδεχομένη θεωρητική βάση για το οπλισμένο σκυρόδεμα και την συμπεριφορά του, κάτι που γρήγορα οδήγησε στην εκτεταμένη εισαγωγή της μελέτης του σε διάφορα πανεπιστήμια του κόσμου. Η ταχύτατη αυτή ανάπτυξη φέρνει και την καθιέρωση του πρώτου νομοθετικού πλαισίου για κτήρια από οπλισμένο σκυρόδεμα στην Γερμανική Ομοσπονδία το 1904 καθώς και την δημοσιοποίηση των πρώτων κατασκευαστικών κωδίκων στην Γαλλία το 1906^[3]. Το έτος 1907 εισάγεται και στην Ελλάδα

η νέα αυτή τεχνολογία με το κτίσιμο της οικίας Αλεξάνδρου Αφεντούλη στην συνδρομή των οδών Σταδίου και Κολοκοτρώνη στην Αθήνα. Υπεύθυνος της ανέγερσης ήταν ο μηχανικός Ηλίας Αγγελόπουλος που σχεδίασε τον φέροντα οργανισμό του κτηρίου βάσει γαλλικών προτύπων. Η οικοδόμηση προξένησε ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την κοινότητα επιστημόνων και μηχανικών της χώρας, κάτι που είναι εμφανές από την ειδική αναφορά που γίνεται για το κτήριο σε άρθρο του μηνιαίου περιοδικού Αρχιμήδης από τον Ελληνικό Πολυτεχνικό Σύλλογο^[8].



Εικόνες 1.1.2.4, 1.1.2.5: (Αριστερά) Το οίκημα στην οδό 72 Rue Charles Michels, το πρώτο κτήριο στον κόσμο που περιλάμβανε στοιχεία από Ο/Σ, κτισμένο από τον πρωτοπόρο Francois Coignet το έτος 1854.

(Δεξιά) Η οικία Αλεξάνδρου Αφεντούλη στέκεται πίσω από το άγαλμα του Κολοκοτρώνη. Ήταν το πρώτο κτήριο στην Ελλάδα κατασκευασμένο από Ο/Σ το έτος 1907 (φωτογραφία του 1955)

Οι εξελίξεις στην ανάπτυξη του οπλισμένου σκυροδέματος ακολουθούν έναν σταθερό ρυθμό κατά το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα λόγω της εκτενούς έρευνας που διεξάγεται σε ακαδημαϊκά κέντρα από διάφορους επιστήμονες. Σταδιακά η μηχανική κοινότητα αποκτά μια πλήρως ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς του σιδηροπαγούς σκυροδέματος. Η γνώση αυτή σε συνδυασμό με καινοτομίες στις μεθόδους ανάμιξης, μεταφοράς και έγχυσης ανοίγουν τον δρόμο για την παγκόσμια και ταχύτατη επικράτηση του υλικού στην οικοδομική βιομηχανία από το 1930 και έπειτα^[4]. Τέλος, συνεισφορές που έγιναν από ερευνητές – όπως ο προαναφερθέντας Matthias Koenen – και από μηχανικούς – όπως ο E. L. Ransome – ανέπτυξαν τις βασικές θεωρίες γύρω από το σιδηροπαγές σκυρόδεμα και έθεσαν τις βάσεις για την επόμενη μεγάλη εφεύρεση του κατασκευαστικού κλάδου: Αυτή την φορά στοχεύοντας σκοπίμως στην ανάπτυξη ενός ακόμα πιο ισχυρού δομικού υλικού και βαδίζοντας πάνω στον δρόμο που είχε ήδη ανοίξει η γενική αποδοχή και επιτυχία του οπλισμένου σκυροδέματος, ο Γάλλος πολιτικός μηχανικός E. Freyssinet θα καινοτομήσει το 1928 με την εφεύρεση του προεντεταμένου σκυροδέματος, της φυσικής συνέχειας του προπάτορά του^[6].

1.2 Κτήρια και αντισεισμικός σχεδιασμός

Ανάμεσα στους κινδύνους που μπορούν να πλήξουν τις ανθρώπινες κατασκευές οι σεισμοί κατέχουν κυρίαρχη θέση, τόσο λόγω της απρόβλεπτης φύσης τους όσο και για τις εκτενείς καταστροφές που μπορούν να προκαλέσουν. Οι άνθρωποι για χιλιετίες ζούσαν στην σκιά και στο έλεος του Εγκέλαδου και υπέφεραν βαριές απώλειες σε ζωές και υλικό, καθώς τα κτίσματα που οικοδομούνταν υστερούσαν της ικανότητας να αντέξουν επαρκώς τις σεισμικές καταπονήσεις. Ελάχιστα κτίσματα είχαν την τύχη να ανεγερθούν με ειδική μέριμνα και επιμέλεια ώστε να παρουσιάζουν κάποιου είδους αντισεισμική συμπεριφορά, κυρίως γιατί ένας τέτοιος σχεδιασμός έφερε τεράστιο κόστος σε χρήματα και ανθρώπινη εργασία. Με την εφεύρεση και μετέπειτα διάδοση του οπλισμένου σκυροδέματος η τάση αυτή άλλαξε. Πλέον υπήρχε διαθέσιμο προς χρήση ένα φθηνό υλικό το οποίο παράλληλα παρουσίαζε τεράστιες αντοχές που ήταν αναγκαίες. Το οπλισμένο σκυρόδεμα γρήγορα εδραιώθηκε ως το κατεξοχήν δομικό στοιχείο για αντισεισμική προστασία και πλέον είναι γενικώς αποδεκτό ότι καλά σχεδιασμένα κτήρια από σιδηροπαγές σκυρόδεμα είναι η ιδανικότερη λύση για σεισμόπληκτες περιοχές.

Η βασική θεωρία του αντισεισμικού σχεδιασμού προβλέπει την ύπαρξη διαφόρων επιπέδων προστασίας των κατασκευών που σχετίζονται με τη διατήρηση της χρηστικότητας του κτηρίου σε σεισμούς μικρής και μεσαίας κλίμακας, την ελαχιστοποίηση παραμορφώσεων και βλαβών σε σημαντικά σεισμικά γεγονότα και την προστασία ανθρωπίνων ζωών. Για τον λόγο αυτό ορίζονται τρεις οριακές καταστάσεις^[10]:

Υπηρεσιακή οριακή κατάσταση: Οι κατασκευές οφείλουν να είναι σχεδιασμένες με σκοπό να παραμένουν πλήρως χρηστικές μετά το πέρας σεισμών μικρής κλίμακας, δίχως παράλληλα να εγείρεται ανάγκη επισκευών στο κτήριο. Οι σχεδιαστικές προτεραιότητες πρέπει να επικεντρώνονται στον περιορισμό παραμορφώσεων και στην εξασφάλιση της αντοχής όλων των στοιχείων, ώστε να αντέχουν τις σεισμικές δυνάμεις διατηρώντας ταυτόχρονα την ελαστικότητά τους. Ήδη από σεισμούς μικρής κλίμακας μπορεί να παρατηρηθεί η δημιουργία μικρορωγμών σε μέλη από Ο/Σ, παρόλα αυτά δεν πρέπει να υπάρχει σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας του δομικού οργανισμού.

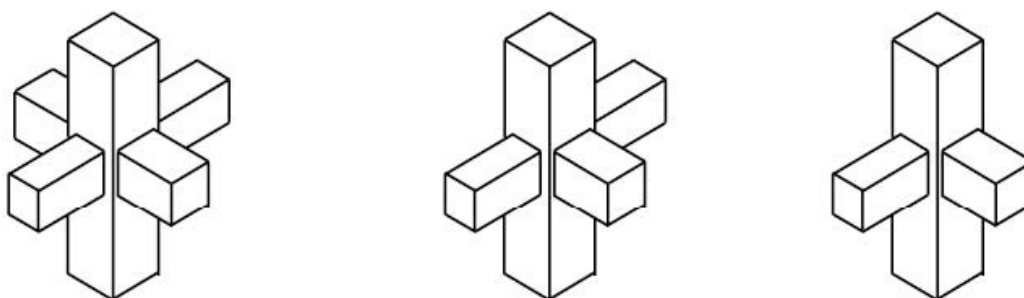
Οριακή κατάσταση ελέγχου βλαβών: Όταν οι σεισμικές δονήσεις υπερβούν σε ένταση αυτήν που προβλέπεται στην υπηρεσιακή οριακή κατάσταση γεννάται κίνδυνος εμφάνισης βλαβών που χρήζουν προσοχής. Τέτοιου είδους βλάβες συνήθως περιλαμβάνουν την δημιουργία σημαντικών ρωγμών στο σκυρόδεμα λόγω της διαρροής του οπλισμού, ακόμα και την αποκόλληση τμημάτων σκυροδέματος από τον φορέα. Σεισμικά γεγονότα τέτοιας κλίμακας φέρουν χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης εντός της προβλεπόμενης ζωής ενός κτηρίου, όμως σε περίπτωση που πλήξουν μια κατασκευή, αναμένεται ότι – εφόσον κριθεί οικονομικώς επιτρεπτό – οι επισκευές που θα γίνουν μπορούν να επαναφέρουν το κτήριο στην χρηστική του κατάσταση.

Οριακή κατάσταση επιβίωσης: Κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμικών γεγονότων είναι σχεδιαστικά αποδεκτό ότι θα προκληθούν εκτενείς ανελαστικές παραμορφώσεις στον φορέα. Ανεξαρτήτως αυτού του αποτελέσματος, η προστασία των ανθρωπίνων ζώων παραμένει ο κύριος άξονας του αντισεισμικού σχεδιασμού, ακόμα και για τους ισχυρότερους σεισμούς που μπορεί να εμφανιστούν σε μια περιοχή. Για την τήρηση αυτής της προτεραιότητας ειδική μέριμνα δίνεται στην στατική συμπεριφορά του κτηρίου, έτσι ώστε ακόμα και στο ενδεχόμενο προκλήσεως εκτεταμένων ζημιών στον φέροντα οργανισμό η κατάρρευση του κτηρίου θα αποτραπεί. Επομένως, μηχανικός οφείλει να προβλέπει κατά τον σχεδιασμό στατικές ιδιότητες που επιτρέπουν σχετικώς μεγάλες μετατοπίσεις για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας του εδάφους, δίχως βέβαια να χάνεται η ικανότητα της κατασκευής να συγκρατεί το ίδιο βάρος της.

Έτσι, η βασική θεωρία ορίζει πως το Ο/Σ στον φορέα πρέπει να αξιοποιείται πλήρως από τους μηχανικούς για την ελαχιστοποίηση μεγάλων παραμορφώσεων λόγω σεισμού, αποτρέποντας παράλληλα την κατάρρευση και προστατεύοντας τα μη δομικά στοιχεία που βρίσκονται εντός των κτηρίων. Είναι λοιπόν, εξίσου σημαντικό τα κτήρια να παρουσιάζουν αντοχή, δυσκαμψία αλλά και μια ολκιμότητα, που θα τους δίνει την δυνατότητα απορρόφησης της κινητικής ενέργειας που προέρχεται από την κίνηση του εδάφους^[9]. Αυτό απαιτεί τον σχεδιασμό όλων των στοιχείων του φέροντος οργανισμού σε συμφωνία με αυτές τις αρχές. Σε περίπτωση σεισμικής καταπόνησης, ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία ενός φορέα από Ο/Σ είναι η σύνδεση μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων.

1.2.1 Κόμβοι δοκών και υποστυλωμάτων

Ένας γενικός ορισμός του κόμβου είναι το τμήμα μετάβασης μεταξύ των υποστυλωμάτων που περικλείεται εντός του ύψους της μεγαλύτερης δοκού που εφάπτεται σε αυτό^[19]. Οι κόμβοι αναλόγως της τοποθετήσεώς τους εντός του φορέα μπορούν να είναι εσωτερικοί, εξωτερικοί ή γωνιακοί, όπως φαίνεται στην **εικόνα**. Όταν τέσσερις δοκοί συνδέονται σε κάθε μεριά με τον κόμβο τότε αυτός ονομάζεται εσωτερικός. Όταν μια δοκός συνδέεται με τον κόμβο σε μια του μεριά και άλλες δύο συνδέονται η καθεμία στις μεριές που είναι κάθετες της πρώτης ο κόμβος αυτός ονομάζεται εξωτερικός. Όταν δύο δοκοί συνδέονται η καθεμία σε δυο μεριές του κόμβου που μοιράζονται κοινή πλευρά τότε αυτός ο κόμβος ονομάζεται γωνιακός^[12]. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI) και ο Αμερικανικός Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών (ASCE) διαχωρίζουν τους κόμβους των φερόντων οργανισμών σε δύο κατηγορίες: Την κατηγορία 1 που αφορά κόμβους που έχουν σχεδιαστεί με μόνο κριτήριο την αντοχή σε βαρυτικά φορτία δίχως να ληφθούν υπόψιν πλάγια φορτία και απαιτήσεις ολκιμότητας. Την κατηγορία 2 που περιλαμβάνει κόμβους των οποίων ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψιν την αντοχή και σε πλάγια φορτία, όπως αυτά που ασκούνται λόγω ανέμων ή σεισμού^[13]. Αυτή είναι η κατηγορία που αποκλειστικά απασχολεί τον μηχανικό κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό.



Εικόνα 1.2.1.1: (Από αριστερά προς τα δεξιά) Παράδειγμα τυπικού εσωτερικού, εξωτερικού και γωνιακού κόμβου[12].

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού οι συνδέσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων αποτελούν ζώνες ιδιαίτερης προσοχής στον σκελετό ενός κτηρίου, καθώς είναι βασικά σημεία συνοχής του φέροντος οργανισμού όπου δομικά στοιχεία διασταυρώνονται σε τρεις ή και τέσσερις κατευθύνσεις^[11]. Οι λόγοι για τους οποίους τα σημεία αυτά εμφανίζουν αδυναμίες σε σεισμικές δονήσεις είναι δύο: Ο πρώτος λόγος είναι οι προαναφερθείσες αρχές αντισεισμικού σχεδιασμού, οι οποίες καλούν για την δημιουργία στοχευμένων περιοχών πρόκλησης αστοχιών πάνω στον φορέα του κτηρίου, με σκοπό την απορρόφηση κινητικής ενέργειας. Αυτές είναι οι κάθετες επιφάνειες όπου οι δοκοί συνδέονται με τα υποστυλώματα. Επιζητείται έτσι, ένας σχεδιασμός «ανίσχυρων» δοκών που θα αστοχήσουν πρώτες και «ισχυρών» υποστυλωμάτων που θα μπορούν να συγκρατήσουν το βάρος του κτηρίου κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας του σεισμού, αποτρέποντας την γενική κατάρρευση. Αυτού του είδους ο σχεδιασμός οδηγεί στην δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στους κόμβους, στην κάθετη επιφάνεια επαφής της δοκού με το υποσύλωμα^[9]. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι οι κόμβοι από την φύση τους υστερούν στην ικανοποιητική διάχυση της ενέργειας. Αποτελούν σημεία συγκεντρώσεως μεγάλων εσωτερικών δυνάμεων και ροπών που δρουν σε περιορισμένο χώρο και μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες^[10]. Εξ' αιτίας των πλάγιων φορτίων που προκαλούνται από σεισμικές δονήσεις, ροπές με αντίθετα πρόσημα αναπτύσσονται στα υποστυλώματα άνω και κάτω των κόμβων και στις δοκούς δεξιά και αριστερά των κόμβων. Αυτές οι ροπές υποβάλλουν τον κόμβο σε οριζόντια και κατακόρυφη διατμητική καταπόνηση που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία διαγωνίως εντός της σύνδεσης^[10]. Η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων – όντας μηχανισμός που έχει προβλεφθεί κατά τον σχεδιασμό – δεν καθιστά σοβαρό ζήτημα, όμως η ρηγμάτωση του πυρήνα χρήζει ιδιαίτερης προσοχής γιατί μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ολόκληρη την κατασκευή.

Είναι πλέον αναγνωρισμένο πως οι συνδέσεις δοκών και υποστυλωμάτων αποτελούν στοιχεία που απαιτούν ιδιαίτερη σχεδιαστική προσοχή σε έναν φορέα από Ο/Σ. Από τα πρώτα κιόλας πειράματα κυκλικών καταπονήσεων που διεξήχθησαν πάνω σε τέτοιου είδους στοιχεία αναγνωρίστηκε ότι η ικανότητα των κόμβων να απορροφούν ενέργεια μειωνόταν ταχύτατα όταν υπόκειτο σε κυκλικές φορτίσεις^[18], εγείροντας έτσι την ανάγκη θωρακίσεώς τους. Οι πρώτοι τυπικοί κανονισμοί για την ξεχωριστή όπλιση κόμβων τέθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1976 (ACI 352R-76^[13]), όμως καταλύτης είναι το πέραςμα ενός φονικού σεισμού το 1985 στο Μεξικό, όποτε ξεκινάει μια συστηματική μελέτη

που θα εισάγει την τυποποίηση πιο αυστηρών προδιαγραφών για τον σχεδιασμό και την όπλιση τους^[14]. Ως στέκει σήμερα, η θεωρία γύρω από τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κόμβων περιγράφεται παρακάτω.



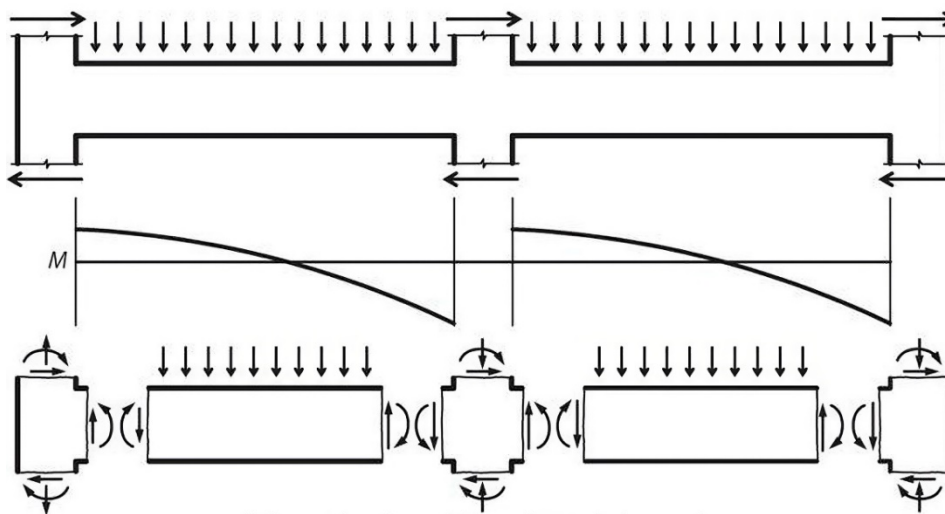
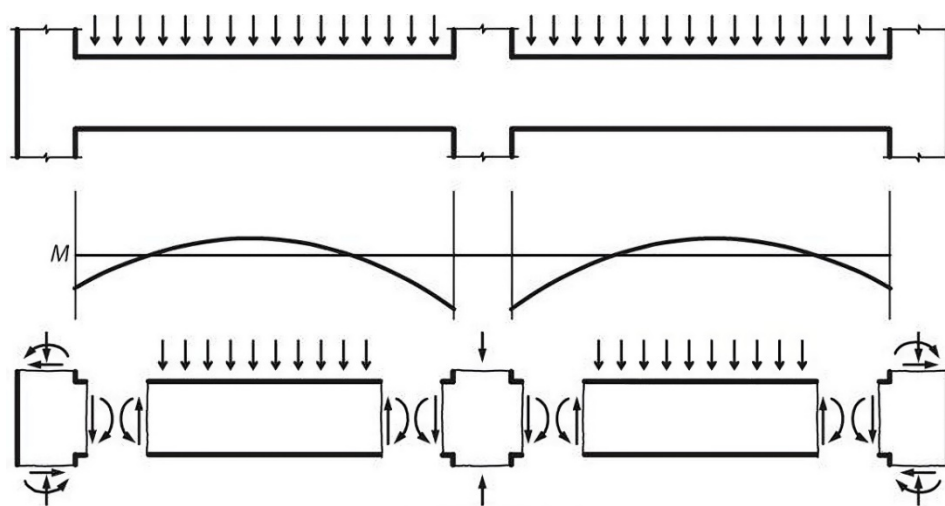
Εικόνα 1.2.1.2: Οι σκηνές Βιβλικής καταστροφής που άφησε πίσω του ο φονικότατος σεισμός της Πόλης του Μεξικού το έτος 1985. Εκτιμάται ότι περίπου 35.000 άνθρωποι χάθηκαν με το πέρασμα του σεισμού και 300.000 εκτοπίστηκαν. Η μετοικεσία των θυμάτων δεν ολοκληρώθηκε μέχρι και το έτος 2005. (Πηγή: Keystone USA Zum/Rex Shutterstock)

1.2.2 Αρχές αντισεισμικού σχεδιασμού κόμβων

Οι βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού συνδέσεων δοκών – υποστυλωμάτων για αντισεισμική συμπεριφορά ορίζονται ως εξής^[17]:

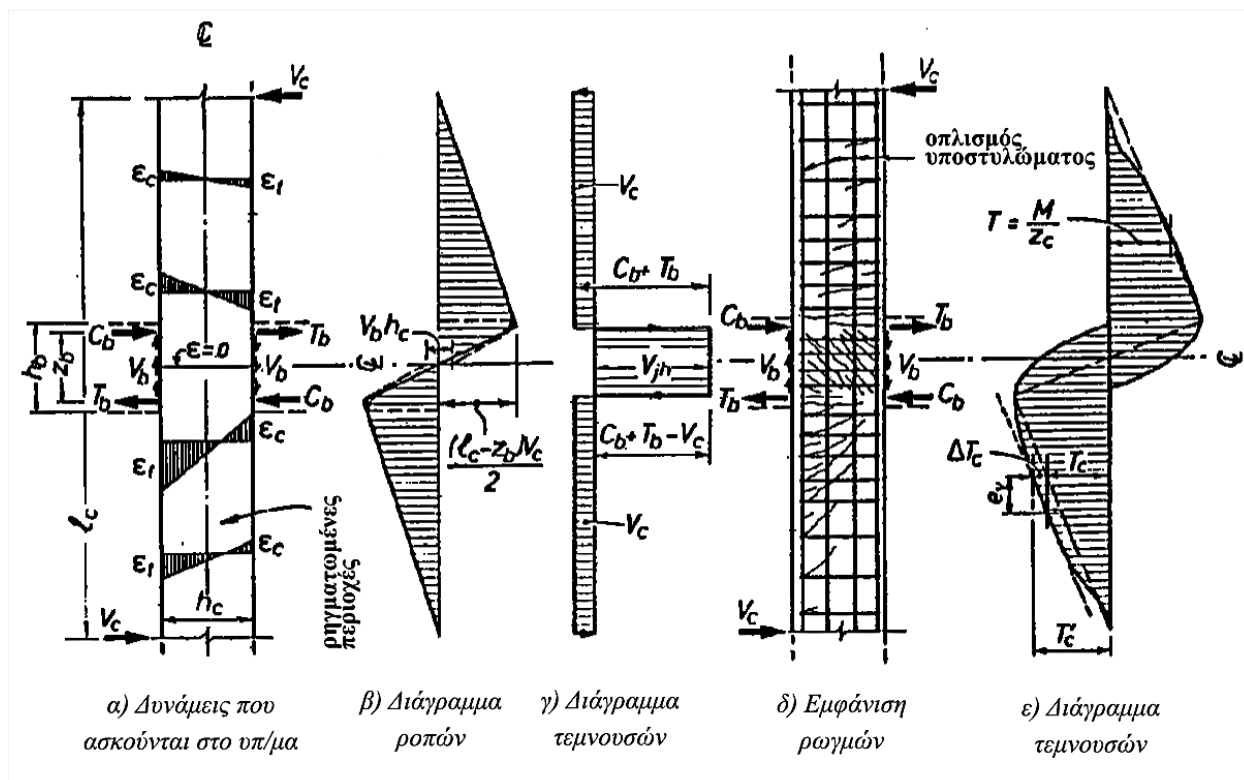
1. Πρωτεύων σχεδιαστικός σκοπός είναι κατά τη σεισμική καταπόνηση ο κόμβος να παραμείνει ουσιαστικά ελαστικός ενώ πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται στα εφαπτόμενα στοιχεία.
2. Η πραγματική αντοχή του κόμβου πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση ή μεγαλύτερη ιδανικά από την μέγιστη απαιτούμενη, αποσκοπώντας στην αποφυγή ανάγκης επιδιορθώσεων σε δυσπρόσιτα μέρη και στην εύκολη διάχυση της ενέργειας.
3. Μια πιθανή απομείωση της αντοχής του κόμβου δεν θα πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την φέρουσα ικανότητα των υποστυλωμάτων.
4. Σε πολυώροφα κτίσματα η παραμόρφωση των κόμβων δεν πρέπει να αυξάνει σημαντικά την διολίσθηση (drift) μεταξύ των ορόφων.
5. Η όποια ενίσχυση στον κόμβο κριθεί απαραίτητη δεν πρέπει κατά την εφαρμογή της να εμποδίζει την γενικότερη διαδικασία κατασκευής.

Η συμπεριφορά των κόμβων διαφέρει κατά πολύ ανάμεσα στην καταπόνησή τους μόνο από βαρυτικά φορτία και σε αυτήν από συνδυασμό βαρυτικών και πλαγίων. Τα βαρυτικά φορτία συνήθως αναπτύσσουν ροπές που κατανέμονται ομοιόμορφα στους κόμβους, στους οποίους επικρατεί επί το πλείστον μια ισορροπία ροπών. Σε αυτήν την περίπτωση η κύρια λειτουργία ενός κόμβου είναι να μεταφέρει τα αξονικά φορτία των υποστυλωμάτων και την καμπτική ένταση μεταξύ των δοκών. Για να επιτευχθεί αυτό δίχως την ανάγκη περαιτέρω ενίσχυσης, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος εντός του κόμβου πρέπει να ισούται με αυτήν στις δοκούς και στα υποστυλώματα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η ρηγμάτωση εξωτερικών κόμβων είναι το μόνο σημείο με απαιτήσεις ειδικότερης προσοχής. Αντίθετα, τα πλάγια φορτία προκαλούν ροπές οι οποίες πρέπει να διαμοιραστούν μεταξύ όλων των συνδέσεων δοκών – υποστυλωμάτων, προκαλώντας σημαντικές διατμητικές τάσεις, ανεξαρτήτως της δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων^[19].



Εικόνα 1.2.2.1: Η κατανομή των βαρυτικών φορτίων διαφέρει από αυτήν του συνδυασμού βαρυτικών και πλαγίων φορτίων. Το πιο σύνηθες αποτέλεσμα αυτής της καταπόνησης σε κόμβους είναι η ρηγμάτωση του σκυροδέματος στον πυρήνα του κόμβου.

Χρησιμοποιώντας την ισορροπία υποστυλώματος – κόμβου, γίνεται ανάλυση των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται στο σύστημα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

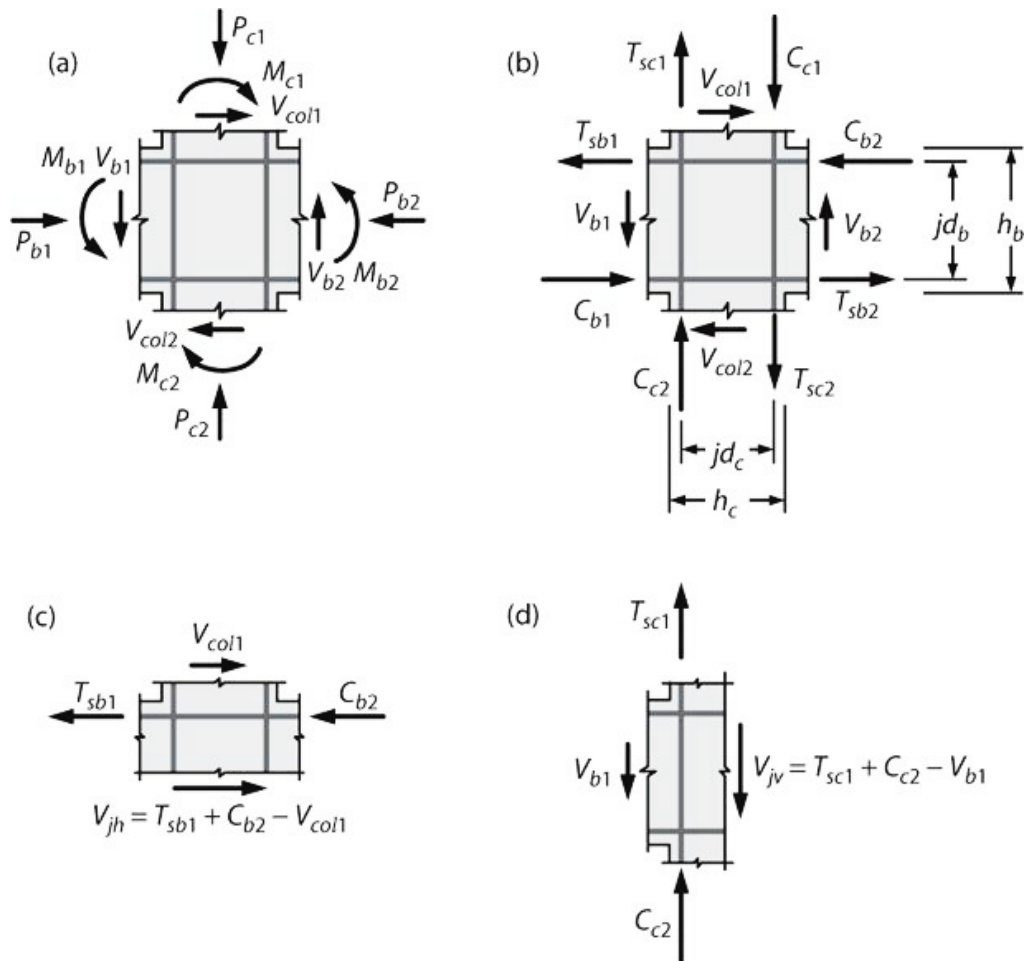


Εικόνα 1.2.2.2: Στοιχεία της αλληλεπίδρασης κόμβου – υποστυλωμάτων (πηγή: *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: Wiley; 1992)

Ενδεικτικά, από το σχήμα α), εάν γίνει η παραδοχή ότι προσεγγιστικά $C_b = T_b$ και ότι οι τέμνουσες που ασκούνται από τις δοκούς είναι ίσες, τότε η οριζόντια τέμνουσα εντός του κόμβου V_{jh} υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_{jh} = C_b + T_b - V_c = \left(\frac{l_c}{z_b} - 1 \right) V_c - \frac{h_c}{z_b} V_b$$

Σημειώνεται πως η οριζόντια τέμνουσα V_{jh} που προκύπτει έχει συνήθως μέγεθος τέσσερεις με έξι φορές μεγαλύτερο από την τέμνουσα V_c που ασκείται στα υποστυλώματα. Εν συνεχεία, κάνοντας χρήση της ισορροπίας του κόμβου υπολογίζεται η κατακόρυφη τέμνουσα που ασκείται εντός του:

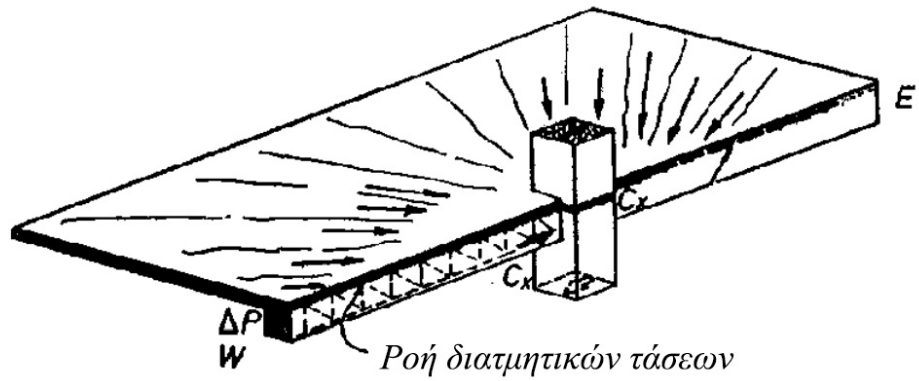


Εικόνα 1.2.2.3: Στοιχεία της ισορροπίας κόμβου (πηγή: *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: Wiley; 1992)

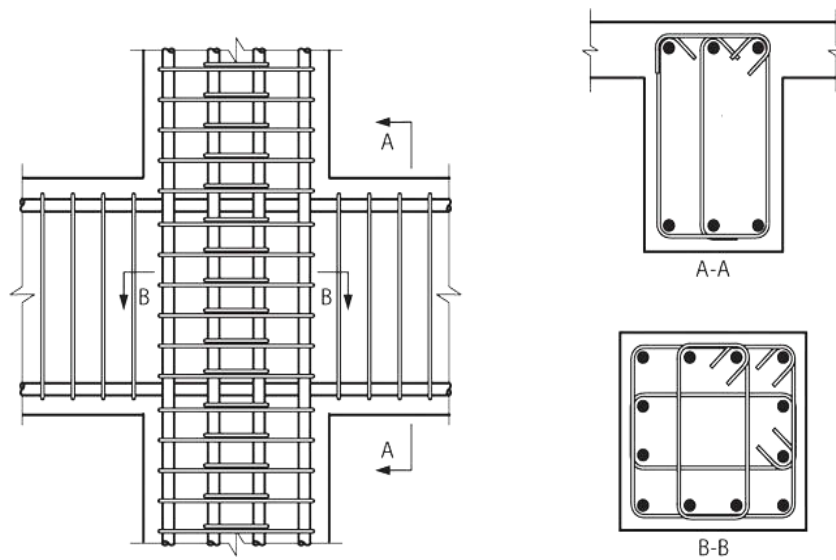
Από το σχήμα η κατακόρυφη διατμητική τάση που ασκείται μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση:

$$V_{jv} = (h_b/h_c)V_{jh}$$

Η τάξη μεγέθους αυτών των δυνάμεων δημιουργεί τεράστιες θλιπτικές και εφελκυστικές καταπονήσεις που δρουν ταυτόχρονα στον πυρήνα του κόμβου. Εάν ξεπεραστεί το όριο αντοχής τότε εντός του πυρήνα αρχίζουν να δημιουργούνται ρωγμές στον διαγώνιο άξονα που μειώνουν δραματικά την αντοχή του. Για να αποφευχθεί αυτό ειδική διατμητική ενίσχυση απαιτείται κατά τον σχεδιασμό του αρμού, όπως προβλέπεται από όλους τους κατασκευαστικούς κώδικες.



Εικόνα 1.2.2.4: Σχεδιάγραμμα ροής των διατμητικών τάσεων που καταλήγουν στον κόμβο[12].



Εικόνα 1.2.2.5: Απεικόνιση τυπικού οπλισμού σε σύνδεση υποστυλώματος – δοκού με εγκάρσιες ράβδους[15].

1.3 Παραδοσιακοί μέθοδοι ενισχύσεως και επιδιορθώσεως κόμβων

Παρά την ενίσχυσή τους, η αστοχία των κόμβων συνεχίζει να είναι σύνηθες φαινόμενο σε πολλά σεισμόπληκτα κτήρια, ακόμα και αν αυτά είναι κτισμένα τηρώντας όλους τους απαραίτητους κανονισμούς. Επιπλέον, υπάρχουν διάφορες κατασκευές σε παγκόσμιο επίπεδο που ανεγέρθησαν προ εφαρμογής διατάξεων που προέβλεπαν την ορθή ενίσχυση των κόμβων τους. Για όλα αυτά τα κτίσματα γεννάται το ζήτημα αντισεισμικής θωρακίσεως των συνδέσμων τους, τόσο πριν από τη πρόκληση αστοχιών λόγω σεισμού, όσο και μετά τον σεισμό κατά την διάρκεια της επισκευής τους. Στις ημέρες μας έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ενισχύσεως κόμβων που έχουν γνωρίσει διάφορους βαθμούς επιτυχίας στις εφαρμογές τους. Οι μέθοδοι αυτοί αναφέρονται παρακάτω:

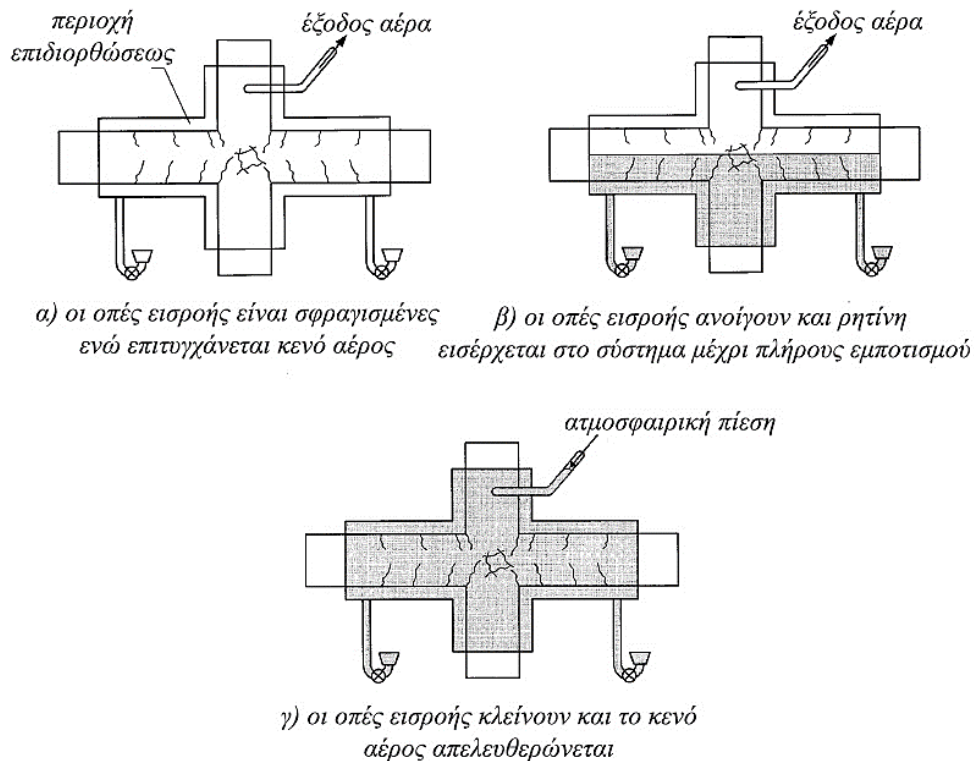
1.3.1 Μέθοδος αφαίρεσης και αντικατάστασης:

Σε περιπτώσεις εκτενούς βλάβης σε έναν κόμβο προβλέπεται η δυνατότητα μερικής ή και ολικής αφαίρεσεως του φθαρμένου σκυροδέματος και αντικατάστασής του με νέο. Αρχικά, η περιοχή γύρω από τον κόμβο θωρακίζεται προσωρινά με στηρίξεις για να διασφαλιστεί η γενικότερη στατικότητα. Στην συνέχεια, αφαιρούνται τα τμήματα του κόμβου που έχουν κριθεί ανεπαρκή και απομακρύνονται τα μικρότερα θρύμματα από σκυροδέμα εντός της αστοχίας. Μια μέθοδος αντικαταστάσεως του φθαρμένου τμήματος είναι η δημιουργία ενός «αντίγραφου» του τμήματος που αφαιρέθηκε με τη χρήση εκμαγείων και ειδικής λιθοκονίας μικρής συρρικνώσεως με υψηλές αντοχές^[16]. Το αντίγραφο στην συνέχεια τοποθετείται στον κόμβο και ό,τι κενά υπάρχουν καλύπτονται με τη χρήση ενέσεων ρητίνης. Για βλάβες ιδιαίτερα μεγάλης εκτάσεως ένας άλλος τρόπος ενισχύσεως που μελετήθηκε είναι η πλήρης αφαίρεση του σκυροδέματος εντός του κόμβου και η αντικατάστασή του με σκυροκονίαμα υψηλής αντοχής και μικρής συρρικνώσεως^[15]. Οι μέθοδοι αυτοί έφεραν ικανοποιητικά αποτελέσματα από μεριάς ενισχύσεως της αντοχής των κόμβων μετά την αντικατάσταση των φθαρμένων τμημάτων. Όμως, η πειραματική φύση αυτών των μελετών δηλώνει πως η επιτυχία τους βασίζεται στην προϋπόθεση ότι οι κόμβοι που χρήζουν ενίσχυσης βρίσκονται σε σημεία που επιτρέπουν αυτήν την επεμβατική διαδικασία αφαίρεσης και αντικατάστασης, κάτι που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα για την πλειοψηφία των περιπτώσεων αστοχίας σε φέροντες οργανισμούς. Εγείρεται παράλληλα το πρόβλημα συνοχής μεταξύ κόμβου και υποστυλωμάτων, διότι υπάρχει περίπτωση η κατά πολύ ενισχυμένη αντοχή του κόμβου ασκήσει δυσανάλογη καταπόνηση στα υποστυλώματα που θα είναι χαμηλότερων αντοχών.

1.3.2 Μέθοδος εποξειδικών ενέσεων:

Η έγχυση ρητίνης σε ρηγματωμένα τμήματα κόμβων είναι μια μέθοδος επιδιόρθωσης που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να επαναφέρει την στατική ακεραιότητα της σύνδεσης. Παρομοίως με την μέθοδο αντικαταστάσεως, το θρυμματισμένο σκυροδέμα απομακρύνεται και η ρωγμή καθαρίζεται επαρκώς. Στη συνέχεια, ρητίνη εγχέεται εντός της ρωγμής όπου και σκληραίνει με την πάροδο του χρόνου αποκαθιστώντας την αντοχή του κόμβου. Τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή της μεθόδου έχει εξελιχθεί τόσο με τη χρήση ειδικών μηχανημάτων που περικλείουν αεροστεγώς την ρωγμή για τον

μέγιστο εμποτισμό ρητίνης στην περιοχή^[20], όσο και με την εισαγωγή ειδικών ρητινών για χρήση σε επιδιορθώσεις, όπως η μεθυλο-μεθακρυλική ρητίνη. Ωστόσο, η αξιοπιστία της εποξειδικής επισκευής για την πλήρη αποκατάσταση κατεστραμμένων αρμών φέρει αμφιβολίες για την πρακτικότητα εφαρμογής της. Η πρόσβαση στον σύνδεσμο και τυχόν περιορισμοί των εγκάρσιων δοκών και πλακών δαπέδου, καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος παίζουν κρίσιμους ρόλους στην εκτέλεση αυτής της τεχνικής, επηρεάζοντας σημαντικά την επιτυχία της μεθόδου.



Εικόνα 1.3.2.1: Απεικόνιση της μεθόδου εποξειδικού εμποτισμού ρηγματωμένου κόμβου με χρήση κενού αέρος. (πηγή: French, C. W.; Thorp, G. A.; and Tsai, W. J., "Epoxy Repair Techniques for Moderate Earthquake Damage", 1990)

1.3.3 Μέθοδος χρήσης μανδύων (jacketing):

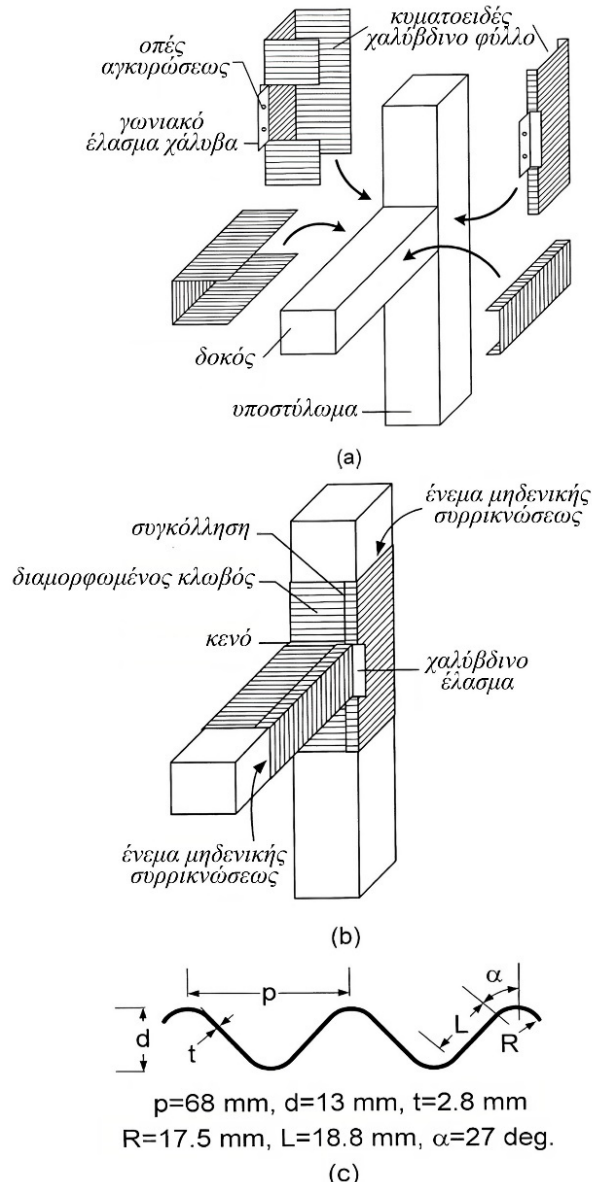
Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως εφαρμοσμένη για την αποκατάσταση στοιχείων από Ο/Σ. Περιλαμβάνει τον εναγκαλισμό του υποστυλώματος μαζί με την περιοχή του κόμβου με επιπλέον οπλισμένο σκυρόδεμα και διαμήκεις οπλισμούς, παρέχοντας ενισχυμένη δομική ακεραιότητα. Αυτή η τεχνική έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στη ενίσχυση της δυσκαμψίας και της επαγωγής ενέργειας^[21]. Μια εναλλακτική μέθοδος προβλέπει την μετατόπιση (post-tensioning) πρόσθετου οπλισμού σε μανδύα σκυροδέματος υψηλής αντοχής και κατασκευή ενός «φιλέτου» από οπλισμένο σκυρόδεμα γύρω από τον σύνδεσμο δοκού-υποστυλώματος. Το κάτω μέρος των υποστυλωμάτων περικλείεται με συμβατικό διαμήκη οπλισμό και το μέγεθος του «φιλέτου» καθορίζεται με βάση τις

απαιτήσεις οπλισμού των δοκών. Για την διευκόλυνση της τοποθέτησης του «φιλέτου» τριγωνικά τμήματα της πλάκας αφαιρούνται στις γωνίες των υποστυλωμάτων και δοκοί διατρυπούνται για την τοποθέτηση περαιτέρω ενισχύσεως^[22].

1.3.4 Μέθοδος χρήσης χαλύβδινων μανδυνών και ειδικών χαλύβδινων στοιχείων:

Μια εναλλακτική προσέγγιση στο παραδοσιακό τρόπο χρήσης μανδυνών από Ο/Σ περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός χαλύβδινου κλωβού συγκολλημένου γύρω από τον σύνδεσμο. Ο χαλύβδινος κλωβός, που αποτελείται από γωνιακά στοιχεία και συνδετικές επίπεδες ράβδους, αντιστέκεται αποτελεσματικά στην πλευρική διαστολή της άρθρωσης, παρέχοντας ικανοποιητική επικάλυψη^[23]. Άλλες μέθοδοι προβλέπουν την εγκατάσταση προκατασκευασμένων χαλύβδινων μανδυνών από επίπεδες ή κυματοειδείς πλάκες που συγκολλούνται πάνω στον κόμβο και τα κενά ανάμεσά τους εμποτίζονται με ενέματα. Ενώ τα χαλύβδινα τζάκετ προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως ο μειωμένος χρόνος κατασκευής, εγείρονται ζητήματα σχετικά με τη διάβρωση, την αισθητική, τις δυσκολίες εφαρμογής και του περιορισμού του χώρου. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων σε τρισδιάστατους κόμβους παρουσιάζει

ιδιαίτερη δυσκολία και περαιτέρω έρευνα είναι αναγκαία για την αξιολόγηση της απόδοσης διαφορετικών διαμορφώσεων χαλύβδινων μανδυνών^[24].



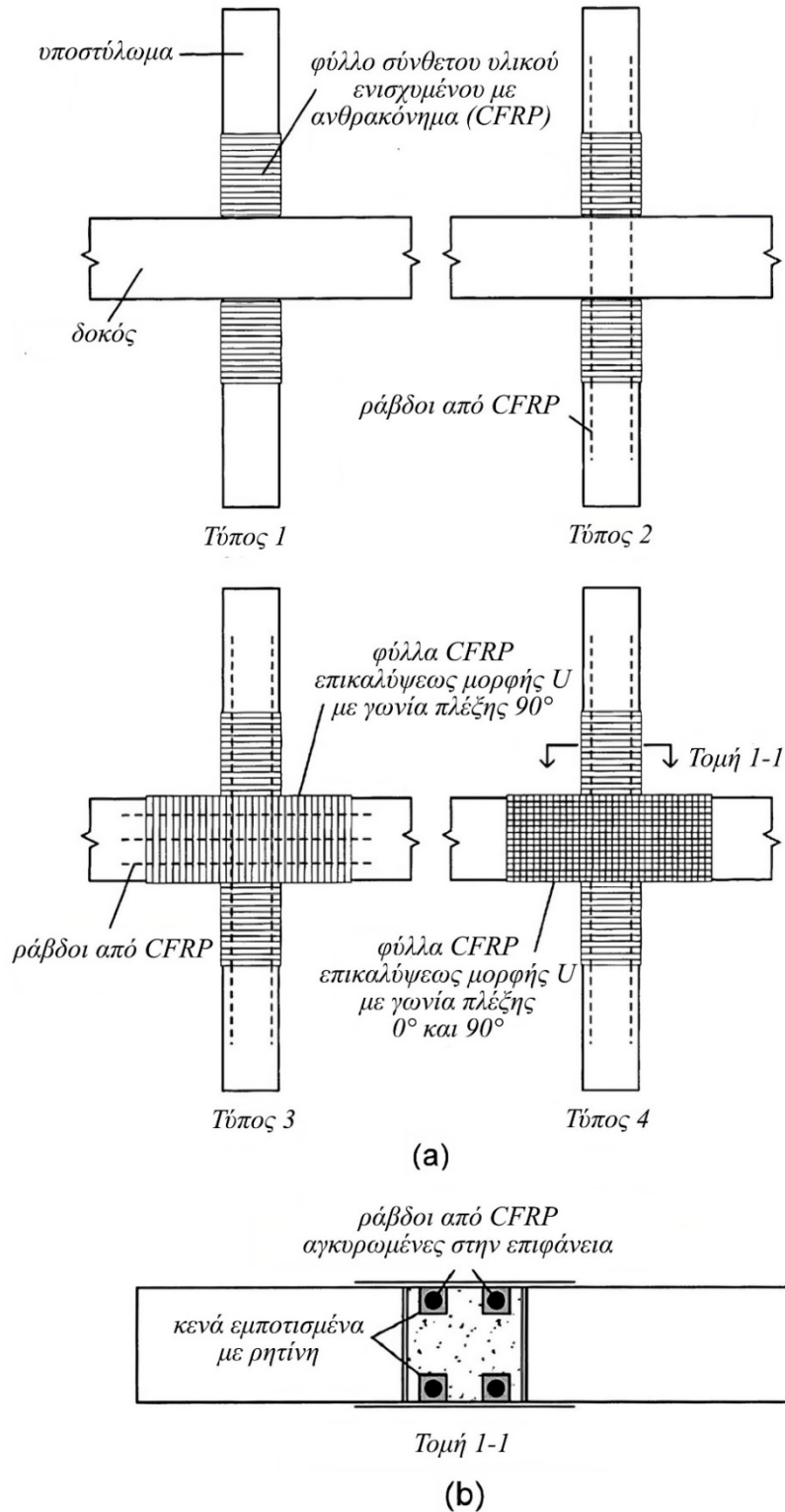
Εικόνα 1.3.4.1: Απεικόνιση της μεθόδου των κυματοειδών χαλύβδινων φύλλων: α) προ εγκαταστάσεως, β) Μετά εγκαταστάσεως, γ) Τομή του χαλύβδινου φύλλου με προτεινόμενες διαστάσεις (Πηγή: Ghobarah, A.; Aziz, T. S.; and Biddah, A., "Rehabilitation of Reinforced Concrete Frame Connections Using Corrugated Steel Jacketing", 1997)

1.3.5 Μέθοδος χρήσης ινωδώς ενισχυμένων πολυμερών υλικών:

Τα ινωδώς ενισχυμένα πολυμερή σύνθετα υλικά (ΙΕΠ ή FRP) έχουν ερευνηθεί εκτενώς από το 1998 για τη χρήση τους στην αναβάθμιση των υφιστάμενων αρμών δοκών – υποστυλωμάτων. Τα υλικά αυτά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος τους, αντοχή στη

διάβρωση, ευκολία εφαρμογής, χαμηλό κόστος εργασίας και ελάχιστη αύξηση των διαστάσεων των μελών στα οποία τοποθετούνται^[25]. Το μεγαλύτερο όμως, πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η προσαρμοστικότητα των πολυμερών ώστε να ικανοποιούν συγκεκριμένους στόχους ενίσχυσης που επιτυγχάνεται διατάσσοντας τον προσανατολισμό και την πλέξη των ινών σε κάθε στρώση του υλικού, ρυθμίζοντας έτσι την αντοχή του. Η εφαρμογή ΙΕΠ υλικών σε στοιχεία σκυροδέματος οφείλει να ακολουθεί μια συγκεκριμένη μεθοδολογία^[26]. Αρχικά, η επιφάνεια του σκυροδέματος πρέπει να καθαριστεί επιμελώς και τυχόν ρωγμές πρέπει να εμποτιστούν πλήρως με ρητίνη. Στη συνέχεια, ειδικό εποξειδικό αστάρι πρέπει να εφαρμοστεί στην επιφάνεια του στοιχείου για να επιτρέψει στο πρώτο φύλλο του πολυμερούς να δεθεί πλήρως με τον κόμβο. Μια διπλή στρώση ρητίνης πρέπει να απλώνεται προ εφαρμογής των επόμενων φύλλων των πολυμερών. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να ελέγχονται κατά την διάρκεια εφαρμογής καθώς υπάρχουν ειδικές θερμοκρασιακές απαιτήσεις και απαιτήσεις υγρασίας: Κατά την επικάλυψη του ασταριού και της ρητίνης είναι απαραίτητο η θερμοκρασία να κυμαίνεται μεταξύ 5 και 32°C, με τη σχετική υγρασία να μην ξεπερνάει το 90%. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του κόμβου πρέπει να είναι τουλάχιστον 2°C άνω του σημείου δρόσου του σκυροδέματος και η περιεκτικότητα σε υγρασία του σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4%^[14].

Η γενική βιβλιογραφία πάνω σε τέτοιου είδους ενισχυμένες συνδέσεις αφορά απλοποιημένες δισδιάστατες πειραματικές δοκιμές. Για παράδειγμα, ράβδοι πολυμερών ενισχυμένα με ίνες ανθρακονήματος (CFRP) σε συνδυασμό με εξωτερικώς συγκολλημένα φύλλα χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση και δοκιμή εσωτερικών αρμών έναντι διαφόρων βαθμών αξονικής καταπόνησης. Τα αποτελέσματα ποίκιλαν ανάλογα με τον τύπο ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε, με αυξήσεις στην αντοχή να κυμαίνονται από 7 έως 83%^[26]. Γενικώς, επικρατεί συναίνεση ότι τα εξωτερικώς συνδεδεμένα ΙΕΠ υλικά μπορούν να αντιμετωπίσουν τους περιορισμούς που παρατηρούνται σε άλλες τεχνικές ενίσχυσης και να βελτιώσουν την απόκριση της άρθρωσης σε διατμητικές καταπονήσεις. Η αποκόλληση των σύνθετων υλικών από την επιφάνεια του σκυροδέματος είναι ο κυρίαρχος λόγος αστοχίας, τονίζοντας τη σημασία σωστής προετοιμασίας της επιφάνειας και την ανάγκη ύπαρξης αξιόπιστων μηχανικών μεθόδων αγκυρώσεως των υλικών.



Εικόνα 1.3.5.1: Απεικόνιση των τυπικών μορφών ενισχύσεως κόμβων με χρήση φύλλων πολυμερούς ενισχυμένου με ανθρακόνημα (CFRP) σε α) όψη και β) τομή λεπτομέρειας (Πηγή: Prota, A.; Manfredi, G.; Nanni, A.; and Cosenza, E., "Selective Seismic Strengthening of RC Frames with Composites", 2002)

Οι περισσότερες μέθοδοι ενισχύσεως παρά την επιτυχή απόδοσή τους κάτω από ελεγχόμενες πειραματικές συνθήκες, φέρουν σημαντικούς περιορισμούς στην πρακτική τους εφαρμογή. Αυτό οφείλεται πρωτίστως στην αλληλεπίδραση του κόμβου με διάφορα δομικά στοιχεία, η επιρροή των οποίων στην απόδοση των εφαρμογών είναι αδύνατο να προσομοιαστεί πλήρως στο εργαστήριο. Οι διάφορες αρχιτεκτονικές απαιτήσεις και η γενικότερη αισθητική του κάθε κτίσματος παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Ως αποτέλεσμα, περαιτέρω έρευνα απαιτείται για την ανάπτυξη και αξιολόγηση νέων μεθόδων ενισχύσεως. Λαμβάνοντας υπόψη ένα ευρύτερο φάσμα τύπων υλικών και νέων εφαρμογών μπορεί να γίνει σημαντική πρόοδος σε αυτόν τον τομέα.

1.4 Στόχος εργασίας

Το θέμα της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση της εφαρμογής δύο μεθόδων ενισχύσεως κόμβων από Ο/Σ μέσω της προσομοίωσής τους στο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η προσομοίωση είναι βασισμένη στην πειραματική διαδικασία που διενεργήθηκε από τους Εμμανουήλ Α. Βουγιούκα, Εμμανουήλ Γκόλια, Klaus Wittemann, Γεώργιο Ι. Καλογερόπουλο και Χρήστο Καραγιάννη και δημοσιεύθηκε στο άρθρο «Cyclic response of RC beam-column joints strengthened with transverse steel bars and with C-FRP diagonal ties», Acta Polytechnica (2022)^[28]. Η πρώτη μέθοδος αφορά την διάτρηση χαλύβδινων ράβδων οπλισμού εντός του κόμβου για την ενίσχυση της αποκρίσεως σε σεισμό. Η δεύτερη αφορά την τοποθέτηση ράβδων από CFRP εντός του κόμβου σε καθορισμένη διάταξη μέσω διατρήσεως. Δύο δείγματα – έκαστο προετοιμασμένο με την κάθε μέθοδο – και ένα δίχως ενίσχυση (δείγμα ελέγχου) σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Abaqus και υπεβλήθησαν σε κυκλική φόρτιση με τον σκοπό προσομοίωσης σεισμικών δονήσεων. Εν συνεχεία, έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και σύγκριση αυτών με εκείνα που παρέχονται από το πείραμα του επιστημονικού άρθρου.

Εντός αυτού του πλαισίου οι στόχοι της εργασίας ορίζονται ως οι εξής:

- I. Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κόμβων κάτω από κυκλικές καταπονήσεις ως προς τις παραμορφώσεις και την αντοχή τους ανάλογα με την μέθοδο ενισχύσεως που χρησιμοποιήθηκε. Τα δυο δείγματα θα συγκριθούν ως προς την απόκρισή τους με το τρίτο δείγμα ελέγχου καθώς και μεταξύ τους και θα εκλεγεί εκείνο με τα ικανοποιητικότερα αποτελέσματα.
- II. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με εκείνων που είναι δοσμένα από το πραγματικό πείραμα και επισήμανση των ομοιοτήτων και διαφορών που παρουσιάστηκαν.
- III. Αξιολόγηση της αξιοπιστίας του υπολογιστικού προγράμματος Abaqus να προσομοιώνει δομές από οπλισμένο σκυρόδεμα και επισήμανση τυχόν περιορισμών που εμφανίζονται.

1.4.1 Δομή της εργασίας

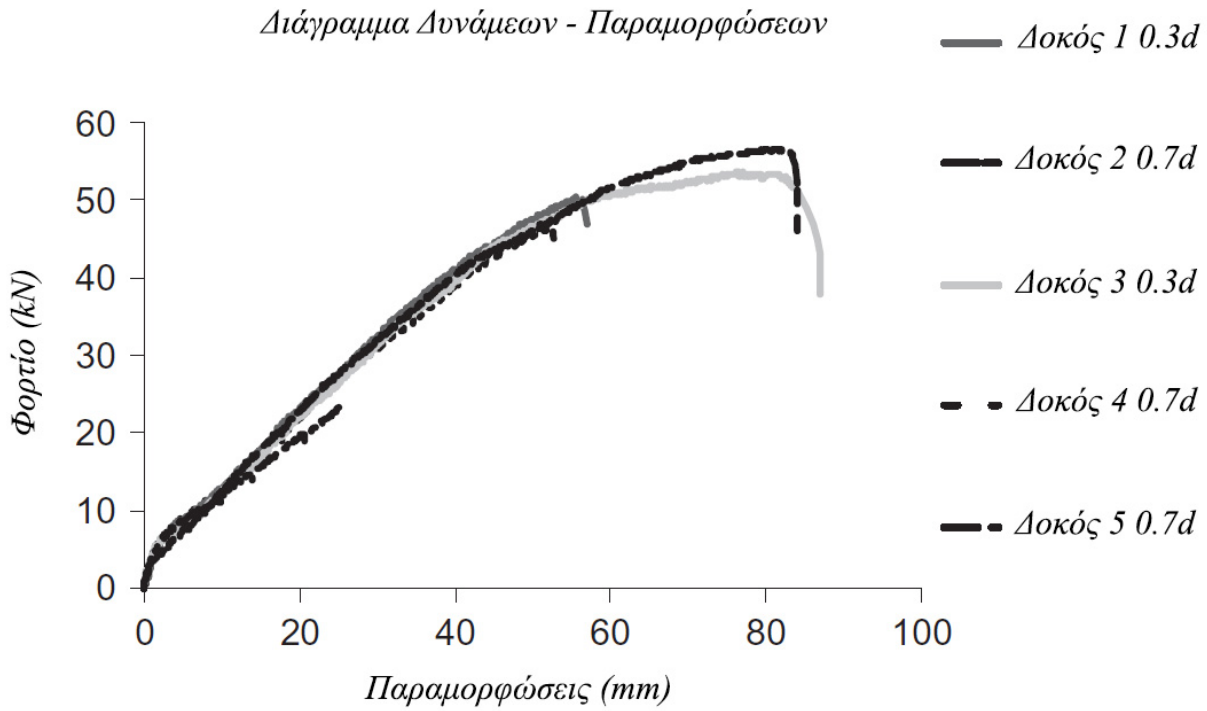
Ύστερα του θεωρητικού πλαισίου που καθορίστηκε στην εισαγωγή, θα ακολουθήσει μια βιβλιογραφική επισκόπηση προηγούμενων ερευνών πάνω ενισχύσεις κόμβων με ράβδους χάλυβα και CFRP, καθώς και

μελέτες που θέτουν ένα μεθοδολογικό υπόβαθρο για την προσομοίωση συνδέσεων οπλισμένου σκυροδέματος σε υπολογιστικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί σε υφιστάμενες μελέτες που αξιοποίησαν συγκεκριμένα το πρόγραμμα Abaqus στις προσομοιώσεις τους. Στην συνέχεια, θα γίνει περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση της εργασίας, αρχικά με την περιγραφή του πραγματικού πειράματος που διεξάγη για τον καθορισμό των συνθηκών που πρέπει να προσομοιαστούν. Θα ακολουθήσει μια εισαγωγή στο περιβάλλον της ακαδημαϊκής άδειας του προγράμματος Abaqus και περιγραφή των βασικών μηχανισμών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πραγμάτωση της παρούσας εργασίας. Αφού γίνει κατανοητή παρουσίαση του προγράμματος, η διαδικασία της προσομοίωσης των δειγμάτων και της κυκλικής φορτίσεώς τους θα αναλυθεί λεπτομερώς και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που έφεραν. Κατά την ανάλυση και εξέταση όλων των αποτελεσμάτων θα κριθεί η επίδοσή τους και θα γίνει σύγκρισή τους με τα αληθινά. Τέλος, θα σχολιαστεί η αξιοπιστία του Abaqus ως προς την ευχρηστία του για τέτοιου είδους αναλύσεις και της αντιστοιχίας των αποτελεσμάτων που δίνει με αυτά της πραγματικότητας.

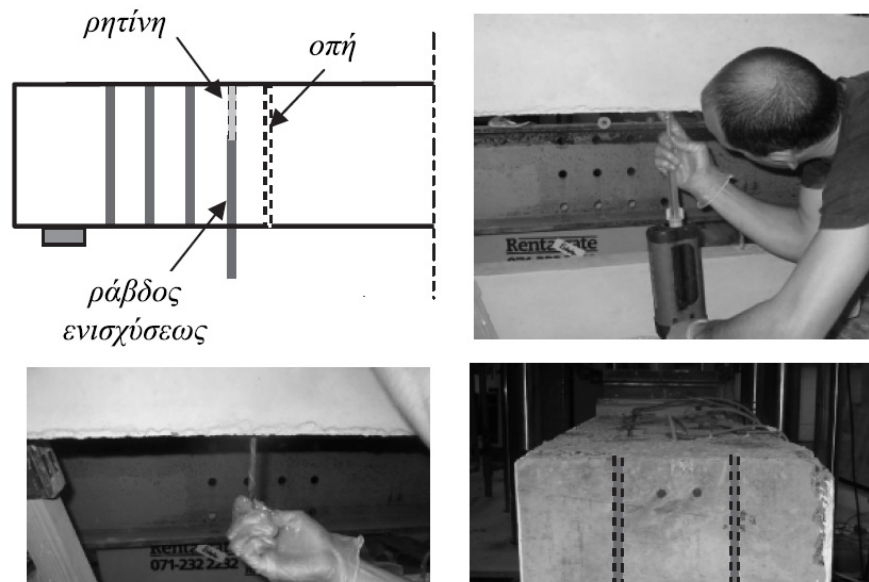
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1.1 Εισαγωγή και πειραματική μελέτη της μεθόδου βαθιάς ενσωμάτωσης (BE)

Διάφορες μέθοδοι χρήσης συμβατικών χαλύβδινων ράβδων οπλισμού για την περαιτέρω ενίσχυση μελών από Ο/Σ έχουν διερευνηθεί ήδη από την αρχή της νέα χιλιετίας σε πολύ γενικά πλαίσια. Η πρώτη μεθοδική πειραματική ανάλυση αποκλειστικά για την πρόσθεση επιπλέον ράβδων εισήχθη από τους P. Valerio, T. J. Ibell και A. P. Darby στην έρευνά τους ονόματι «Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening»^[29]. Στην υφιστάμενη έρευνα εισάγεται πιλοτικά η μέθοδος βαθιάς ενσωμάτωσης (deep embedment) και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της ενίσχυσης δοκών, όπου σε προκαθορισμένες περιοχές είχαν ενσωματωθεί μέσω διατρήσεως ράβδοι χάλυβα ή ράβδοι πολυμερών. Παρόλο που η αρχική εφαρμογή της μεθόδου αφορούσε αρχικώς δοκούς, πλέον έχει επεκταθεί σε διάφορα στοιχεία Ο/Σ συμπεριλαμβανομένων και των κόμβων. Η διαδικασία περιλάμβανε την διάνοιξη οπών 2mm μεγαλύτερων σε διάμετρο από την διάμετρο των ράβδων που χρησιμοποιούνταν, τον εμποτισμό των οπών με ρητίνη και την τελική εισχώρηση των ράβδων. Διερευνήθηκαν οι αποκρίσεις ράβδων ενισχυμένων με χάλυβα και ΙΕΠ με ικανοποιητικά αποτελέσματα να λαμβάνονται και από τα δύο δείγματα. Οι ράβδοι ήταν διαφόρων διαμέτρων και τα φορτία ήταν εναλλασσόμενης έντασης και σε διαφορετικές θέσεις. Οι διατμητικές αντοχές των δοκών ενισχύθηκαν σημαντικά με πολύ μικρές διαφορές να παρατηρούνται στην απόκριση μεταξύ των δοκών ενισχυμένων με χάλυβα και αυτών ενισχυμένων με ΙΕΠ ανεξαρτήτως της τάξης μεγέθους και θέσης των ασκούμενων φορτίων^[29]. Παρόλα αυτά προτάθηκε ότι η χρήση ράβδων ΙΕΠ ήταν προτιμότερη μόνο από μεριάς του χαμηλού βάρους τους, το οποίο βοήθησε στην εύκολη τοποθέτησή τους. Η διεξαγωγή αυτής της έρευνας είναι καθοριστική, καθώς οδήγησε στην πειραματική διεύρυνση της μεθόδου BE για εφαρμογές σε διάφορα στοιχεία από Ο/Σ και τελικώς στην πειραματική της εφαρμογή για ενίσχυση κόμβων.



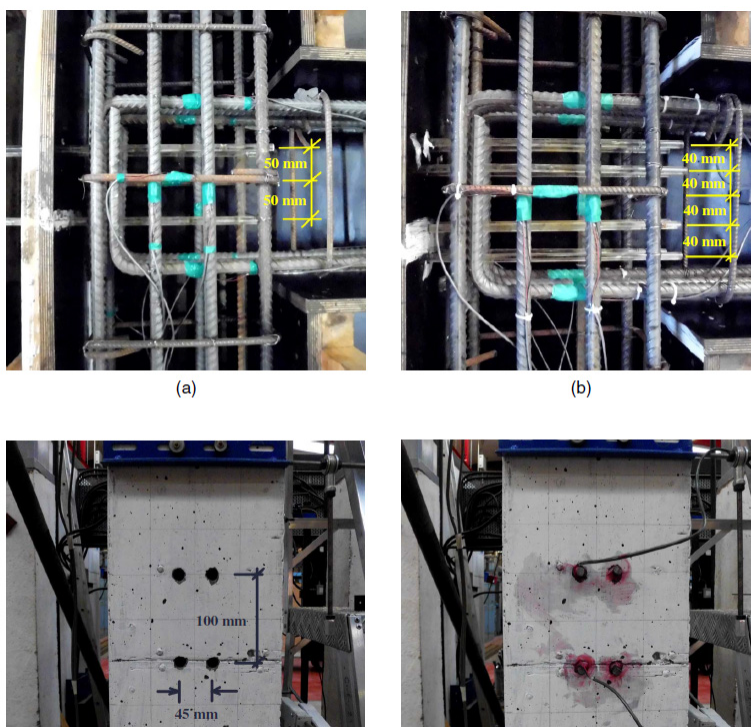
Εικόνα 2.1.1.1: Διάγραμμα δυνάμεων – παραμορφώσεων[29] από 5 δείγματα δοκών που μελετήθηκαν με την άσκηση φορτίου ίδιας τάξεως σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο ενισχύσεως, όπως αναφέρεται δεξιά της αρίθμησης των δοκών . Οι δοκοί 1 και 3 ήταν ενισχυμένες με ράβδους χάλυβα και οι δοκοί 2,4,5 με ράβδους ΙΕΠ. Σημειώνεται η παρόμοια συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα δυο είδη δειγμάτων.



Εικόνα 2.1.1.2: Στιγμιότυπα από την εφαρμογή της μεθόδου βαθιάς ενσωμάτωσης[29].

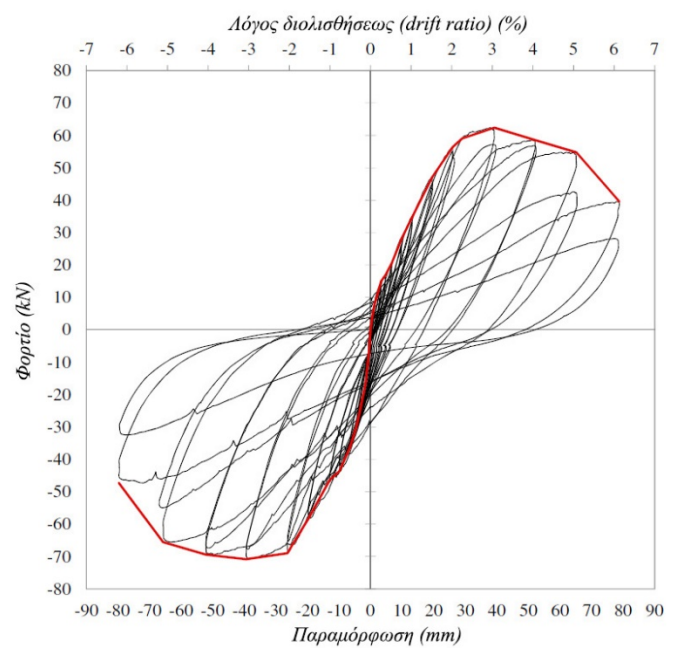
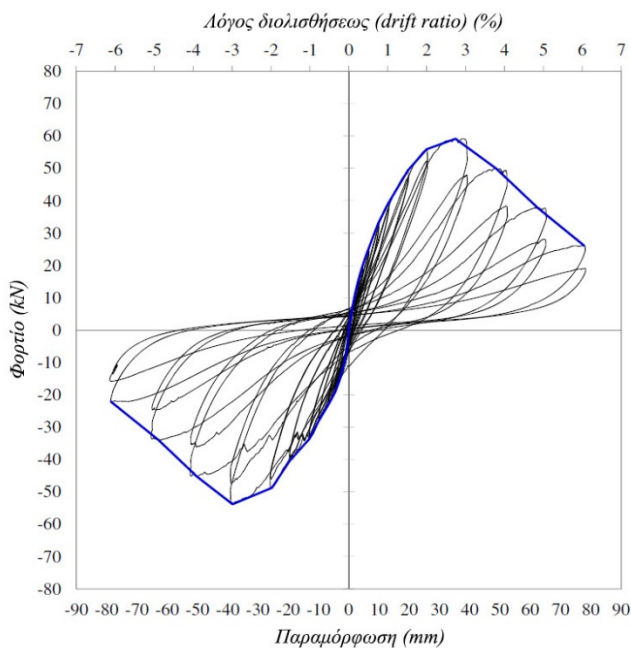
2.1.2 Ενίσχυση κόμβων με τη μέθοδο ΒΕ

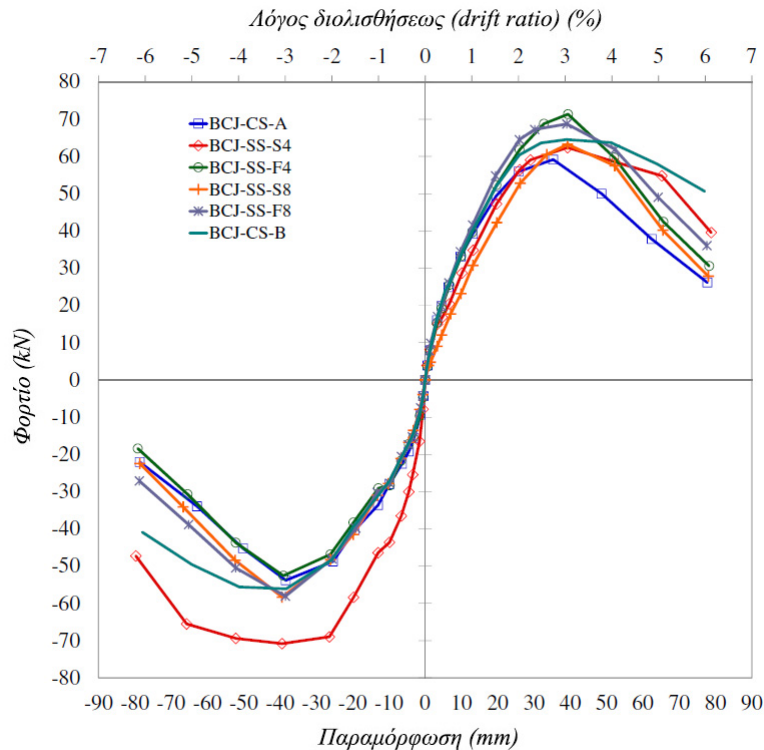
Ύστερα της πρώτης παρουσίασης της μεθόδου στην προαναφερθείσα έρευνα, μελετήθηκε η εφαρμογή της για την ενίσχυση αποκλειστικά συνδέσεων δοκών – υποστυλωμάτων. Η έρευνα διεξήχθη από τους Ridwan Rahman, Μάριο Θεοφάνους, Samir Dirar, Yaser Jemaa, και Mohammed Elshafie και δημοσιεύθηκε στο Περιοδικό Σύνθετων Υλικών Δόμησης (*Journal of Composites for Construction*) με τον τίτλο «Experimental Behavior and Design of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints Strengthened with Embedded Bars»^[30]. Σε αυτήν την έρευνα πέντε δείγματα κόμβων δοκών – υποστυλωμάτων υπεβλήθησαν σε κυκλικές φορτίσεις και η απόκρισή τους μελετήθηκε. Το πρώτο ήταν δείγμα ελέγχου με όπλιση στην σύνδεση όπως αυτή προβλέπεται από τον κανονισμό ACI 352R-02 τους αμερικανικού ινστιτούτου για το σκυρόδεμα^[31] και τα υπόλοιπα τέσσερα ενισχύθηκαν με επιπλέον ράβδους στην περιοχή του κόμβου κατασκευασμένες από χάλυβα και ΙΕΠ. Αξίζει να σημειωθεί πως ο οπλισμός που έφεραν τα πειραματικά δείγματα (πλην δηλαδή του δείγματος ελέγχου) επιλέχθηκε εσκεμμένα να οριστεί με κανονισμούς προ 1980, έτσι ώστε να τονιστεί η συνεισφορά στην ενίσχυση αντοχής που θα έφεραν οι επιπλέον ράβδοι. Η διάταξη των ράβδων ενισχύσεως ήταν παρόμοια με αυτή του πειράματος πάνω στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία και συνεπώς παρόμοια με αυτήν των προσομοιωμένων δειγμάτων. Στην περιοχή του κόμβου με διεύθυνση παράλληλη της δοκού – κάθετα δηλαδή στην επιφάνεια του υποστυλώματος – τοποθετήθηκαν οι ράβδοι με την μέθοδο ΒΕ σε βάθος που αντιστοιχούσε στο $0.12d$, όπου d η διάμετρος των ράβδων ενισχύσεως (για ράβδους διαμέτρου $\varnothing 16$ mm το βάθος ενσωματώσεως ήταν 195mm). Ύστερα τα δείγματα υπεβλήθησαν σε κυκλική φόρτιση μέσω επιβαλλόμενων παραμορφώσεων που αντιστοιχούσαν σε ορισμένα ποσοστά του λόγου διολίσεως (drift ratio).



Εικόνα 2.1.2.1: Η διάταξη της ενίσχυσης δύο διαφορετικών τύπων α),b): προ σκυροδέτησης μαζί με τις διαστάσεις μεταξύ των ράβδων και c),d): μετά την σκυροδέτηση[31].

Στα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι εμφανές ότι η ενίσχυση με την μέθοδο ΒΕ συνεισφέρει σημαντικά στην ενδυνάμωση των κόμβων. Τα ενισχυμένα δείγματα και των δύο τύπων εμφάνισαν παρομοίως αναβαθμισμένη αντοχή σε φορτία και παραμορφώσεις, όπως παρατηρήθηκε και στην αρχική έρευνα που είχε διεξαχθεί. Οι ράβδοι από ΙΕΠ παρουσίασαν μεγαλύτερη καταπόνηση από τις ράβδους χάλυβα, κάτι που λογικά οφείλεται στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των ΙΕΠ συγκριτικά με τον χάλυβα. Τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν βελτιώσεις στη διατμητική αντοχή της άρθρωσης που κυμαίνονταν από 6% έως 21%. Επιπλέον, τα ενισχυμένα δείγματα ήταν 6% έως 93% πιο όλκιμα σε σύγκριση με το δείγμα ελέγχου. Τα ενισχυμένα με χάλυβα δείγματα παρουσίασαν πιο όλκιμη συμπεριφορά από τα ενισχυμένα με ΙΕΠ δείγματα λόγω της υψηλής ολκιμότητας των χαλύβδινων ράβδων. Η ικανότητα διαχύσεως ενέργειας και η ακαμψία από κορυφή σε κορυφή των ενισχυμένων δειγμάτων ήταν 10% έως 54% και 2% έως 35% υψηλότερες από αυτές του δείγματος ελέγχου αντίστοιχα, ανεξάρτητα από το υλικό των ενσωματωμένων ράβδων. Ως προς την σχετική στρόφη μεταξύ δοκού και κόμβου, τα ενισχυμένα δείγματα έδειξαν υψηλότερη περιστροφή του σταθερού άκρου δέσμης, υποδηλώνοντας την έναρξη ενός μηχανισμού άρθρωσης δοκού. Τα ενισχυμένα με χάλυβα δείγματα είχαν υψηλότερη σχετική περιστροφή σε σύγκριση με τα ενισχυμένα με ΙΕΠ δείγματα^[31].





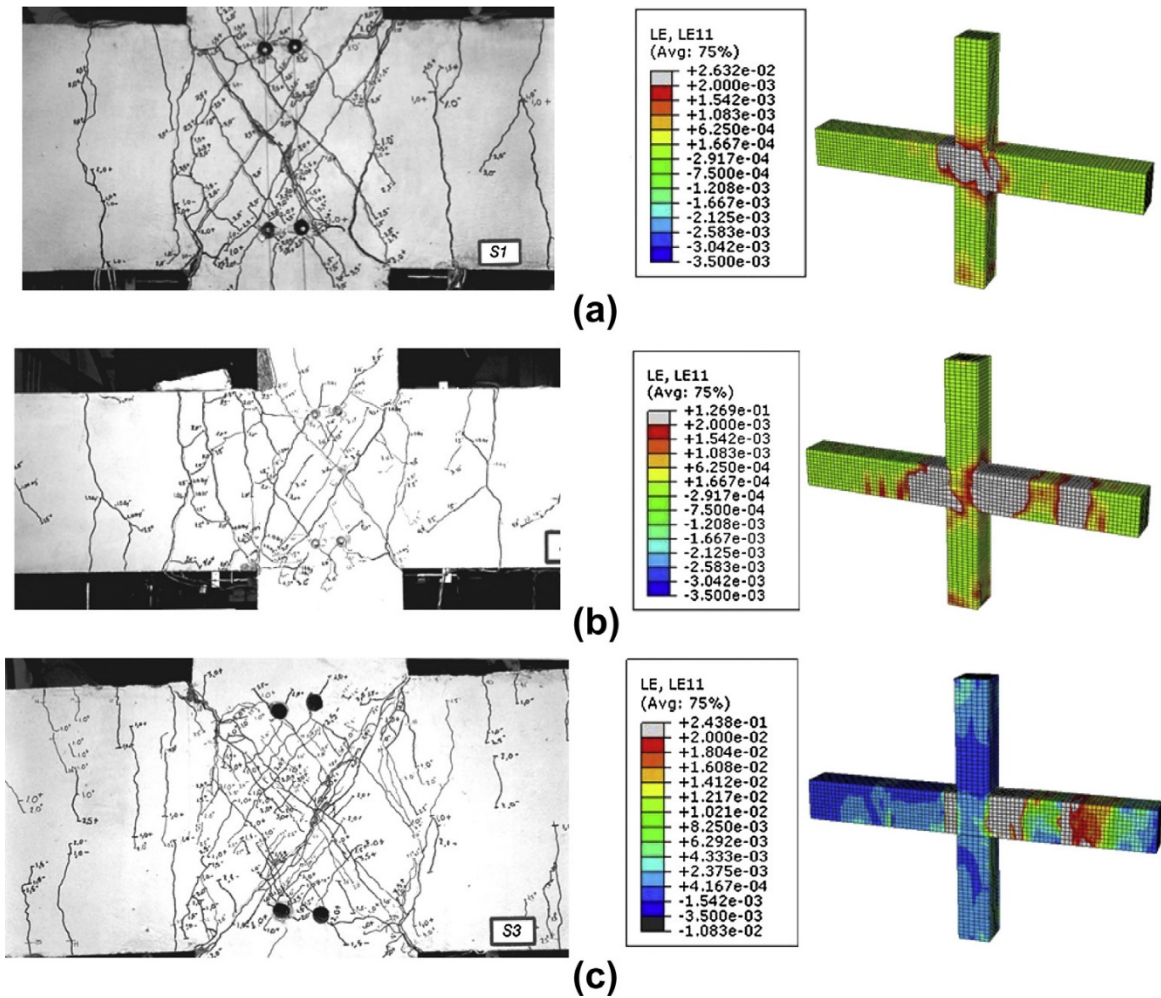
Εικόνα 2.1.2.2: (Άνω): Ενδεικτικά διαγράμματα δυνάμεων – παραμορφώσεων δύο δειγμάτων του πειράματος κάτω από κυκλικές φορτίσεις. (Κάτω): Καμπύλη S όλων των μελετημένων δειγμάτων με τις αντίστοιχες αποκρίσεις τους[31]. Σημειώνονται οι αριθμητικές τιμές για άτυπη σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αργότερα.

Οι μελέτες αυτές θέτουν ένα πειραματικό πλαίσιο για την γενική μορφή των αναμενόμενων αποτελεσμάτων, τόσο από τα δείγματα του πειράματος αναφοράς πάνω στο οποίο βασίστηκε η εργασία, όσο και από τα δείγματα που προσομοιώθηκαν μέσω του προγράμματος Abaqus. Παρακάτω καθορίζεται το πειραματικό πλαίσιο της υπολογιστικής προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων για μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.2.1 Προσομοιώσεις μελών από Ο/Σ με το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

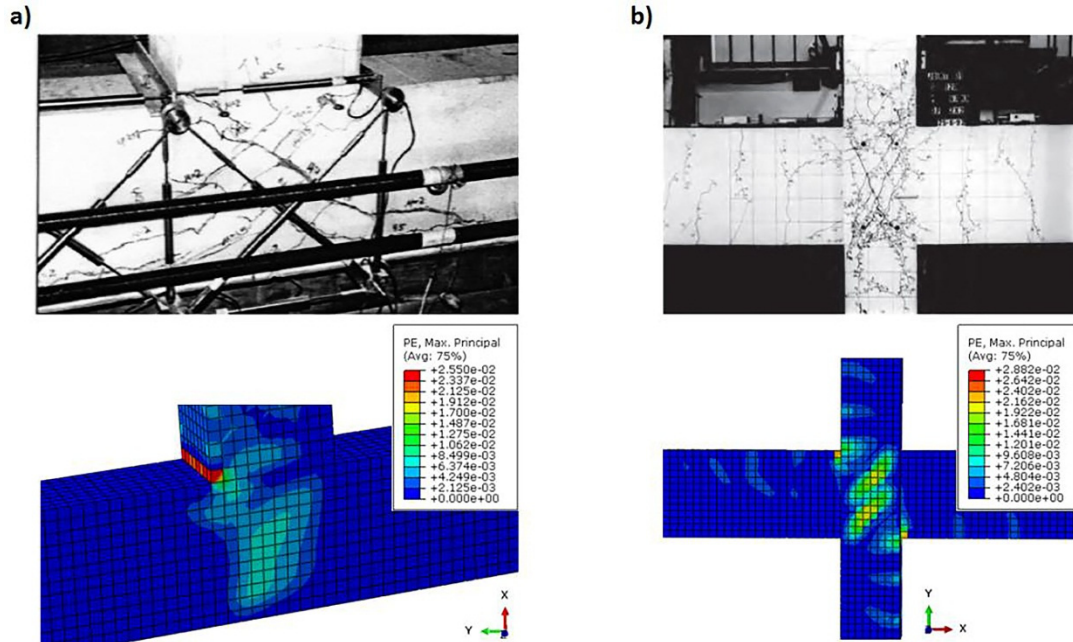
Το υπολογιστικό πρόγραμμα Abaqus χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις στοιχείων από το 1978 με τις δυνατότητές του να έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία είκοσι χρόνια. Ήδη από το 2010 έχουν γίνει προσπάθειες προσομοίωσης μελών από Ο/Σ με διάφορα στάδια επιτυχίας. Οι έρευνες των Jianqiang Han^[32] και Hamid Sinaei^[33] έδειξαν ότι η επαγγελματική άδεια του Abaqus Explicit μπορούσε να προσομοιώσει επαρκώς δοκούς που υποβάλλονταν σε κυκλικές καταπονήσεις. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που δινόταν από το πρόγραμμα ελέγχονταν με πραγματικά αποτελέσματα πειραμάτων εργαστηρίου. Το πρώτο άρθρο αναφορικά με την προσομοίωση συνδέσμων δοκών – υποστυλωμάτων κάτω από κυκλική καταπόνηση δημοσιεύτηκε από τους Ali Abbas, Sharifah Syed Mohsin και Demetrios Cotsonos το 2014 με τίτλο «Seismic response of steel fibre reinforced concrete beam–column joints»^[34].

Στην έρευνα μελετήθηκε η προσομοιωμένη απόκριση ενός εσωτερικού κόμβου δύο δοκών και δύο υποστυλωμάτων κάτω από κυκλική φόρτιση, μέσω της επαγγελματικής άδειας του Abaqus/Explicit. Παρατηρήθηκε ότι η παραμόρφωση καθώς και οι δημιουργούμενες ρωγμές αντιστοιχούσαν σε μεγάλο βαθμό με τα αποτελέσματα πραγματικών πειραμάτων.



Εικόνα 2.2.1.1: Σύγκριση πειραματικά καθορισμένων και αριθμητικά προβλεπόμενων σχηματισμών ρωγμών που εμφανίστηκαν προ αστοχίας για εσωτερικές αρθρώσεις[34].

Η πιο πρόσφατη έρευνα που γνώρισε γενική αποδοχή πάνω στην προσομοίωση συνδέσεων δοκών – υποστυλωμάτων σε καταπόνηση δημοσιεύθηκε με τίτλο «Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections with Governing Joint Shear Failure Mode»^[35] από τους Najafgholipour, Dehghan, Dooshabi και Niroomandi το 2017 και ασχολήθηκε κυρίως με την διατμητική αστοχία του πυρήνα του κόμβου κάτω από καταπόνηση. Τα αποτελέσματα ήταν αξιόπιστα με βάση τα πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας.



Εικόνα 2.2.1.2: Σύγκριση μεταξύ του σχηματισμού ρωγμών διάτμησης αρμού που λήφθηκε από την ανάλυση σε Abaqus και αυτού που παρατηρήθηκε στη δοκιμή σε: α) Δοκίμιο εξωτερικής σύνδεσης. β) Δοκίμιο εσωτερικής σύνδεσης[35].

Επομένως η αξιοπιστία της χρήσης της επαγγελματικής άδειας του Abaqus έχει επαλειφθεί με πειραματικές διαδικασίες. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της ακαδημαϊκής άδειας του προγράμματος, για την πειραματική χρήση της οποίας δεν υπάρχουν αναφορές στην γενική βιβλιογραφία. Η ακαδημαϊκή άδεια του Abaqus φέρει ορισμένες διαφορές και περιορισμούς ως προς τις ικανότητες αναλύσεως που είναι δυνατές μέσω του προγράμματος οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω.

3. Μεθοδολογία

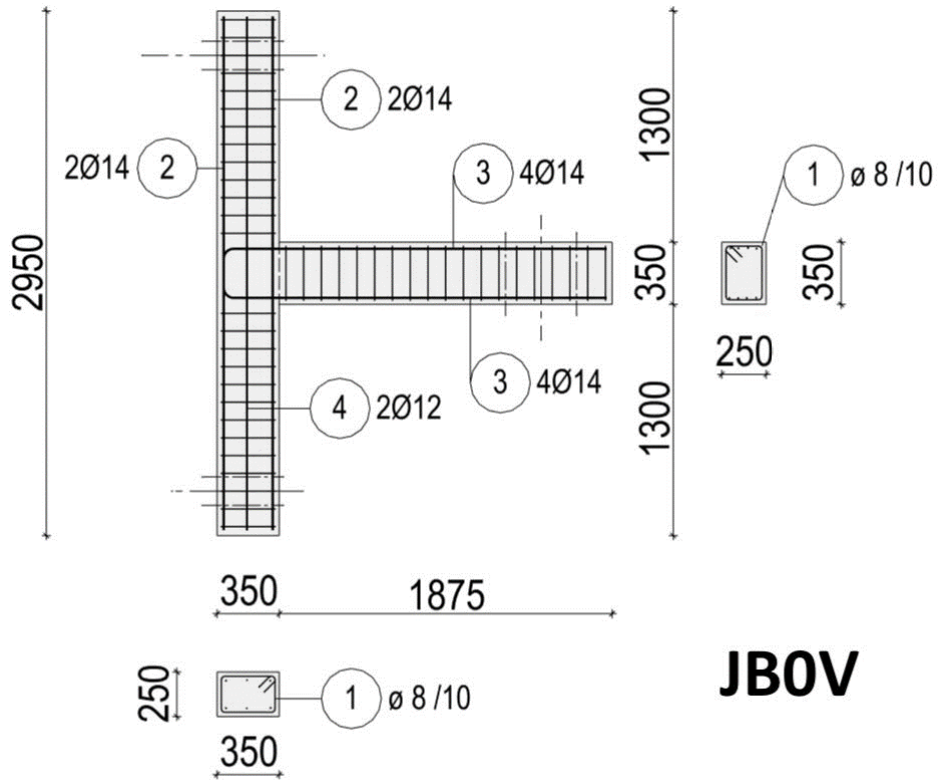
3.1 Καθορισμός πειραματικών συνθηκών με βάση το πείραμα αναφοράς

Η προσομοίωση των δοκιμών των κόμβων έγινε σύμφωνα με την προαναφερθείσα έρευνα από το άρθρο «Cyclic response of RC beam-column joints strengthened with transverse steel bars and with C-FRP diagonal ties». Ο καθορισμός των αντίστοιχων συνθηκών με αυτές που καθορίστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία είναι ύψιστης σημασίας για την καθιέρωση αξιόπιστων αποτελεσμάτων και την αποτελεσματικότερη σύγκρισή τους με τα πραγματικά. Τα πειραματικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν τρία: το πρώτο είναι ένα δείγμα ελέγχου που έφερε τον προβλεπόμενο οπλισμό σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα επονομασμένο JBOV. Το δεύτερο δείγμα ήταν παρομοίως οπλισμένο σύμφωνα με τις καθορισμένες διατάξεις αλλά έφερε επιπλέον ράβδους ενισχύσεως στον πυρήνα μέσω της μεθόδου BE. Το τρίτο δείγμα JBOVFX ήταν ίδιο με το δείγμα ελέγχου, αλλά έφερε δύο ράβδους από CFRP διαγώνια εντός του πυρήνα του κόμβου για ενίσχυση.

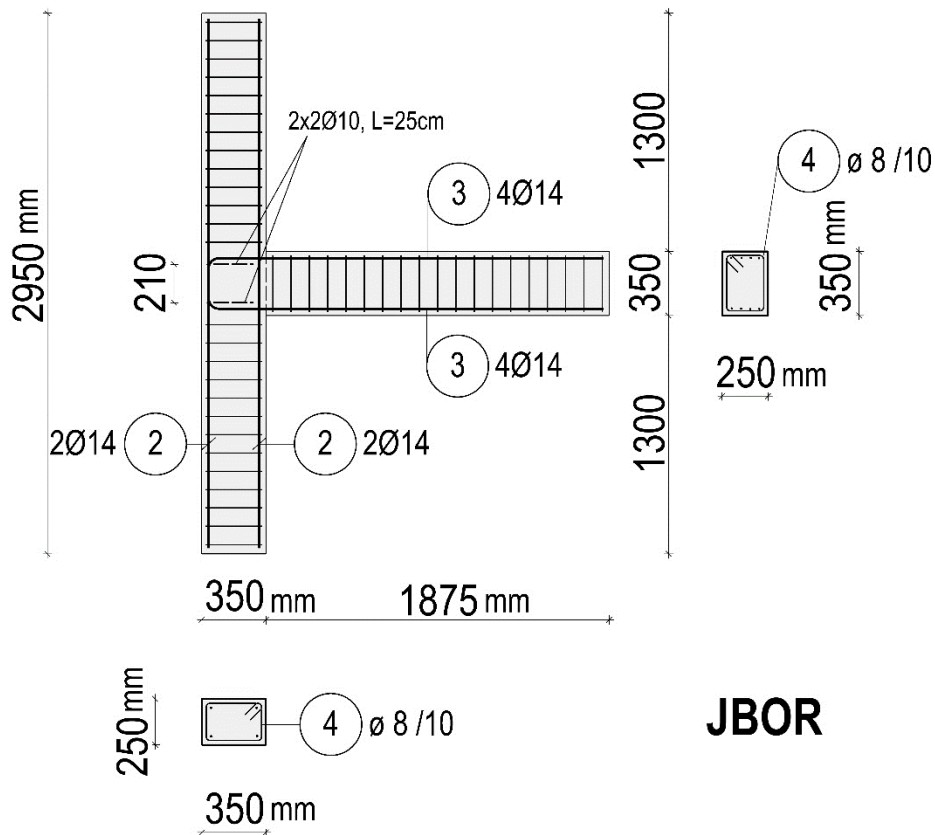
Ως προς τον σχεδιασμό τα δοκίμια έφεραν παρόμοιες διαστάσεις. Αποτελούνταν από μια δοκό 250x350 mm με μήκος 1875 mm που εφάπτονταν στο μέσον της σύνδεσης δύο υποστυλωμάτων διαστάσεων 250x350 μήκους 2950 mm συνολικά. Η όπλιση του δοκιμίου JBOV και JBOVFX ως προς τον χαλύβδινο οπλισμό ήταν η εξής: στα άκρα του υποστυλώματος τοποθετήθηκαν ράβδοι 4 \varnothing 14 έκαστη σε κάθε άκρη και 2 \varnothing 12 στο μέσον της μεγαλύτερης πλευράς του υποστυλώματος. Τοποθετήθηκε επίσης οπλισμός περισφίξεως \varnothing 8/100 mm. Στην δοκό ομοίως τοποθετήθηκαν ράβδοι 4 \varnothing 14 και οπλισμός περισφίξεως \varnothing 8/100. Στο δοκίμιο JBOR ο οπλισμός της δοκού ήταν ο ίδιος και στο υποστυλώμα εξαιρέθη απλώς η τοποθέτηση των ράβδων 2 \varnothing 12. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε επί τόπου και μέσα από πειραματικές δοκιμές μετρήθηκε ότι $f_{cm} = 34\text{MPa}$. Ο χάλυβας ήταν πρότυπος χάλυβας τύπου B500S με αντοχή διαρροής $f_{yk} = 500\text{MPa}$. Το ΙΕΠ υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν CFRP με μέτρο ελαστικότητας $E = 240\text{GPa}$ και $F = 4000\text{MPa}$.

Το πλαίσιο τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε προσανατολισμός της δοκού να ήταν κατακόρυφος προς τα πάνω. Η δοκός δεν έφερε κάποια στήριξη, όμως τα υποστυλώματα στηρίχθηκαν με αρθρώσεις στο εξωτερικό άκρο τους. Για την ορθότερη αναπαραγωγή του φορτίου βαρύτητας που ασκείται από τους ανωτέρω ορόφους, μια σταθερή αξονική δύναμη ασκούνταν στο άκρο του θεωρητικά άνω υποστυλώματος. Ένα υδραυλικό έμβολο, εξοπλισμένο με μια κυψέλη φορτίου (load cell) και έναν μετρητή γραμμικής διαφορικής μετατόπισης (LVDT), χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή ελεγχόμενης παραμόρφωσης στις δοκούς των δοκιμών. Η κίνηση του εμβόλου ελεγχόταν με ακρίβεια από μια ψηφιακή μονάδα, επιτρέποντας την ακριβή μετατόπιση ή εφαρμογή δύναμης βάσει λογισμικού. Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφηκαν οι μετρήσεις μετατόπισης και δυνάμεων. Η διαδικασία φόρτωσης περιλάμβανε την υποβολή του δοκιμίου σε πλήρη κυκλική παραμόρφωση. Το έμβολο, τοποθετημένο στο ελεύθερο κατακόρυφο άκρο της δοκού, δημιούργησε τις απαραίτητες ροπές στον κόμβο. Η διαδικασία φορτίσεως αποτελούνταν από επτά στάδια, το καθένα από τα οποία περιλάμβανε

αυξανόμενες παραμορφώσεις που κυμαίνονταν από $\pm 8,5$ mm έως ± 68 mm, που αντιστοιχούν σε διολίσθηση ορόφων από 0,50% έως 4,00%. Σε κάθε επίπεδο φόρτισης, πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις της ίδιας εκτροπής τόσο προς θετική όσο και προς αρνητική κατεύθυνση. Σκοπεύοντας σε πολλαπλές εναλλαγές των ασκούμενων φορτίων, το πείραμα στόχευε στην αναπαραγωγή του σχηματισμού αστοχιών που παρατηρούνται συνήθως σε σενάρια φόρτισης ήπιων σεισμών. Μετά από τρεις επαναλήψεις στην ίδια τάξη παραμόρφωσης, το φορτίο αυξανόταν στην επόμενη μεγαλύτερη, επαναλαμβάνοντας τον κύκλο τρεις φορές. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε ουσιαστικές παρατηρήσεις σχετικά με τα πρότυπα αστοχιών και την γενικότερη συμπεριφορά του πλαισίου.

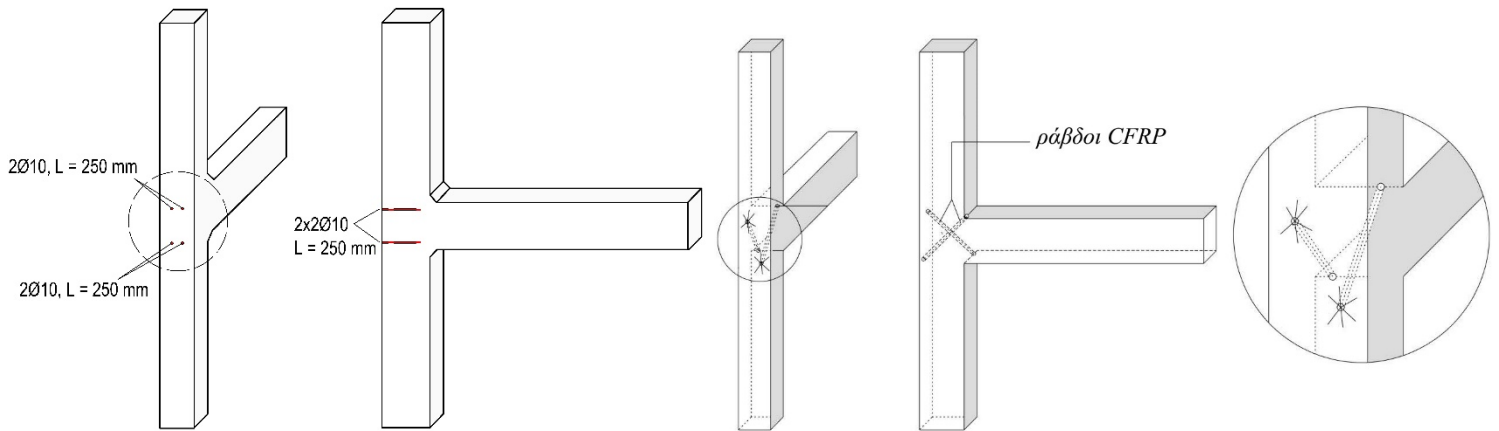


JBOV



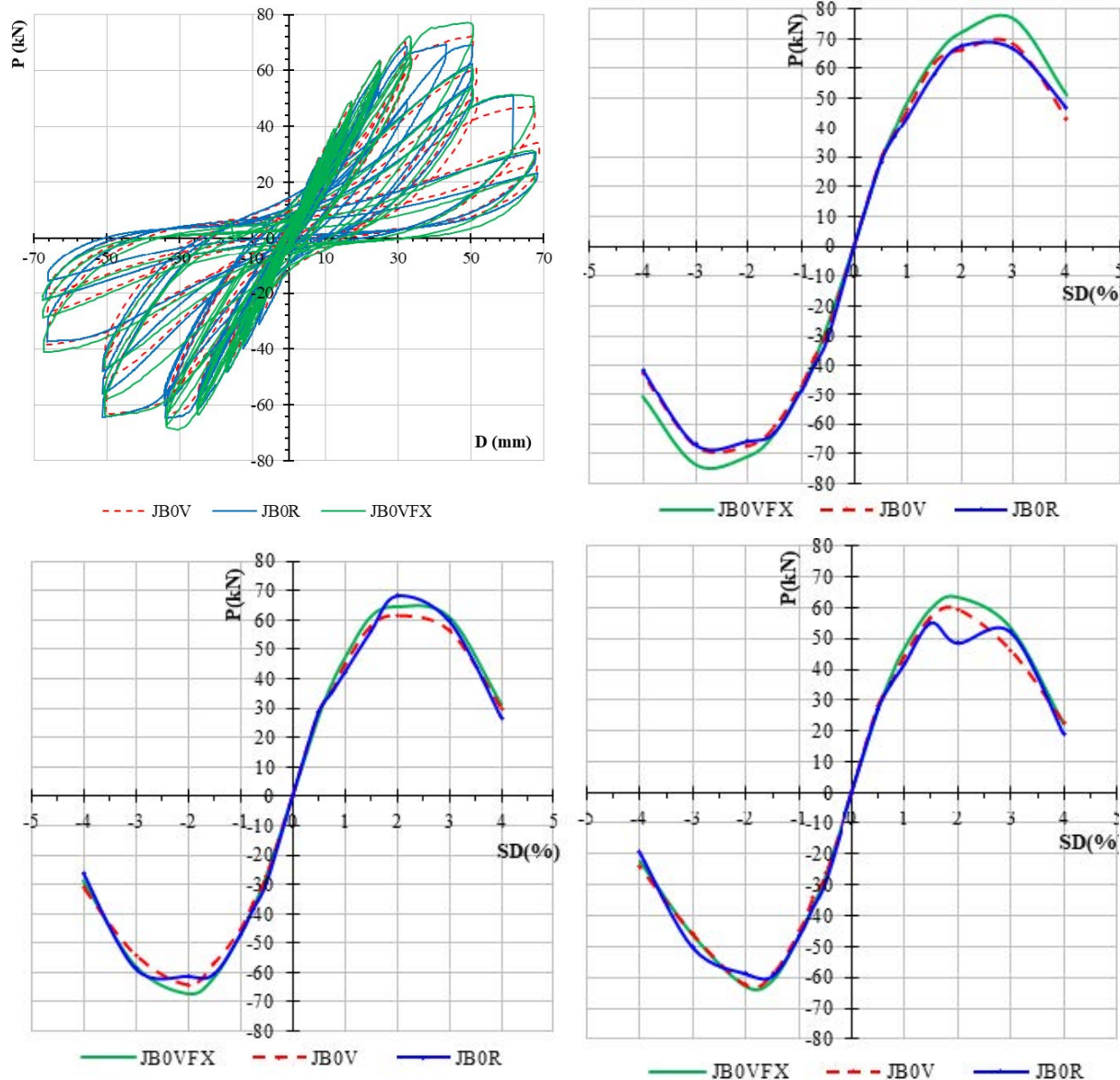
JBOR

Εικόνα 3.1.1: (Άνω): Σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις και τον τοποθετημένο οπλισμό του δείγματος ελέγχου JBOV. Σημειώνεται ότι παρομοίως σχεδιασμένο είναι και το δοκίμιο JBOVFX, με μόνη διαφορά την πρόσδεση των ράβδων CFRP. (Κάτω): Σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις και τον τοποθετημένο οπλισμό του δοκιμίου JBOR.



Εικόνα 3.1.2: (Αριστερά): Σχεδιάγραμμα της ενίσχυσης του δοκιμίου JBOV με ράβδους χάλυβα μέσω της μεθόδου BE. Σημειώνονται οι διαστάσεις των ράβδων. (Δεξιά): Σχεδιάγραμμα και λεπτομέρεια της ενίσχυσης του δοκιμίου JBOVFX με ράβδους CFRP.

Τα πειραματικά αποτελέσματα επικεντρώθηκαν στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης συγκρίνοντας τις φέρουσες ικανότητες διαφόρων δειγμάτων. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο ελέγχου JBOV συγκρίθηκε με τα δύο ενισχυμένα δοκίμια JBOV και JBOVFX. Κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι η φέρουσα ικανότητα αυξήθηκε μόνο κατά περίπου 6% όταν χρησιμοποιήθηκε ο χαλύβδινος σπλισμός ενισχύσεως του JBOV. Ωστόσο, σημαντική βελτίωση παρατηρήθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν οι ράβδοι C-FRP για ενίσχυση. Οι σχηματισμοί αστοχιών του μη ενισχυμένου δείγματος JBOV και του ενισχυμένου δείγματος (JBOV) εμφανίστηκαν σχεδόν πανομοιότυποι. Αντιθέτως, το δοκίμιο JBOVFX παρουσίασε ευνοϊκότερη απόκριση στην καταπόνηση. Αυτή η βελτίωση αποδίδεται στην αποτελεσματικότητα των ράβδων CFRP λόγω της ενισχυμένης αγκύρωσής τους πάνω στην σύνδεση. Κατά συνέπεια, ο σχηματισμός αστοχιών και η ρηγμάτωση περιορίστηκαν εμφανώς. Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μέσω Abaqus με αυτά του πειράματος, ορισμένα σημαντικά αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

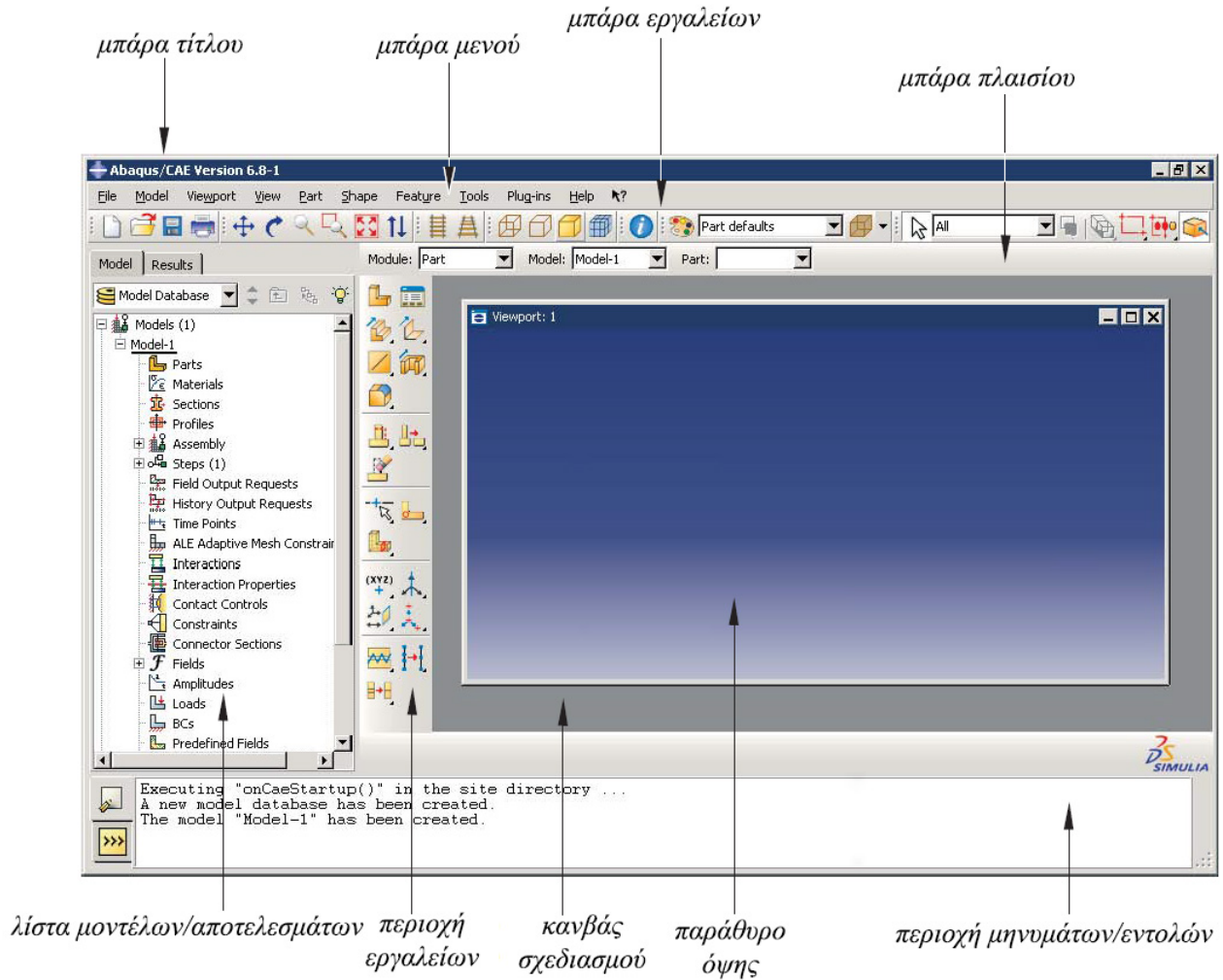


Εικόνα 3.1.3: (Άνω αριστερά): Διάγραμμα δυνάμεων – μετατόπισης όλων των δοκιμών. (Δεξιά και κάτω): οι καμπύλες S για τα τρία δοκίμια για τα μέγιστα φορτία κατά τον πρώτο κύκλο φορτίσεως (δεξιά και άνω), τον δεύτερο κύκλο φορτίσεως (αριστερά και κάτω) και τον τρίτο (δεξιά και κάτω).

3.2 Υπολογιστικό περιβάλλον του προγράμματος Abaqus

Το πρόγραμμα Abaqus έρχεται σε δύο πακέτα αναλύσεως: το Abaqus/Standard και το Abaqus/Explicit. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της ακαδημαϊκής άδειας του Abaqus που προσφέρει μόνο το πακέτο Abaqus/Standard. Το Abaqus/Standard είναι ιδανικό για την προσομοίωση πραγματικών στατικών και

δυναμικών δομικών γεγονότων όπως η κυκλική καταπόνηση. Το περιβάλλον εργασίας παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 3.2.1: Το περιβάλλον εργασίας του Abaqus.

Το περιβάλλον του Abaqus αποτελείται από πολλά στοιχεία που παρέχουν πρόσβαση σε διάφορες λειτουργίες και εργαλεία:

- Μπάρα μενού (Menu bar): Περιέχει όλες τις διαθέσιμες υποενότητες μενού που παρέχουν πρόσβαση σε διάφορες λειτουργίες του προϊόντος. Τα μενού που εμφανίζονται εξαρτώνται από την επιλογή που γίνεται στην μπάρα πλαισίου.

- Μπάρα εργαλείων (Toolbar): Παρέχει γρήγορη πρόσβαση σε στοιχεία που είναι διαθέσιμα στα μενού, προσφέροντας μια βολική εναλλακτική για την πρόσβαση σε κάθε λειτουργία ξεχωριστά.
- Μπάρα πλαισίου ή περιβάλλοντος (Context bar): Επιτρέπει την πλοήγηση μεταξύ στοιχείων στο Abaqus/CAE. Παρέχει επίσης λειτουργίες και δυνατότητες για συγκεκριμένα στοιχεία, όπως η ανάκτηση σχεδιασμένων τμημάτων κατά τη δημιουργία γεωμετρίας.
- Λίστα μοντέλων (Model tree): Προσφέρει μια γραφική επισκόπηση του συνολικού μοντέλου και των δομικών συστατικών του, συμπεριλαμβανομένων εξαρτημάτων, υλικών, βημάτων, φορτίων και αιτημάτων για εντολές εξόδου.
- Λίστα αποτελεσμάτων (Results tree): Παρέχει μια γραφική επισκόπηση των βάσεων δεδομένων εξόδου και των δεδομένων για συγκεκριμένες φάσεις της ανάλυσης, όπως διαγράμματα τύπου X-Y. Η λίστα αποτελεσμάτων επιτρέπει την εύκολη πλοήγηση μεταξύ βάσεων δεδομένων εξόδου και συνεισφέρει στην γρηγορότερη ανάκτηση δεδομένων.
- Περιοχή εργαλείων (Toolkit): Κατά την είσοδο σε ένα στοιχείο λειτουργείας, η περιοχή αυτή εμφανίζει τα κατάλληλα εργαλεία για τη συγκεκριμένη ενότητα. Παρέχει γρήγορη πρόσβαση στις λειτουργίες του κάθε στοιχείου που είναι διαθέσιμες τόσο στη μπάρα μενού όσο και στις μπάρες εργαλείων.
- Καμβάς και περιοχή σχεδίασης (Drawing canvas): Ο καμβάς χρησιμεύει ως οθόνη ή πίνακας ανακοινώσεων όπου εμφανίζονται τα παράθυρα όψης. Η περιοχή σχεδίασης αντιπροσωπεύει το ορατό τμήμα του καμβά.
- Παράθυρα όψης (Viewports): Οι θύρες προβολής είναι παράθυρα στον καμβά που εμφανίζουν το μοντέλο στο Abaqus/CAE.
- Περιοχή μηνυμάτων/εντολών (Message/Command area): Το Abaqus/CAE εκτυπώνει πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση αναλύσεως και προειδοποιήσεις σε αυτήν την περιοχή. Μπορεί να αλλάξει το μέγεθός του και μια γραμμή κύλισης επιτρέπει την προβολή προηγούμενων μηνυμάτων. Στο ίδιο σημείο βρίσκεται και το παράθυρο εντολών που επιτρέπει την πληκτρολόγηση εντολών στην γλώσσα προγραμματισμού Python και την αξιολόγηση μαθηματικών εκφράσεων στο Abaqus/CAE.

Αυτά τα τμήματα διευκολύνουν συλλογικά την αλληλεπίδραση με το Abaqus/CAE και παρέχουν πρόσβαση στις διάφορες δυνατότητες και λειτουργίες του.

Το Abaqus είναι οργανωμένο σε λειτουργικά στοιχεία, το καθένα από τα οποία επικεντρώνεται σε συγκεκριμένες εργασίες μοντελοποίησης. Ακολουθεί μια ανάλυση των μονάδων και των λειτουργικότητων τους:



Εικόνα 3.2.2: Τα τμήματα που αποτελούν τα λειτουργικά στοιχεία του Abaqus.

Τμήμα (Part): Επιτρέπει την δημιουργία και επεξεργασία μεμονωμένων εξαρτημάτων του συνολικού μοντέλου σχεδιάζοντας τη γεωμετρία τους ή εισάγοντας τα υφιστάμενα γεωμετρικά τμήματα από άλλα προγράμματα μοντελοποίησης.

Ιδιότητα (Property): Σε αυτήν την ενότητα ορίζονται οι ιδιότητες του υλικού και των διατομών τους και γίνεται ορισμός τους στα εξαρτήματα που έχουν σχεδιαστεί.

Συναρμολόγηση (Assembly): Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σύνθετων εξαρτημάτων και ολόκληρης της κατασκευής που επρόκειτο να αναλυθεί.

Βήμα (Step): Επιτρέπει τη δημιουργία και τη διαμόρφωση των βημάτων ανάλυσης και των σχετικών αιτημάτων εξόδου για την καταγραφή των επιθυμητών αποτελεσμάτων από την ανάλυση του μοντέλου.

Αλληλεπίδραση (Interaction): Καθορίζει μηχανικές και θερμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιοχών του μοντέλου, όπως επαφή μεταξύ επιφανειών και αγκυρώσεις.

Φόρτωση (Load): Επιτρέπει τον προσδιορισμό των φορτίων, των συνοριακών συνθηκών και των προκαθορισμένων πεδίων με τρόπο που ορίζεται από τα βήματα.

Πλέξη μοντέλου (Meshing): Περιέχει εργαλεία για τη δημιουργία πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε συγκροτήματα, παρέχοντας διάφορα επίπεδα αυτοματισμού για διευκόλυνση.

Εργασία (Job): Χρησιμοποιείται για την ανάλυση μοντέλων υποβάλλοντας εργασίες αναλύσεως και παρακολουθώντας την πρόοδό τους.

Απεικόνιση (Visualization): Παρέχει γραφική αναπαράσταση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων εξόδου.

Σκίτσο (Sketch): Επιτρέπει τη δημιουργία διδιάστατων προφίλ για τον καθορισμό της γεωμετρίας των εγγενών μελών του Abaqus.

Ως προς τις χρησιμοποιούμενες μονάδες μετρήσεως, το Abaqus δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να επιλέξουν την επιθυμητή τάξη μεγεθών με την οποία θα εργαστούν. Σημειώνεται βέβαια ότι η επιλογή αυτή δεν αντικατοπτρίζεται στις λειτουργίες του προγράμματος, οπότε είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνεται συνεχώς έλεγχος ότι τα αριθμητικά δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα αντιστοιχούν με την ορθή τάξη μεγέθους τους. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της τάξης μεγεθών kilonewton (kN), megapascal (MPa) και millimeter (mm) και όλων των παραγώγων τους, καθώς αυτή είναι μια συνήθης ομάδα μονάδων μετρήσεως που χρησιμοποιείται στην κατασκευαστική βιομηχανία για την διαστασιολόγηση μικρών τμημάτων, όπως τα υφιστάμενα δοκίμια.

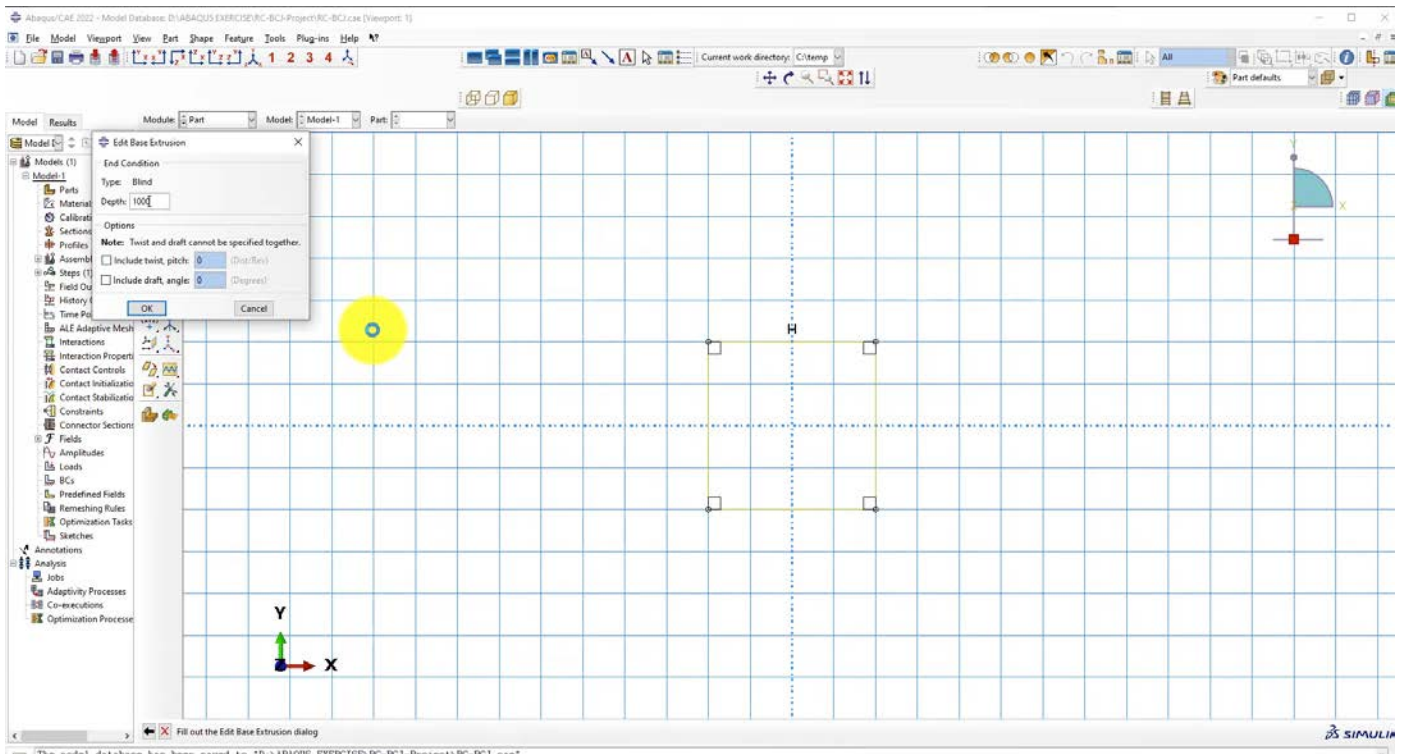
4. Διαδικασία προσομοίωσης και αναλύσεως

Η διαδικασία προσομοίωσης χωρίζεται στα εξής βήματα: α) τον σχεδιασμό των τμημάτων που αποτελούν τα δοκίμια, β) τον ορισμό των υλικών και διατομών στα αντίστοιχα τμήματα, γ) την συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων για την δημιουργία των ολοκληρωμένων πλαισίων, δ) τον ορισμό βημάτων αναλύσεως, ε) τον ορισμό των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των εφαιπτόμενων επιφανειών, στ) τον ορισμό των φορτίων που ασκούνται στα δοκίμια και των στηρίξεών τους, η) τον ορισμό πλέξης των τμημάτων, θ) την ανάλυση και απόκτηση αποτελεσμάτων. Τα βήματα αυτά ήταν τα ίδια στον σχεδιασμό και των τριών δοκιμίων. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:

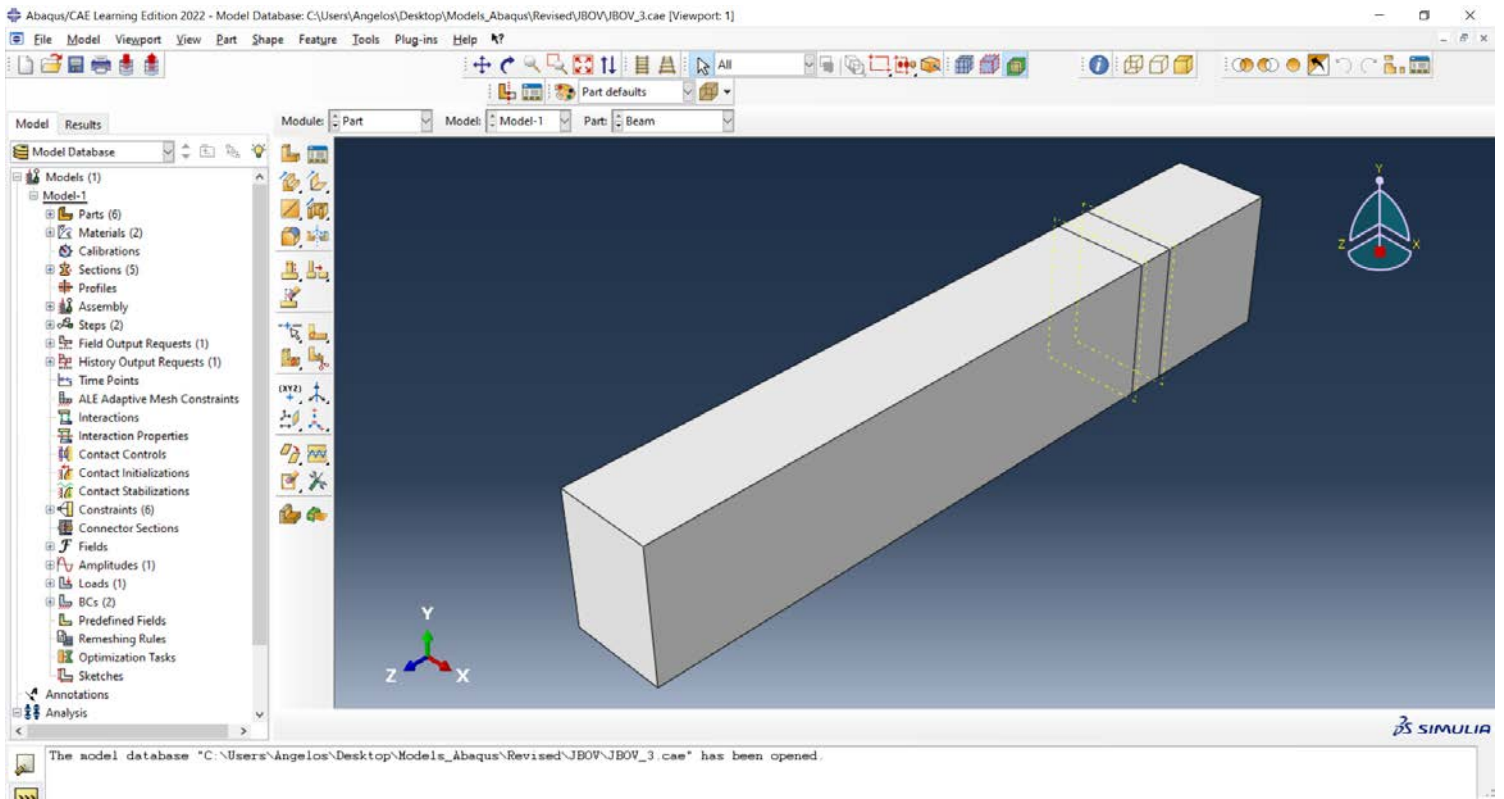
4.1 Σχεδιασμός των τμημάτων

Το Abaqus προσφέρει διάφορες μεθόδους για τη δημιουργία γεωμετρικών σχημάτων στο περιβάλλον μοντελοποίησης. Μια μέθοδος κάνει χρήση των εργαλείων που προσφέρει το πρόγραμμα για τη δημιουργία δισδιάστατων μορφών σχεδιάζοντας γραμμές, τόξα, κύκλους και άλλα βασικά σχήματα. Αυτά τα σχέδια μπορούν στη συνέχεια να εξωθηθούν, να σαρωθούν ή να περιστραφούν για να δημιουργήσουν τρισδιάστατες γεωμετρίες. Η δεύτερη μέθοδος είναι η εισαγωγή: Το Abaqus υποστηρίζει την εισαγωγή γεωμετρίας από διάφορες μορφές λογισμικού CAD, συμπεριλαμβανομένων των IGES, STEP και ACIS. Στην παρούσα εργασία δεν έγινε χρήση εισαγωγής, αλλά τα τμήματα σχεδιάστηκαν όλα στο περιβάλλον του προγράμματος.

Ο σχεδιασμός των τμημάτων είναι δίπτυχος και περιλαμβάνει τον τρισδιάστατο σχεδιασμό τμημάτων που έχουν μεγάλες διαστάσεις αναφορικά με ολόκληρη την κατασκευή και τον δισδιάστατο σχεδιασμό τμημάτων με μικρές σχετικώς διαστάσεις. Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός και για τα τρία δοκίμια αφορούσε τον σχεδιασμό των δοκών και των δύο υποστυλωμάτων που μορφώθηκαν ως ένα ενιαίο τμήμα. Αρχικά, σχεδιάστηκε δισδιάστατα η απεικόνιση της διατομής των στοιχείων, χρησιμοποιώντας για αναφορά τα δοσμένα σχεδιαγράμματα. Στην συνέχεια, το τμήμα εκβάλλονταν τρισδιάστατα με την εντολή εκβολής (extrusion) ορίζοντας το μήκος του τμήματος ως το «βάθος» του στην τρίτη διάσταση.



Εικόνα 6.1.1: Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό μιας δοκού. Έχει γίνει απεικόνιση της διατομής σε δύο διαστάσεις και στην εντολή εκβολής εισάγεται το μήκος της ως το τρισδιάστατο «βάθος» της.



Εικόνα 4.1.2: Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό μιας δοκού. Μετά της εκβολής της διατομής στον χώρο η δοκός αποκτά την πλήρη μορφή της. Πανομοιότυπη διαδικασία ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και των υποσυλωμάτων των δοκιμών.

Τα μικρότερα μέλη των πλαισίων των οποίων η μια διάσταση είναι πολύ μικρή σε σχέση με το συνολικό μέγεθος της κατασκευής είναι οι ράβδοι που αποτελούν τον οπλισμό του πλαισίου. Σε σχέση με το μήκος τους, το πλάτος των ράβδων είναι δυσανάλογα μικρότερο και δεν είναι πρακτικό να σχεδιαστεί με τον τρόπο που περιεγράφηκε προηγουμένως. Για αυτόν τον λόγο τα μέλη σχεδιάζονται ως «γραμμές» δίχως πλάτος στην αρχική φάση σχεδιασμού. Το πλάτος τους θα καθοριστεί αργότερα κατά τον ορισμό των διατομών. Ο σχεδιασμός τους σε αυτήν την φάση περιλαμβάνει απλά τον ορισμό μιας ευθείας με τις απαραίτητες διαστάσεις για την κάθε ράβδο. Παρομοίως με τον οπλισμό περισφίξεως ένα δισδιάστατο παραλληλόγραμμο σχεδιάζεται. Το μήκος και οι γενικές διαστάσεις των οπλισμών έχουν καθοριστεί με ακρίβεια αριθμητικώς έχοντας λάβει υπόψιν την επικάλυψη που αυθαιρέτως ορίστηκε ως 20 mm ανά μεριά. Για κάθε ξεχωριστό είδος μέλους δημιουργείται ένα στοιχείο μόνο. Κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης πολλαπλά μέλη θα δημιουργηθούν αναλόγως.

4.2 Ορισμός υλικών

Ο ορισμός υλικών αποτελεί ένα ιδιαίτερα κρίσιμο σημείο στην διαδικασία προσομοίωσης διότι είναι ο βασικότερος παράγοντας μετά την γεωμετρία που καθορίζει πώς η ολοκληρωμένη κατασκευή θα συμπεριφερθεί. Το Abaqus δίνει την δυνατότητα εισαγωγής υλικών κατευθείαν από μια έτοιμη βιβλιοθήκη (material library) ή ορισμού των υλικών και όλων των ιδιοτήτων τους χειροκίνητα. Επειδή το

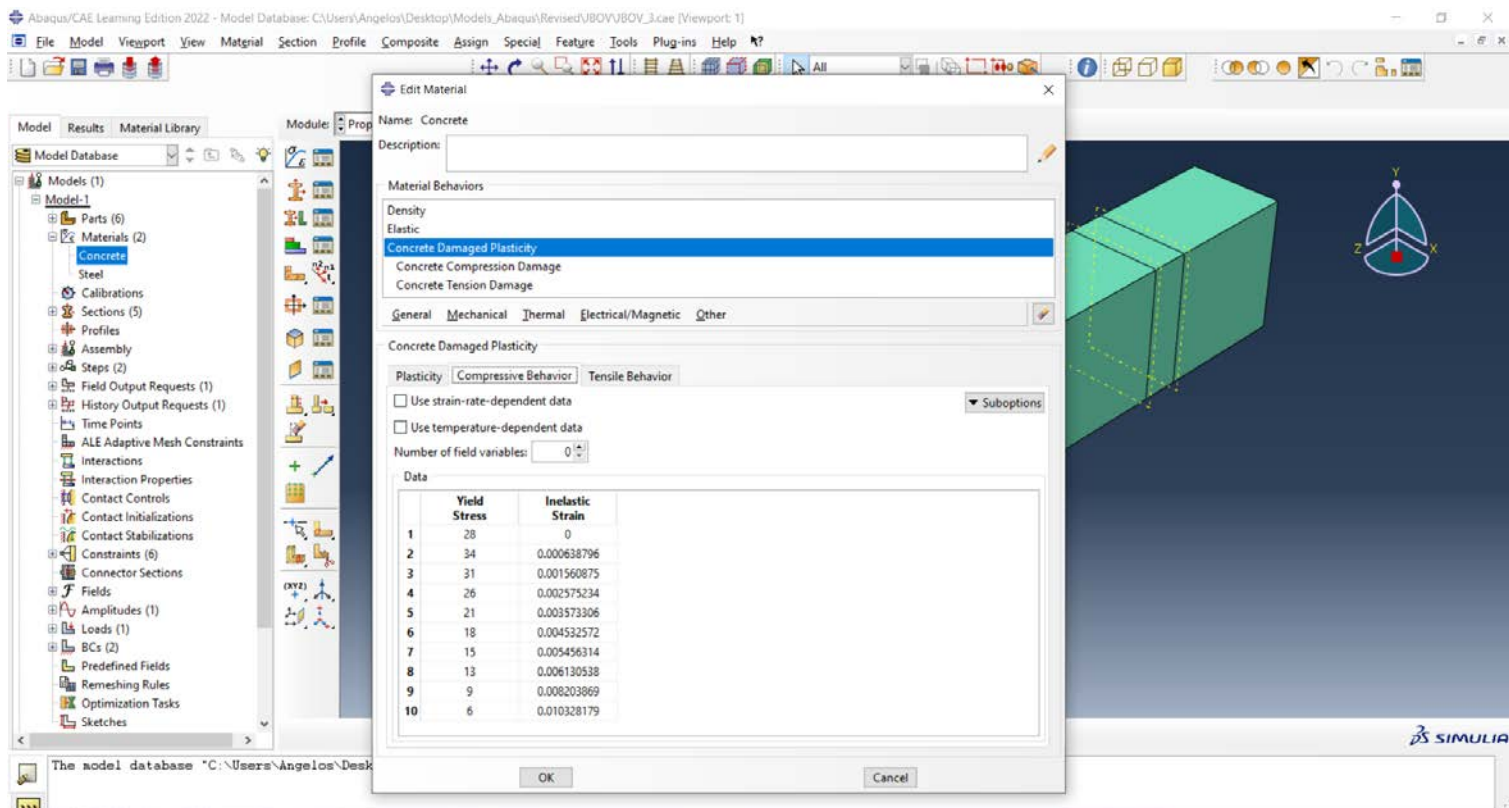
σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στα πραγματικά πειράματα ήταν ειδικό και κατασκευασμένο επί τόπου με συγκεκριμένες ιδιότητες, επιλέχθηκε η εισαγωγή του ως νέο υλικό στο πρόγραμμα. Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που εισάγονται αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και αποκτώνται συνήθως από πειραματικές δοκιμές ή κώδικες σχεδίασης. Χρησιμοποιώντας την διαδικτυακή ιστοσελίδα του Ευρωκώδικα και με αριθμητικές δοκιμές, τα δεδομένα που εισήχθησαν για το σκυρόδεμα ήταν τα εξής:

Μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus) E_{cm} : Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος αντιπροσωπεύει την ακαμψία του υλικού και την αντοχή του στην παραμόρφωση. Ορίστηκε σε MPa στο πρόγραμμα με τιμή 31758.96 MPa.

Λόγος Poisson: Ο λόγος αυτός περιγράφει την πλευρική συστολή του υλικού όταν υποβάλλεται σε αξονική παραμόρφωση. Συνήθως για σκυροκονιάματα ορίζεται περί τα 0.2 όπως και επιλέχθηκε και για την παρούσα εργασία. Ο λόγος Poisson είναι καθαρός αριθμός και δεν φέρει μονάδες μετρήσεως.

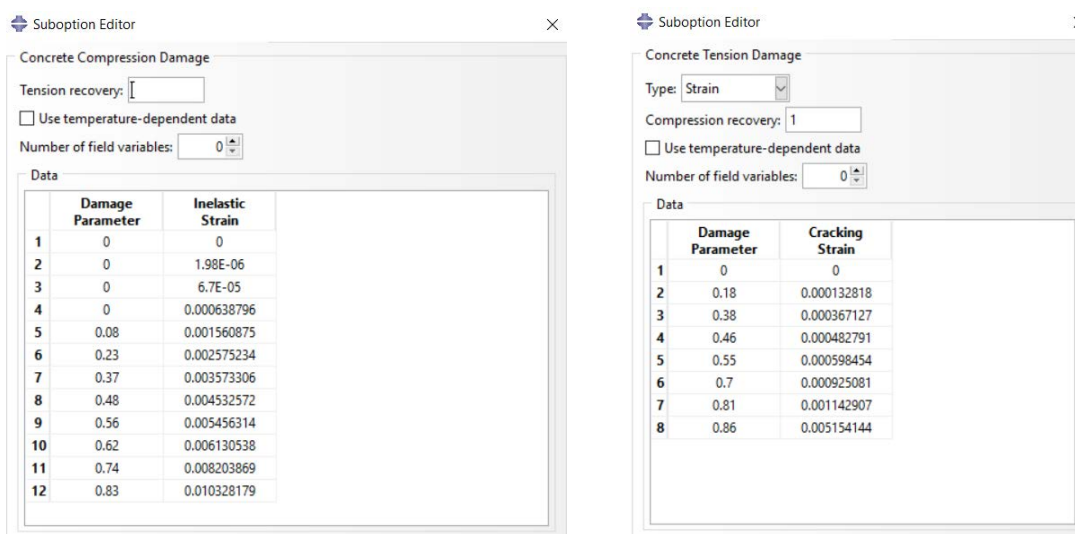
Πυκνότητα μάζας (Mass density): Η πυκνότητα του υλικού ορίστηκε από τον πίνακα του Ευρωκώδικα σε 2500 kg/m^3 , που έπρεπε όμως να μετατραπούν Mg/mm^3 για την τήρηση της συνοχής μονάδων μετρήσεως που είναι σημαντικότερη για την σωστή ανάλυση της προσομοίωσης. Έτσι εισήχθη $2.5\text{E-}9 \text{ Mg/mm}^3$.

Πλαστιμότητα αστοχίας σκυροδέματος (Concrete damaged plasticity): Αυτό το αριθμητικό μοντέλο συμπεριφοράς παρέχει την δυνατότητα για την ακριβή αναπαράσταση του σκυροδέματος και άλλων οιονεί εύθραυστων υλικών σε διάφορους τύπους κατασκευών. Χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό δεδομένων εισόδου όπως η ελαστικότητα αστοχίας, εφελκυστική και η θλιπτική παραμορφωσιμότητα για να αποτυπώσει αποτελεσματικά την ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Για την ανάλυση των δοκιμών έγινε χρήση τριών υποενοτήτων του αριθμητικού μοντέλου: της πλαστιμότητας (plasticity), της θλιπτικής συμπεριφοράς (compressive behavior) και εφελκυστικής συμπεριφοράς (tensile behavior). Στην πλαστιμότητα εισήχθη η γωνία διαστολής ως 30° και είναι σταθερά που εξάγεται από το μοντέλο Mohr – Coulomb που ορίζει την συμπεριφορά στερεών στην πλαστική ογκομετρική καταπόνηση^[36]. Επίσης, έγινε εισαγωγή του συντελεστή εκκεντρότητας ως 0.1, του λόγου διαξονικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος προς την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του f_{b0}/f_{c0} που τέθηκε αυθαίρετα ως η συντηρητική τιμή 1.16, του συντελεστή δομικού συστήματος K ως 0.667 και του συντελεστή ιξώδους ως 0.0005. Στην ενότητα θλιπτικής και εφελκυστικής συμπεριφοράς εισήχθη δόθηκαν τιμές καταπόνησης διαρροής και οι αντιστοιχίσεις τους σε ανελαστική παραμόρφωση.



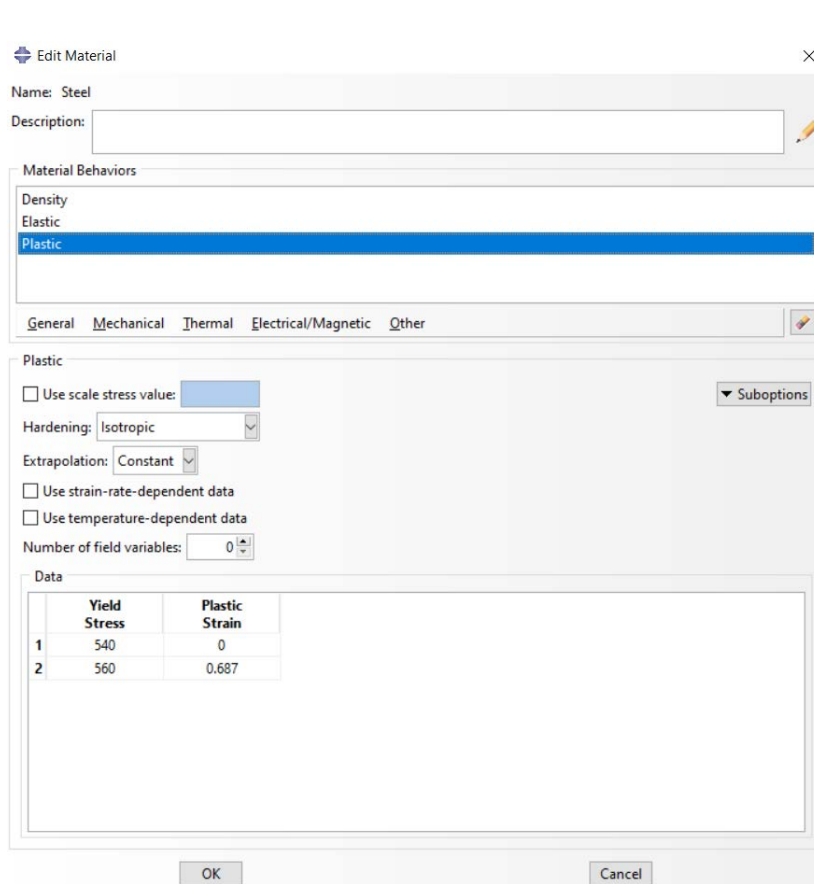
Εικόνα 4.2.1: Στιγμιότυπο από την εισαγωγή τιμών που περιγράφουν αριθμητικά την θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Σημειώνονται οι τιμές καταπόνησης διαρροής και ανελαστικής παραμόρφωσης.

Αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό: Οι συγκεκριμένες υποενότητες είναι κρίσιμες καθώς ορίζουν τον τρόπο που δημιουργούνται αστοχίες στο σκυρόδεμα αντιστοιχίζοντας παραμέτρους αστοχίας σε συγκεκριμένα ποσοστά ανελαστικής καταπόνησης.



Εικόνα 4.2.3: Στιγμιότυπο από τις υποενότητες εισαγωγής τιμών του Abaqus που περιγράφουν την αντιστοιχία ανελαστικών παραμορφώσεων με παραμέτρους αστοχίας σύμφωνα με το σύστημα Park&Ang[37].

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε με τον ορισμό του χάλυβα ως υλικού στο πρόγραμμα. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε είναι πρότυπος B500S με τάση διαρροής $f_{yk} = 500$ MPa. Στον χάλυβα ορίστηκαν η πυκνότητα ως $8.6E-09$ Mg/mm³, το μέτρο ελαστικότητας ως 210000 MPa και ο λόγος Poisson ως 0.25. Στη πλαστικότητα ορίστηκαν δύο σημεία, όπως φαίνεται παρακάτω:

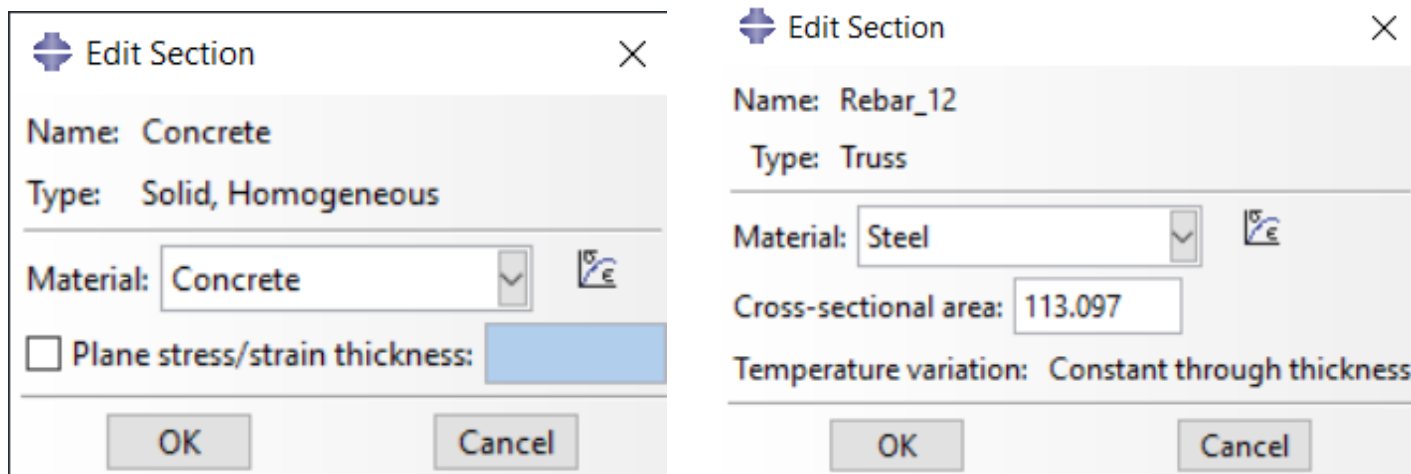


Εικόνα 4.2.4: Τα δύο σημεία αντιστοίχισης τάσεων διαρροής με πλαστική καταπόνηση. Δεν είναι απαραίτητος ο ορισμός περαιτέρω σημείων για τον χάλυβα.

4.3 Ορισμός διατομών

Μετά τον ορισμό των απαραίτητων υλικών γίνεται ορισμός των διατομών που φέρουν όλα τα στοιχεία που αποτελούν τα αναλυόμενα πλαίσια. Αυτά τα στοιχεία είναι οι δοκοί και τα υποστυλώματα από σκυρόδεμα και ο κάθε τύπος ράβδου που θα χρησιμοποιηθεί τόσο στον οπλισμό όσο και στην πειραματική ενίσχυση των δοκιμών. Επειδή οι δοκοί και τα υποστυλώματα είναι στερεές γεωμετρικές μεγάλων διαστάσεων, ένας μόνο τύπος διατομής ορίστηκε και τα δύο τμήματα που περιείχε απλώς το υλικό από το οποίο αποτελούνται. Για αυτόν τον λόγο ορίστηκε από την λίστα επιλογών μια διατομή ομογενοποιημένου στερεού φτιαγμένη από το σκυρόδεμα που σχεδιάστηκε προηγουμένως. Για τις ράβδους ενισχύσεως όμως, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε σχεδιάστηκαν με μόνο το μήκος τους να έχει οριστεί και το πλάτος τους να είναι απειροελάχιστο, χρειάστηκε να γίνει διαφορετικός ορισμός διατομής. Επιλέχθηκε διατομή «ράβδου» (beam) που παρέχει η δυνατότητα ορισμού υλικού και διαστάσεων της

υφιστάμενης διατομής εισάγοντας το εμβαδόν σε mm^2 . Ανάλογα με το είδος και μέγεθος των ράβδων οι τιμές αυτές εισήχθησαν αναλόγως. Στην συνέχεια, από την λίστα των διαθέσιμων τμημάτων επιλέχθηκε το κάθε ένα και σε αυτό ορίστηκε η αντίστοιχη σχεδιασμένη διατομή.



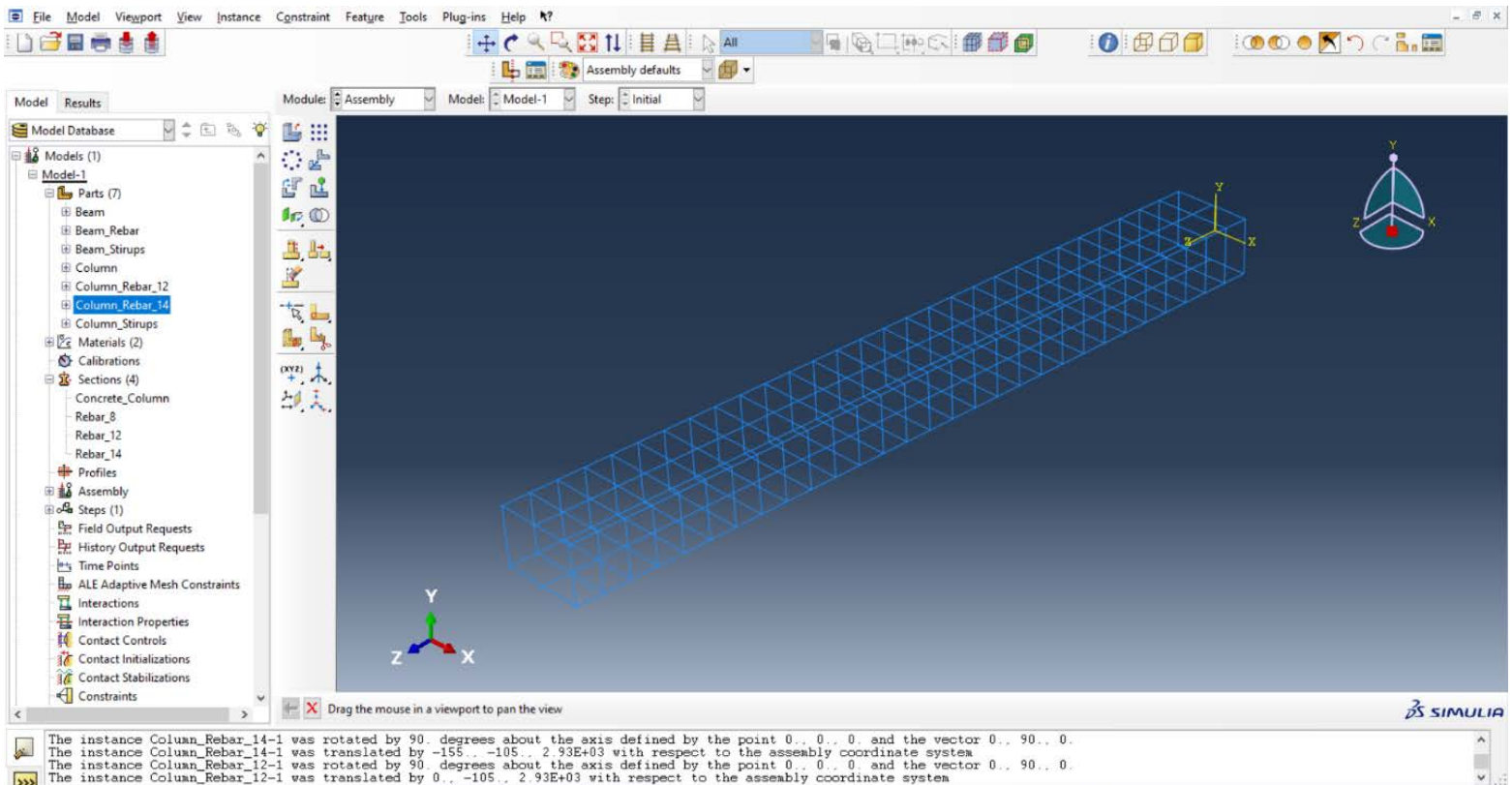
Εικόνα 4.3.1: (Αριστερά): Η ορισμένη διατομή σκυροδέματος που αφορά τις δοκούς και τα υποστυλώματα. (Δεξιά): Μια ενδεικτική διατομή των ράβδων διαμέτρου 12mm. Σημειώνεται πως το εμβαδόν εισήχθη χειροκίνητα ως 113.097 mm^2 .

4.4 Συναρμολόγηση των τμημάτων

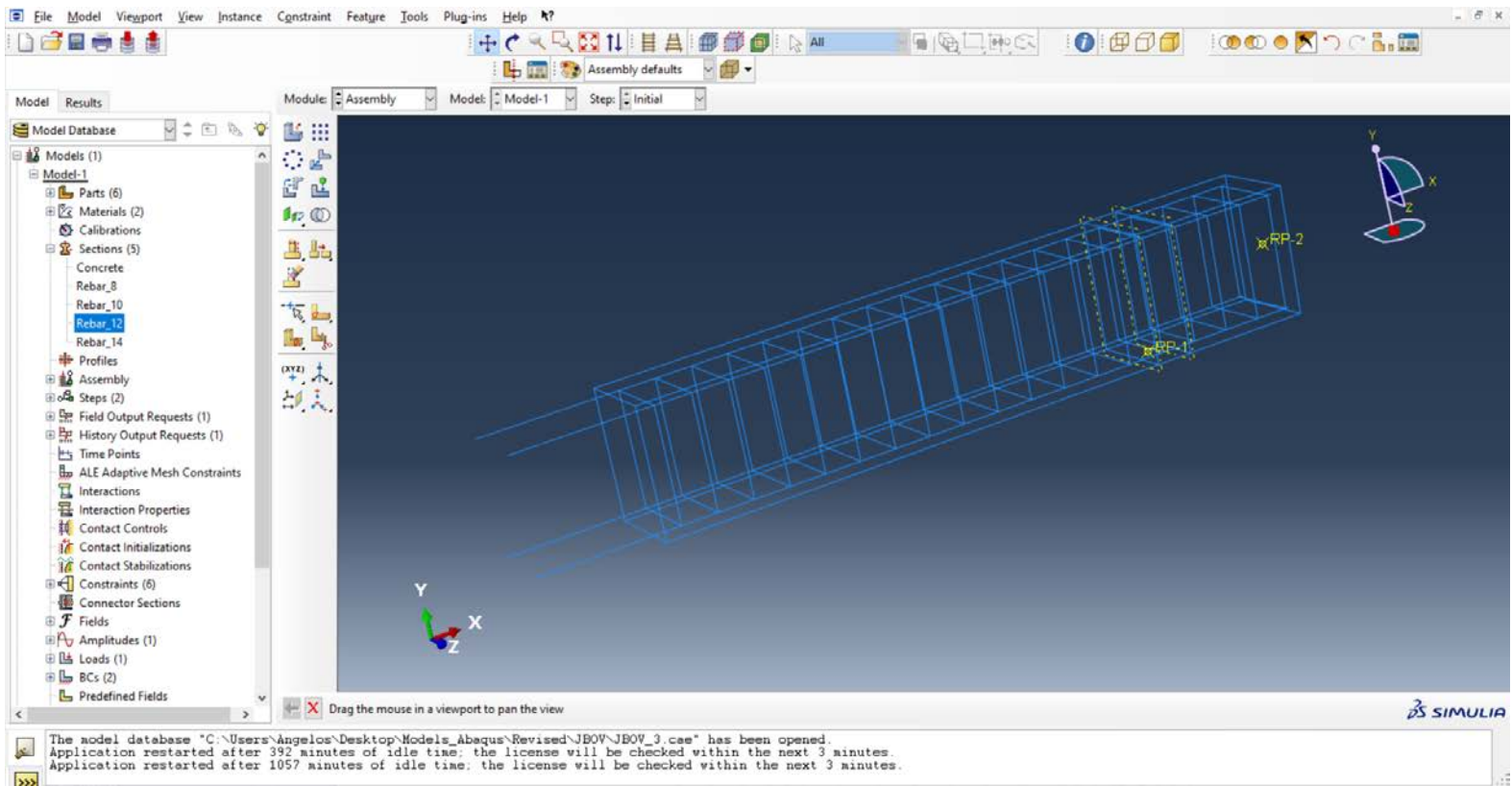
Στο περιβάλλον συναρμολόγησης το Abaqus παρουσιάζει έναν τρισδιάστατο χώρο στον οποίο μπορούν να εμφανιστούν τα διάφορα τμήματα που σχεδιάστηκαν πρωτύτερα, να προσανατολιστούν στον χώρο και να τοποθετηθούν σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα, ανάλογα με τις απαιτήσεις σχεδίασης. Αρχικά, δίνεται μια λίστα με όλα τα διαθέσιμα τμήματα και αυτά μπορούν να εμφανιστούν επιλεκτικά όσες φορές είναι απαραίτητο. Ο ψηφιακός σχεδιασμός του πλαισίου που θα αναλυθεί χωρίστηκε σε δύο βασικά τμήματα: Για την δοκό και για τα υποστυλώματα αρχικά έγινε εισαγωγή των τμημάτων τους που αποτελούνται από σκυρόδεμα και στην συνέχεια συναρμολογήθηκε ο οπλισμός που εμπεριέχεται εντός τους. Στην συνέχεια αφού είχε κατασκευαστεί η δοκός και τα υποστυλώματα ξεχωριστά, έγινε η γεωμετρική σύνδεσή τους στον χώρο για την δημιουργία των πλαισίων. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικότερα παρακάτω:

Για τον σχεδιασμό της δοκού, αρχικά εμφανίστηκε το γεωμετρικό τμήμα της δοκού από σκυρόδεμα, εντός του οποίου πρέπει να σχεδιαστεί ο οπλισμός. Για αυτόν τον λόγο η δοκός προσανατολίστηκε επαρκώς και τοποθετήθηκε στην αρχή των αξόνων του τρισδιάστατου χώρου για την διευκόλυνση της εισαγωγής του οπλισμού. Ο οπλισμός της δοκού αποτελείται από τις διαμήκεις ράβδους και τις ράβδους περισφίξεως. Πρώτα εισήχθη ένα τμήμα του οπλισμού περισφίξεως το οποίο μεταφέρθηκε και εκείνο στην αρχή των αξόνων με προσανατολισμό ίδιο με αυτόν της δοκού. Στην συνέχεια, ο οπλισμός αυτός τοποθετήθηκε εντός της δοκού σε απόσταση από την εξωτερική πλευρά που αντιστοιχούσε στην

επικάλυψη 20mm που έχει καθοριστεί. Μετά, εισήχθη ο πρώτος διαμήκης σπλισμός της δοκού ο οποίος τοποθετήθηκε στο άκρο του σπλισμού περίσφιξης. Ο σπλισμός αυτός έφερε ακριβείς διαστάσεις από την φάση σχεδιασμού, έτσι ταίριαζε ακριβώς εντός της δοκού λαμβάνοντας υπόψιν και τις επικαλύψεις σε κάθε πλευρά. Στην συνέχεια, δημιουργήθηκαν τρία αντίγραφα του διαμήκη σπλισμού – ένα για κάθε επιπλέον άκρο – και αντίγραφα του σπλισμού περίσφιξης τοποθετήθηκαν κατά μήκος των διαμηκών ράβδων μέχρι το απέναντι άκρο της δοκού. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το υποστυλώμα.

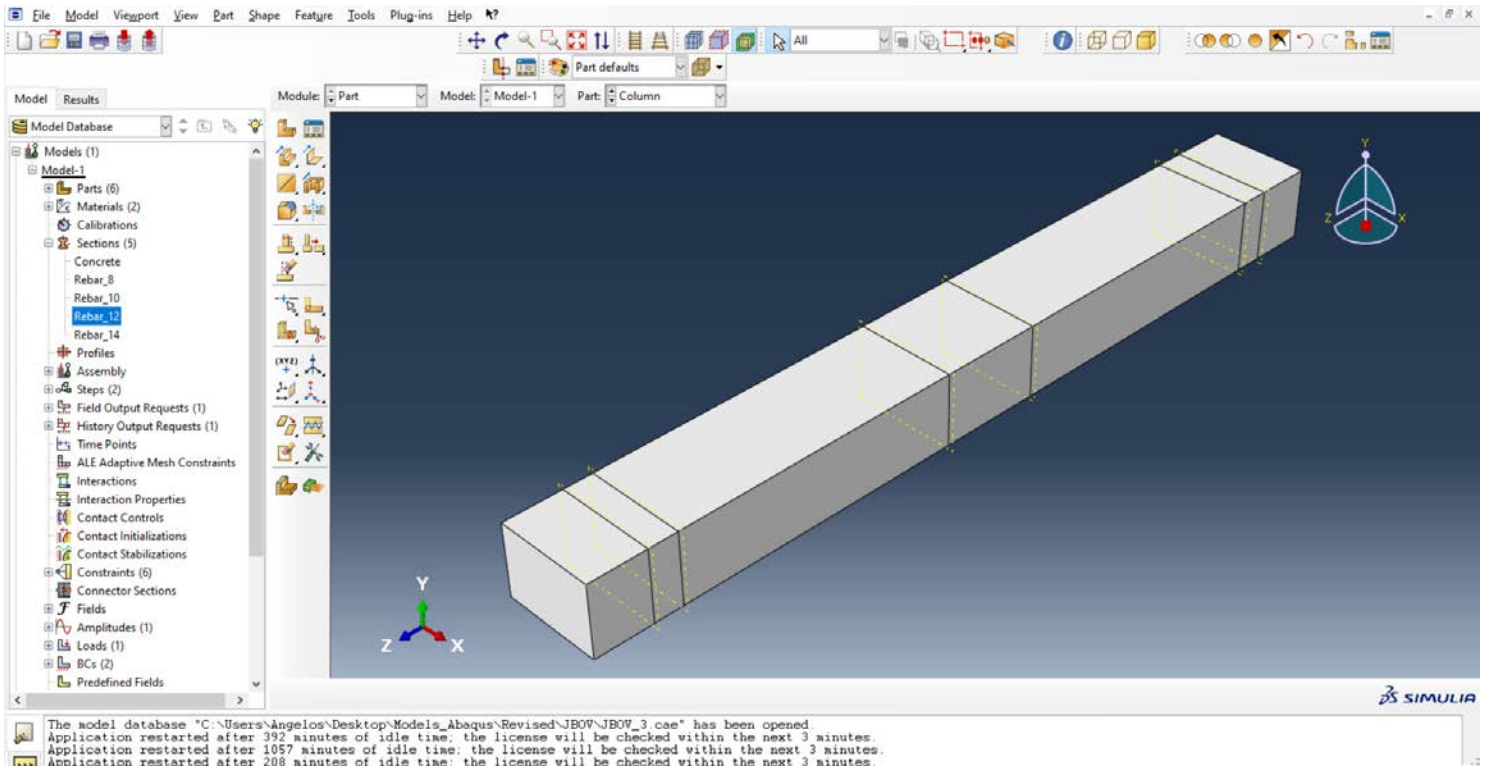


Εικόνα 4.4.1: Ο σπλισμός του υποστυλώματος κατασκευασμένος εντός του υποστυλώματος το οποίο έχει «κρυφτεί» για διευκόλυνση.

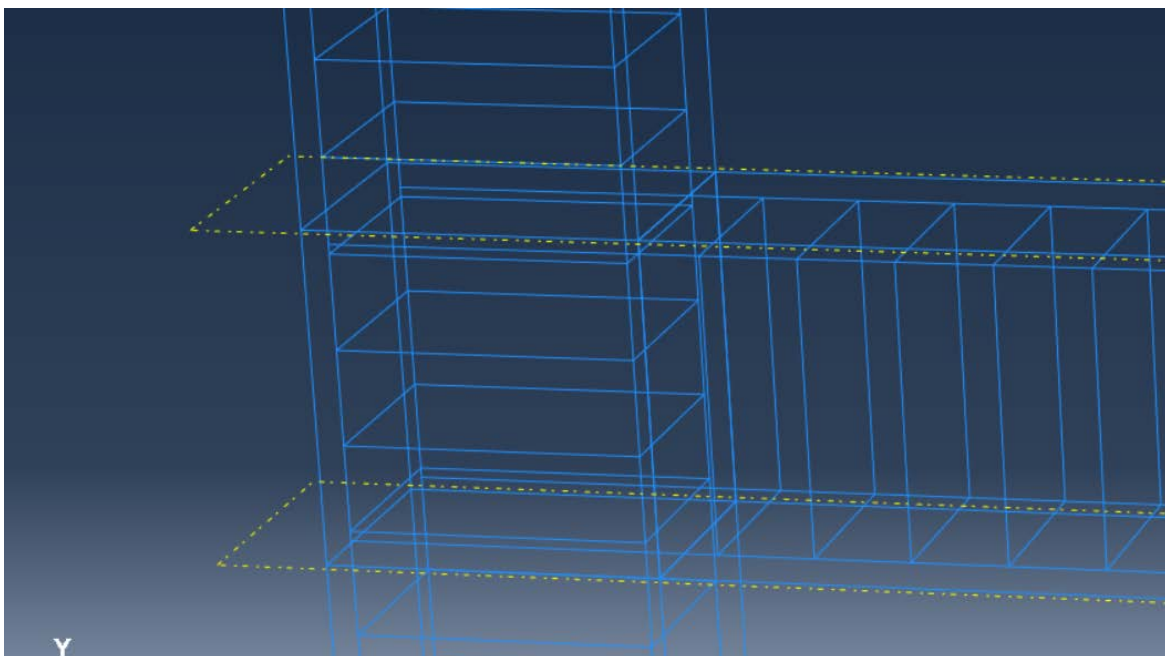
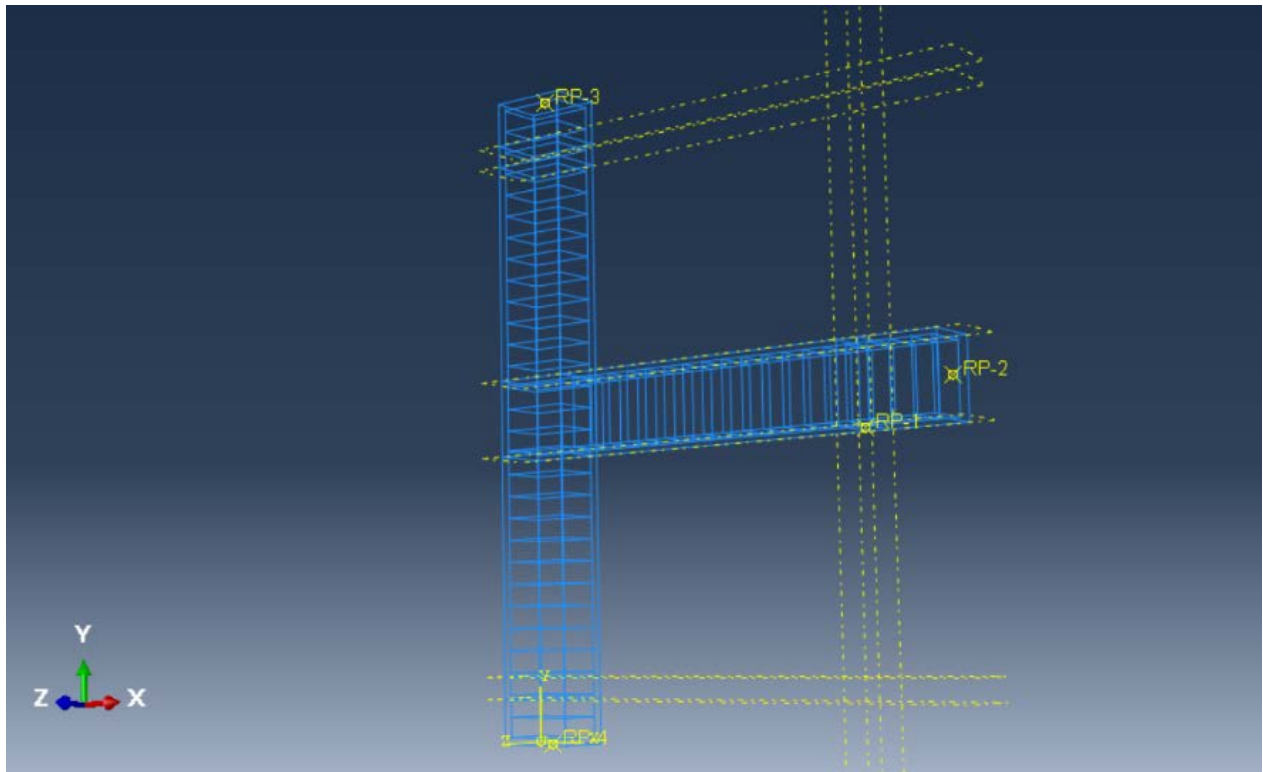


Εικόνα 4.4.2: Η δοκός σε ειδική διάφανη όψη και ο σπλισμός της εσωτερικά. Σημειώνονται τα τμήματα των διαμήκους ράβδων που προεκτείνονται εκτός της δοκού. Αυτά είναι τα τμήματα που εισχωρούν στα υποστυλώματα και δημιουργούν τον κόμβο.

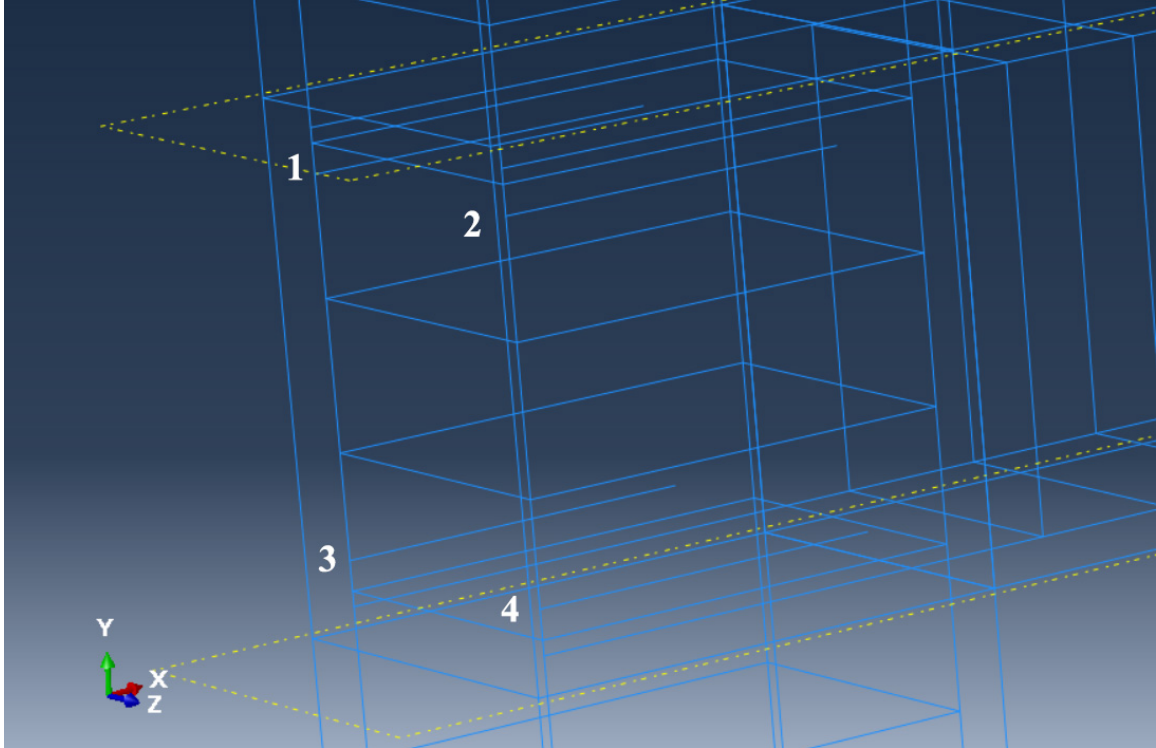
Στην συνέχεια τα δύο κατασκευασμένα τμήματα προσανατολίστηκαν στον χώρο και τέθηκαν έτοιμα για την σύνδεσή τους. Για την πλήρη σύζευξη των δύο τμημάτων είναι απαραίτητη η δημιουργία σημείων στις ακριβείς θέσεις επαφής των άκρων της δοκού με το υποστύλωμα. Για να γίνει αυτό, στο υποστύλωμα ορίστηκαν δύο επίπεδα παράλληλα με τις μικρότερες πλευρές των υποστυλωμάτων και τοποθετήθηκαν στα ύψη όπου η δοκός θα ακουμπούσε το υποστύλωμα, ορίζοντας έτσι την περιοχή επαφής. Αυτά τα δύο επίπεδα μέσω των διαθέσιμων εντολών όρισαν την περιοχή που η δοκός θα εφάπτεται στα υποστυλώματα. Τα τέσσερα άκρα της περιοχής ορίστηκαν ως σημεία «αγκυρώσεως» και η δοκός ήρθε σε επαφή με το υποστύλωμα αναφορικά με αυτά τα σημεία. Για το δοκίμιο ελέγχου η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώθηκε σε αυτό το σημείο. Για τα δοκίμια JBOR και JBOVFX που έφεραν επιπλέον ενίσχυση, μετά την ολοκλήρωση των πλαισίων τοποθετήθηκε ο σπλισμός ενισχύσεως στις κατάλληλες θέσεις.



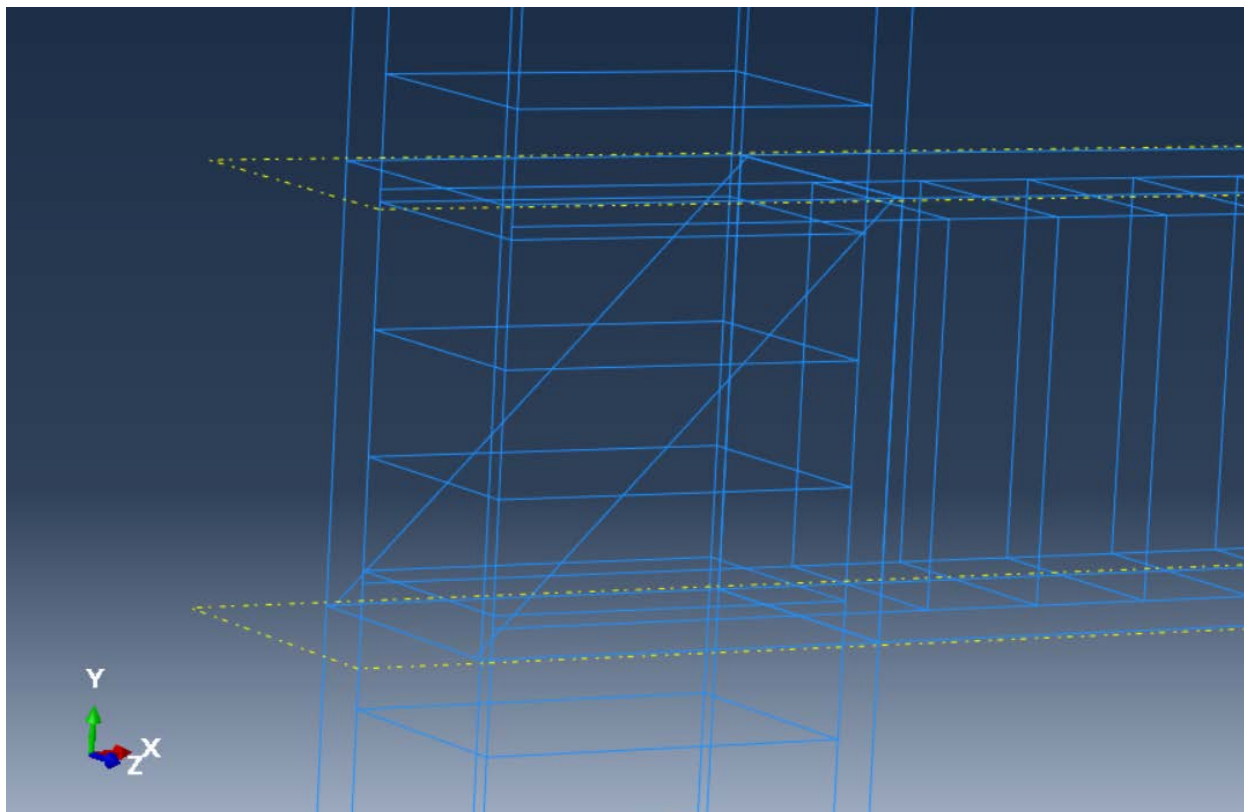
Εικόνα 4.4.3: Το υποσύλωμα με την περιοχή επαφής που ορίστηκε να διακρίνεται στην μέση. Πάνω στα τέσσερα άκρα της περιοχής στην άνω όψη της θα αγκυρωθεί η δοκός.



Εικόνα 4.4.4: (Άνω): Το ολοκληρωμένο πλαίσιο με διαφανή όψη που επιτρέπει την επισκόπηση του οπλισμού εσωτερικά. (Κάτω): Λεπτομέρεια του κόμβου με τον οπλισμό. Το συγκεκριμένο δοκίμιο είναι το JBOV και δεν φέρει επιπλέον ενίσχυση.



Εικόνα 4.4.5: Λεπτομέρεια του κόμβου από το δοκίμιο JBOR. Σημειώνονται οι τέσσερις ράβδοι ενίσχυσης από χάλυβα στις θέσεις 1,2,3,4.



Εικόνα 4.4.6: Λεπτομέρεια του κόμβου από το δοκίμιο JBOVFX. Σημειώνονται οι δύο ράβδοι από CFRP που δένονται διαγωνίως όχι πάνω στον σπλισμό αλλά στις επιφάνειες του σκυροδέματος στο υποστύλωμα και στην δοκό.

Έτσι ολοκληρώθηκε η τρισδιάστατη οργάνωση των τμημάτων στον χώρο, όμως τα διάφορα ακόμα δεν έφεραν τις ειδικές σχέσεις που καθορίζουν την επαφή τους, σε αυτό το σημείο ήταν απλώς ανεξάρτητα κομμάτια τοποθετημένα το ένα εγγύς του άλλου. Οι διάφορες αλληλουχίες που καθόριζαν την επαφή τους ορίστηκαν στα επόμενα στάδια σχεδιασμού.

4.5 Ορισμός βημάτων αναλύσεως

Στο πρόγραμμα Abaqus, μια θεμελιώδης έννοια είναι η διαίρεση του ιστορικού της αναλύσεως προβλημάτων σε βήματα (steps), τα οποία αντιπροσωπεύουν ξεχωριστές φάσεις του ιστορικού εισαγωγής φορτίων στην κατασκευή. Αυτά τα βήματα περιλαμβάνουν διάφορες φάσεις, όπως θερμικές μεταβατικές συνθήκες, συγκράτηση ερπυσμού, δυναμικές μεταβατικές συνθήκες και άλλα. Κατά βάση, ένα βήμα μπορεί να είναι τόσο απλό στον ορισμό όσο μια στατική ανάλυση, δηλαδή μια αλλαγή φορτίου από το ένα μέγεθος σε ένα άλλο ή από μηδενικό φορτίο σε μη μηδενικό. Κάθε βήμα περιλαμβάνει μια περιγραφική ετικέτα, η οποία βοηθά στην οργάνωση των δεδομένων στο αρχείο (.dat). Αυτή η

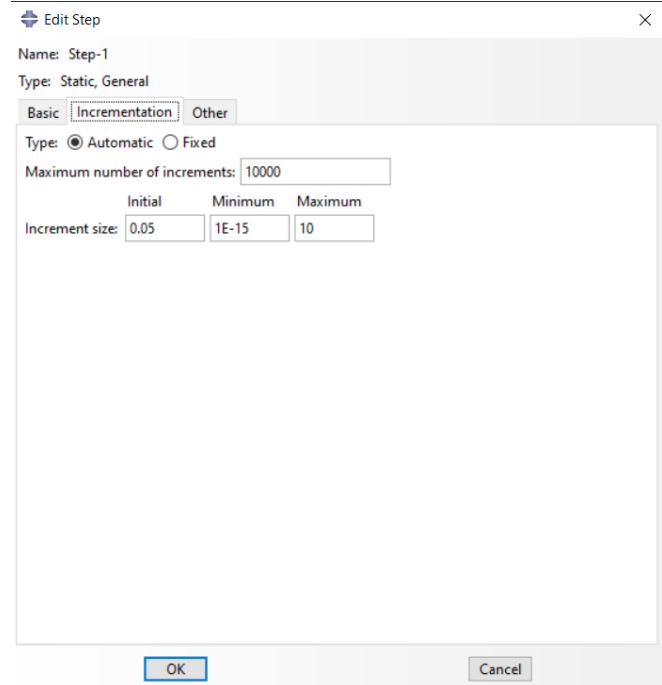
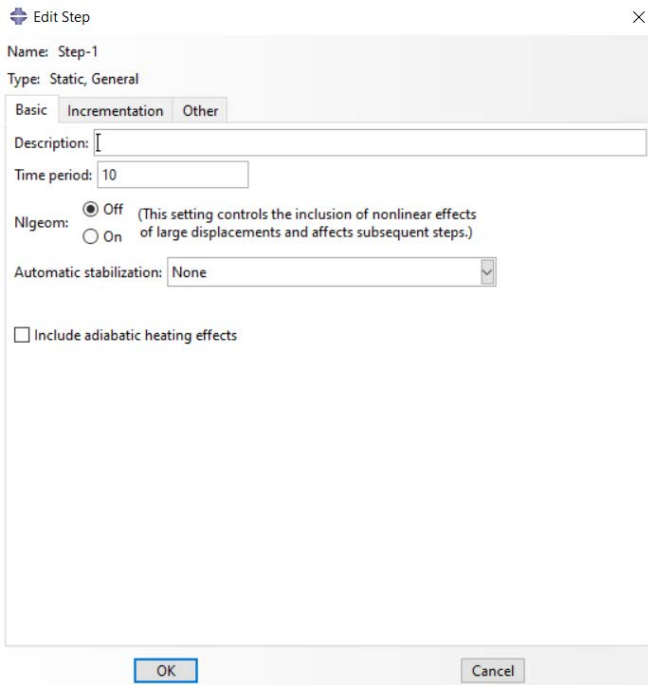
περιγραφή χρησιμεύει αποκλειστικά για λόγους ευκολίας. Για κάθε βήμα, πρέπει να επιλέγεται μια διαδικασία ανάλυσης, η οποία καθορίζει τον συγκεκριμένο τύπο ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί. Αυτές οι επιλογές περιλαμβάνουν ανάλυση στατικής τάσης, ανάλυση δυναμικής τάσης, λυγισμό και ανάλυση μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ άλλων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι επιτρέπεται μόνο μία διαδικασία ανά βήμα και ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί διαδικασιών από βήμα σε βήμα στο Abaqus/Standard για τα αποτελέσματα της τελικής αναλύσεως, δύο διαδικασίες μαζί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια ανάλυση.

Κατά την ανάλυση ενός βήματος γεννάται η έννοια της προσαυξήσεως (increment), που αντιπροσωπεύει μια υποδιαίρεση ενός βήματος. Σε μη γραμμικές αναλύσεις, το συνολικό φορτίο που εφαρμόζεται σε ένα βήμα διαιρείται σε μικρότερα βήματα για να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση της μη γραμμικής λύσης. Κατά συνέπεια, μια προσαύξηση αντιστοιχεί σε μια σταδιακή εφαρμογή ενός μέρους του συνολικού φορτίου. Στο Abaqus/Standard, το μέγεθος της πρώτης αύξησης προτείνεται από τον χρήστη, ενώ οι επόμενες αυξήσεις καθορίζονται αυτόματα. Το Abaqus/Explicit χρησιμοποιεί πλήρως αυτόματη προεπιλεγμένη αύξηση χρόνου, αν και είναι δυνατή η παρέμβαση του χρήστη. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ρητή μέθοδο υπάρχει ένα όριο σταθερότητας για την αύξηση του χρόνου, που εξαρτάται κυρίως από το μήκος του μικρότερου στοιχείου. Στο τέλος κάθε προσαύξησης, όταν η δομή βρίσκεται περίπου σε ισορροπία, τα αποτελέσματα γίνονται διαθέσιμα για αποθήκευση βάσεων δεδομένων εξόδου ή εγγραφή αρχείων. Αυτές οι συγκεκριμένες αυξήσεις όπου τα αποτελέσματα επιλέγονται για εγγραφή στο αρχείο βάσης δεδομένων εξόδου αναφέρονται ως «πλαίσια» (frames). Ενώ ο μέγιστος αριθμός πλαισίων σε μια ανάλυση μπορεί να ταιριάζει με τον αριθμό των αυξήσεων, μπορούν να ζητηθούν λιγότερα πλαίσια για τη διατήρηση της μνήμης αποθήκευσης.

Για αναλύσεις που δεν φέρνουν λύση κατευθείαν η έννοια της «επανάληψης» γίνεται σχετική όταν χρησιμοποιείται ένας άρρητος λύτης, ειδικά στο Abaqus/Standard. Στους άρρητους λύτες, ο στόχος είναι να επιτευχθεί ισορροπία σε κάθε αύξηση συγκρίνοντας την εξωτερικά εφαρμοζόμενη δύναμη με την εσωτερική δύναμη αντίδρασης, γνωστή ως υπολειπόμενη. Το Abaqus χρησιμοποιεί μια τιμή ανοχής που ορίζεται στις ρυθμίσεις των βημάτων για να προσδιορίσει πότε η διαφορά μεταξύ των δυνάμεων πέφτει κάτω από αυτό το όριο. Ο λύτης πραγματοποιεί πολλαπλές επαναλήψεις εντός μιας αύξησης μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία. Επιπλέον, το Abaqus/Standard επιλέγει αυτόματα το μέγεθος των αυξήσεων – εξαιρουμένης της πρώτης αύξησης – και κάθε επιλογή μεγέθους αναφέρεται ως «προσπάθεια» (attempt). Εάν το Abaqus δεν μπορεί να βρει μια λύση με το επιλεγμένο μέγεθος αύξησης μετά από πολλές επαναλήψεις, προσαρμόζει το μέγεθος αύξησης και ξεκινά μια νέα προσπάθεια. Στις αναλύσεις Abaqus/Explicit, δεν γίνονται προσπάθειες καθώς η ρητή μέθοδος λειτουργεί χωρίς την ανάγκη επαναληπτικών προσαρμογών.

Για την παρούσα ανάλυση επιλέχθηκε ο ορισμός ενός βήματος, αφού η φόρτιση είναι μία με σταθερές αυξομειώσεις του ασκούμενου φορτίου. Ο τρόπος με τον οποίο προσομοιάστηκαν οι εναλλαγές στο μέγεθος των φορτίων θα περιγραφεί σε επόμενο στάδιο σχεδιασμού. Από την λίστα επιλογών για το είδος της ανάλυσης επιλέχθηκε η στατική (static). Ως χρόνος βήματος ορίστηκε 10 μονάδες, ως μέγιστος αριθμός προσαυξήσεων εισήχθη χειρωνακτικά η τιμή 10000 και το μέγεθος της κάθε προσαύξησης ορίστηκε 0.05. Ο σκοπός είναι να δημιουργηθούν πολλές προσαυξήσεις που θα μπορούν να αναλύσουν

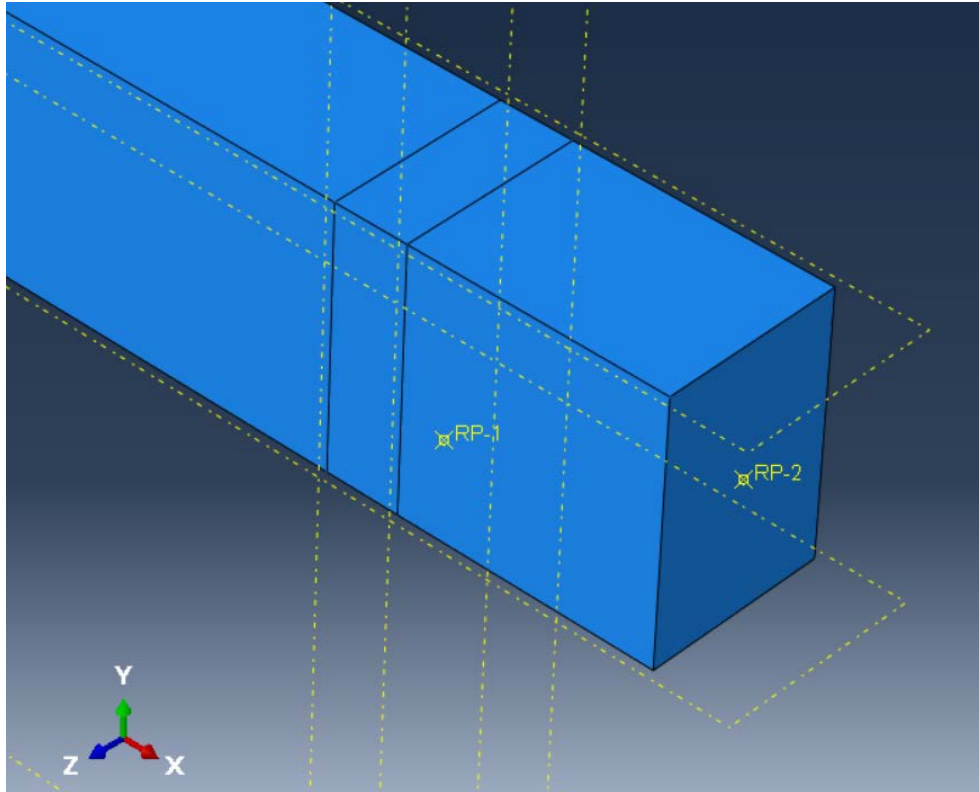
την φόρτιση ξεχωριστά διαιρώντας την σε πολλά μικρά τμήματα, κάτι που θα βοηθήσει ιδιαίτερα στην υπολογιστική ανάλυση ιδίως για μια κυκλική φόρτιση όπως η υφιστάμενη.



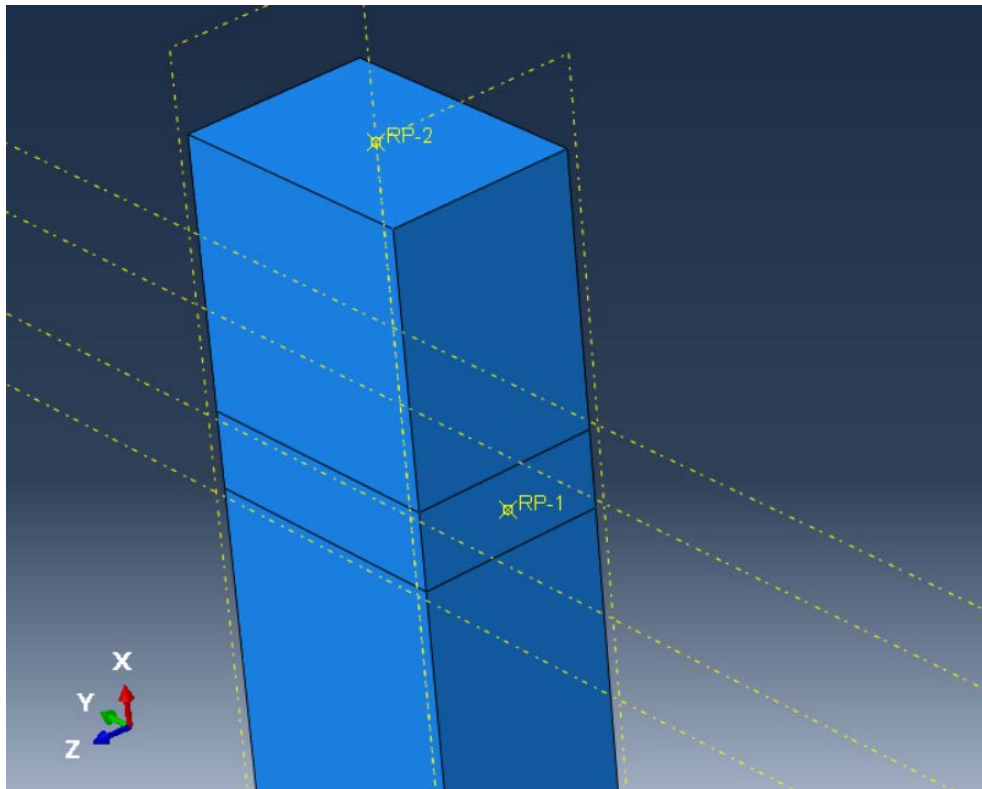
Εικόνα 4.5.1: Οι ρυθμίσεις των βημάτων που ορίστηκαν, ως προς τις μονάδες χρόνου και τις προσαιξήσεις.

Στην συνέχεια είναι απαραίτητος ο ορισμός των σημείων άσκησης των φορτίων και διαφόρων σημείων αναφοράς. Το βασικό διάγραμμα για την εξέταση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής σε κυκλική φόρτιση είναι το διάγραμμα δυνάμεων – παραμορφώσεων, όπως έχει καθιερωθεί από τους Toshikazu Takeda et al^[38]. Η χρήση αυτού το διαγράμματος για την εξέταση των δοκιμών έγινε και στο άρθρο αναφοράς της παρούσας εργασίας, όπου περιγράφεται η τοποθέτηση ενός μετρητή μετακινήσεων στο κατακόρυφο άκρο της δοκού. Στο ίδιο άκρο του προσομοιωμένου δοκιμίου ορίστηκε σημείο αναφοράς (reference point) μέσω εντολής του προγράμματος Abaqus. Τα σημεία αναφοράς εντός του πλαισίου του προγράμματος είναι σημεία πάνω στην κατασκευή που καταγράφουν δεδομένα που θέτει ο χρήστης. Σημεία αναφοράς ορίστηκαν και τα σημεία ασκήσεως φορτίων. Σύμφωνα με το πείραμα αναφοράς, στο εξωτερικό άκρο της δοκού τοποθετήθηκε μηχανήμα που ασκούσε σταθερή παραμόρφωση στο στοιχείο. Στην προσομοίωση αυτή η περιοχή οροθετήθηκε ως περιοχή άσκησης φορτίου, με την καταγραφή δεδομένων να συγκεντρώνεται στο σημειακό κέντρο της περιοχής. Το ίδιο συνέβη και με την περιοχή του

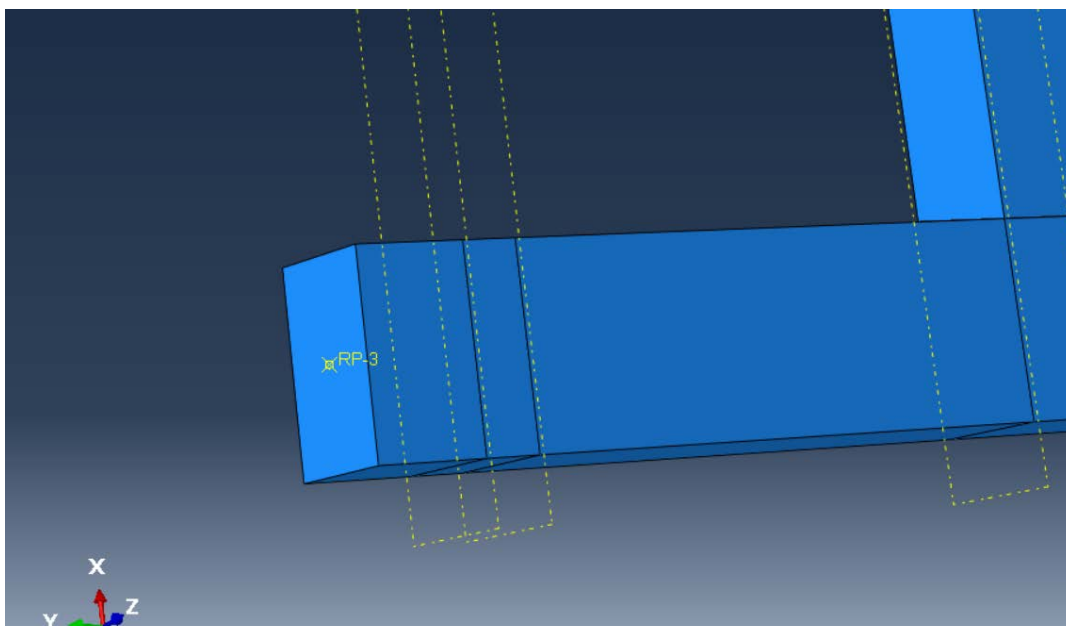
υποστυλώματος όπου ασκούνται σταθερό φορτίο που προσομοιάζει το βαρυτικό φορτίο των ανωτέρω ορόφων.



Εικόνα 4.5.2: Το σημείο αναφοράς στο εξωτερικό άκρο της δοκού. Το σημείο ορίστηκε κυρίως για την καταγραφή δεδομένων μετακινήσεως.



Εικόνα 4.5.3: Το σημείο αναφοράς στην επιφάνεια άσκησης του παραμορφωσιακού φορτίου στην δοκό. Το σημείο συγκεντρώνει και καταγράφει όλα τα δεδομένα της επιφάνειας.



Εικόνα 4.5.4: Το σημείο αναφοράς στο άκρο του υποστυλώματος.

Για την ολοκλήρωση ορισμού του βήματος ανάλυσης απαιτείται η δημιουργία εντολών εξόδου για τα αποτελέσματα που χρήζουν καταγραφής για την προσομοίωση. Για να γίνει αυτό, ορίστηκαν στον Επεξεργαστή Εντολών Εξόδου (Output Request Manager) δεδομένα καταπονήσεων, μετακινήσεων, παραμορφώσεων και δυνάμεων. Πιο αναλυτικά καθορίστηκαν τα εξής δεδομένα:

S, Stress: Η επισήμανση όλων των στοιχείων του πλαισίου που καταπονούνται.

PE, Plastic Stress: Η επισήμανση όλων των στοιχείων που καταπονούνται πλαστικά.

PREEQ, Plastic Strain Equivalent: Αυτός είναι ένας όρος του Abaqus που αντιπροσωπεύει μια παραγωγή μέτρησης μαζικής καταπόνησης. Η τιμή αυτή υποδεικνύει την έκταση της διαρροής σε μια δεδομένη περιοχή και παρέχει μια εικόνα για το πόσο έχει προχωρήσει αυτή στην συγκεκριμένη περιοχή κατά μήκος του μοντέλου αστοχίας υλικού. Όταν μια περιοχή υφίσταται διαρροή, θα έχει μια αντίστοιχη τιμή PREEQ, επιτρέποντας την κατανόηση της προόδου της στο μοντέλο αστοχίας.

U, Translations and Rotations: Η καταγραφή των μετακινήσεων (translations) και περιστροφών (rotations) των σημείων αναφοράς του πλαισίου.

RF, Reaction Forces and Moments: Η καταγραφή των δυνάμεων και ροπών αντίδρασης στα σημεία αναφοράς.

CF, Concentrated Forces and Moments: Η καταγραφή των συγκεντρωμένων φορτίων και ροπών στα σημεία αναφοράς. Η εντολή αυτή βοηθάει στην επισκόπηση μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στην κατασκευή στον άξονα του χρόνου για τα ασκούμενα φορτία που έχουν οριστεί.

DAMAGEC, Compressive Damage: Η καταγραφή της θλιπτικής αστοχίας σε όλα τα στοιχεία του πλαισίου.

Στην συνέχεια καθορίζονται τα δεδομένα στον Χρονικό Επεξεργαστή Εντολών Εξόδου (History Output Request Manager). Στον επεξεργαστή επιλέγονται τα δεδομένα που χρήζουν καταγραφής σε άξονα χρόνου, όπως οι αντιδράσεις και οι μετακινήσεις.

Edit Field Output Request ✕

Name: F-Output-1
Step: Step-1
Procedure: Static, General

Domain: Exterior only

Frequency: n:

Timing:

Element output position:

Output Variables

Select from list below Preselected defaults All Edit variables

S,PE,PEEQ,PEMAG,LE,U,RF,CF,CSTRESS,CDISP,DAMAGEC,SDEG

VR, Rotational velocities
 RBANG, Angle in degrees between rebar and isoparametric direction
 RBROT, Change in angle in degrees between rebar and isoparametric direction

▼ Forces/Reactions

RF, Reaction forces and moments
 RT, Reaction forces
 RM, Reaction moments
 CF, Concentrated forces and moments
 SF, Section forces and moments
 SSEQ, Equivalent shear flow

Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Interaction.

Output for rebar

Output at shell, beam, and layered section points:
 Use defaults Specify:

Include local coordinate directions when available

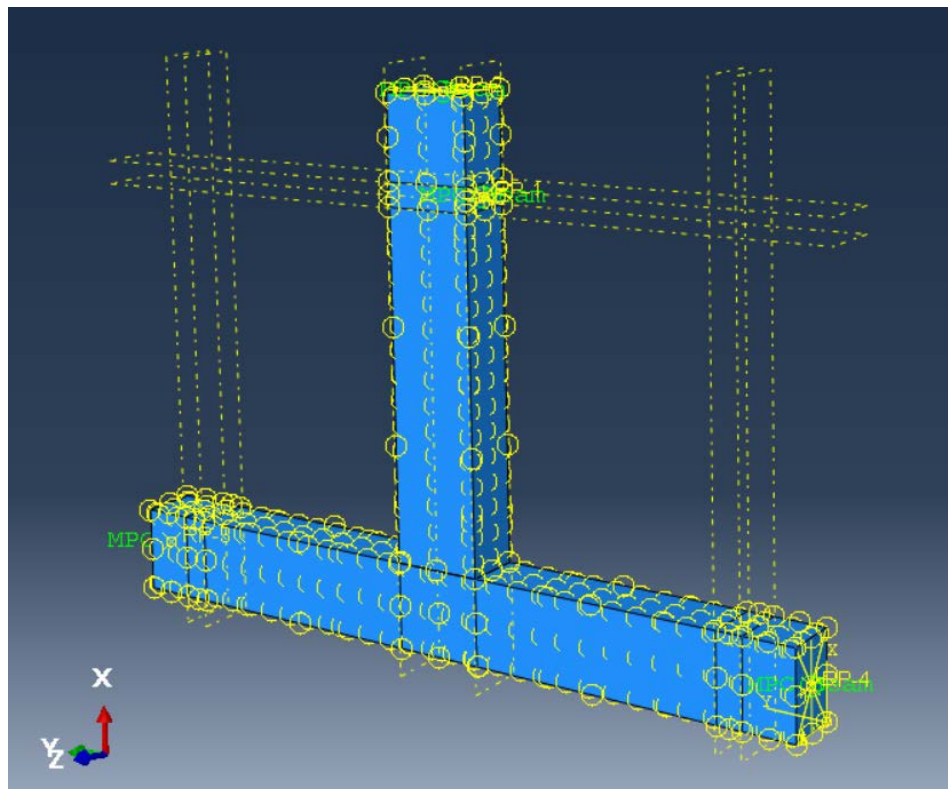
Εικόνα 4.5.5: Τα δεδομένα εξόδου από τον χρονικό επεξεργαστή.

4.6 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφανειών

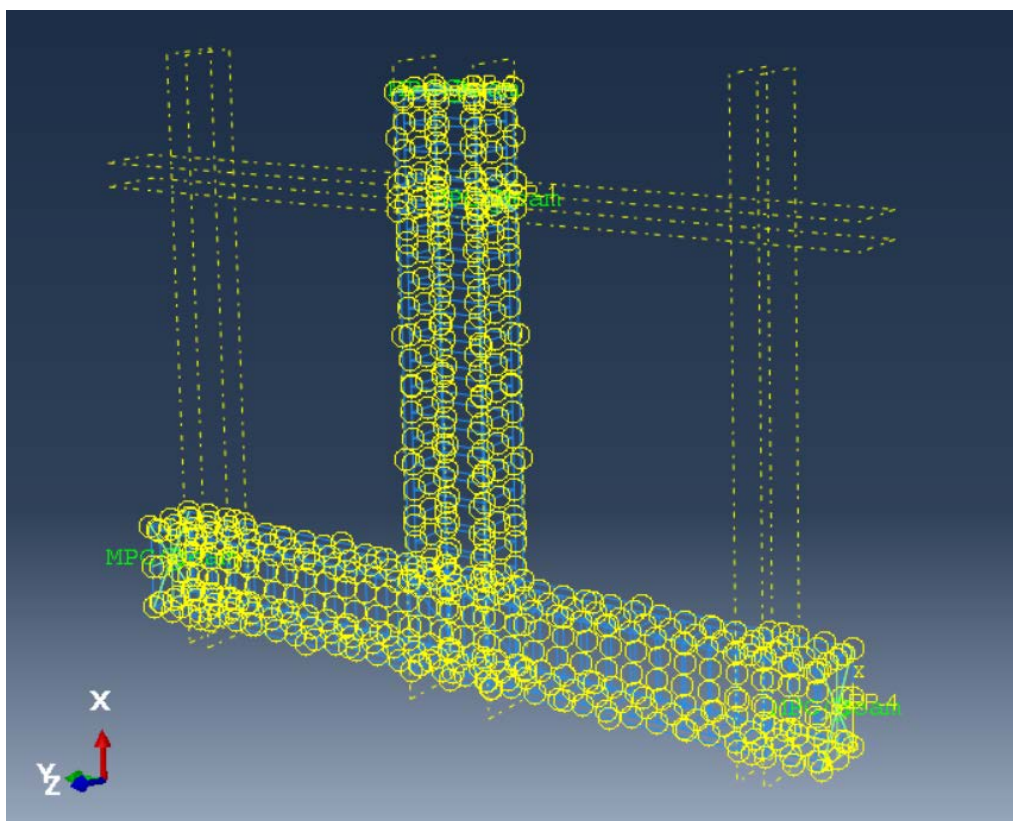
Στην φάση σχεδιασμού του πλαισίου δημιουργήθηκε η τρισδιάστατη γεωμετρική του απεικόνιση, όμως δεν τέθηκαν οι διάφορες σχέσεις που διέπουν τις επαφές μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν την κατασκευή. Για τον καθορισμό αυτών των σχέσεων γίνεται χρήση των εντολών στο στοιχείο «Αλληλεπιδράσεων» (interaction) του Abaqus. Η πρώτη αλληλεπίδραση που ορίζεται είναι η επαφή μεταξύ οπλισμού και του σκυροδέματος που τον περικλείει μέσω της εντολής «ενσωματωμένης περιοχής» (embedded region). Η τεχνική του ενσωματωμένου στοιχείου είναι μια μέθοδος που

χρησιμοποιείται στο Abaqus για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων στοιχείων ή ομάδων στοιχείων ως ενσωματωμένων εντός ενός «οικοδεσπότη» (host). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως για τη προσομοίωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα. Το πρόγραμμα πραγματοποιεί μια αναζήτηση για γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των κόμβων, των ενσωματωμένων στοιχείων και των στοιχείων υποδοχής. Εάν ένας κόμβος ενός ενσωματωμένου στοιχείου βρίσκεται μέσα σε ένα στοιχείο υποδοχής, οι μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας σε αυτόν τον κόμβο εξαλείφονται, μετατρέποντάς τον ουσιαστικά σε "ενσωματωμένο κόμβο". Οι μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας του ενσωματωμένου κόμβου περιορίζονται στη συνέχεια από τις παρεμβαλλόμενες τιμές που προέρχονται από τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας του κεντρικού στοιχείου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι ενώ τα ενσωματωμένα στοιχεία μπορούν να διαθέτουν περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας, αυτές οι περιστροφές είναι ανεξάρτητες από τη διαδικασία ενσωμάτωσης. Επιτρέπονται πολλαπλοί ορισμοί ενσωματωμένων στοιχείων, παρέχοντας ευελιξία κατά την διαδικασία προσομοίωσης.

Στην παρούσα προσομοίωση δεν χρησιμοποιήθηκε ο μηχανισμός αυτόματης αναζήτησης, αντιθέτως τα στοιχεία επιλέχθηκαν χειρωνακτικώς. Από την λίστα επιλογών δημιουργίας αγκυρώσεων, επιλέχθηκε η «ενσωματωμένη περιοχή» και μέσω της τρισδιάστατης όψης επιλέχθηκε ολόκληρος ο οπλισμός και ορίστηκε ως ενσωματωμένος εντός περιοχής «οικοδεσπότη». Στην συνέχεια, επιλέχθηκαν η δοκός και τα υποστυλώματα από σκυρόδεμα ως οι «οικοδεσπότες» και τα δύο στοιχεία ενώθηκαν.



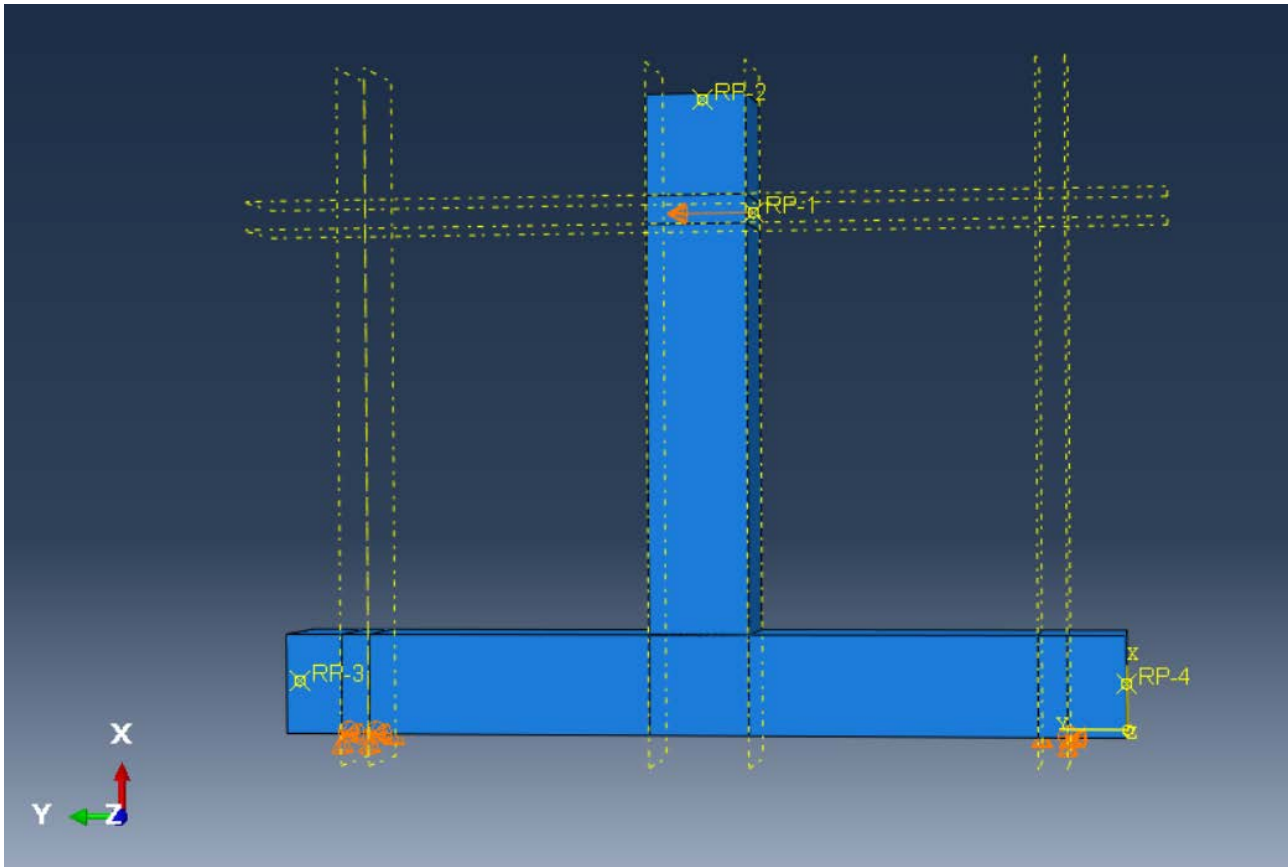
Εικόνα 4.6.1: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το πλαίσιο με τον ενσωματωμένο οπλισμό. Σημειώνονται τα σημεία των ράβδων του οπλισμού όπου για την ενσωμάτωση αγκυρώνονται οι βαθμοί ελευθερίας τους, όπως απεικονίζονται κυκλωμένα.



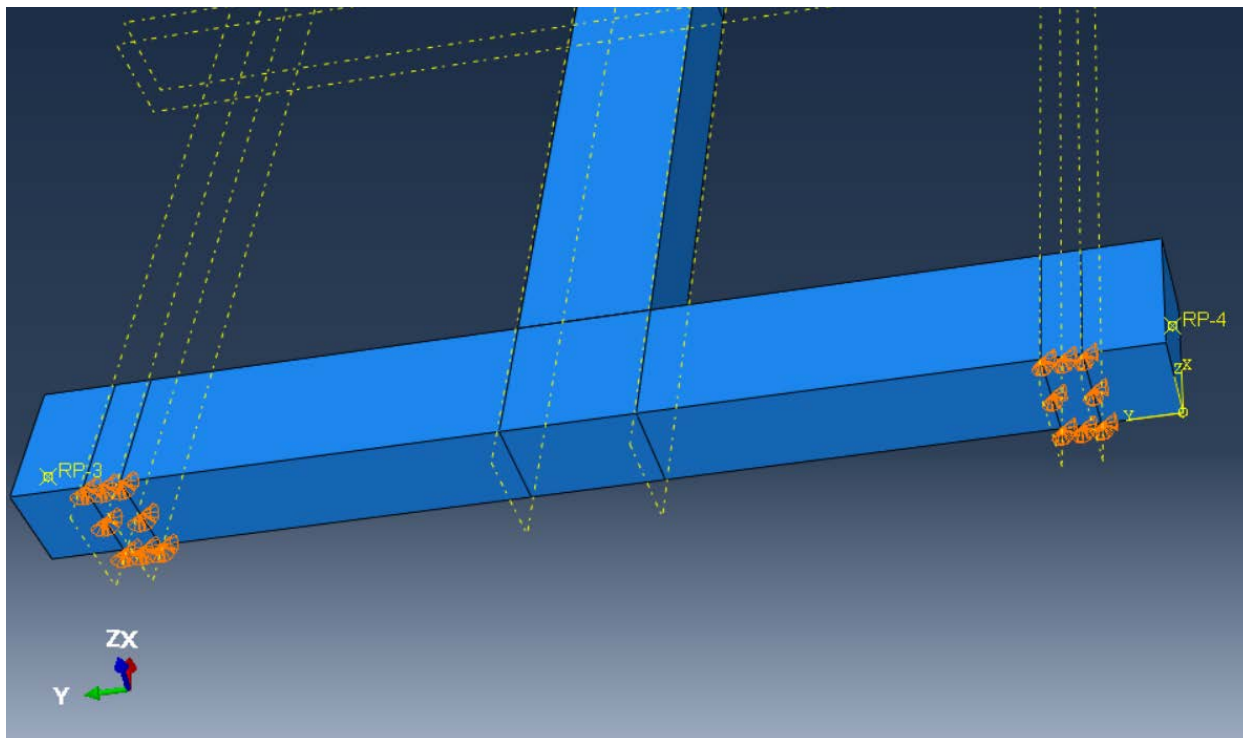
Εικόνα 4.6.2: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το πλαίσιο σε διάφανη όψη που επιτρέπει την επισκόπηση του ενσωματωμένου σπλισμού.

Εν συνεχεία, ακολούθησε ο ορισμός της επιφάνειας επαφής μεταξύ της δοκού και των υποστυλωμάτων και των ιδιοτήτων της. Στην λίστα επιλογών αγκυρώσεως επιλέχθηκε η αγκύρωση τύπου «δέσης» (tie) και ορίστηκαν οι δύο επιφάνειες από την δοκό και τα υποστυλώματα που «δένονται» μεταξύ τους. Ο τύπος «δέσης» συνδέει δύο ξεχωριστές επιφάνειες, έτσι ώστε να μην υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ τους. Αυτός ο τύπος περιορισμού επιτρέπει έτσι την συγχώνευση δύο περιοχών, ακόμα και εάν τα πλέγματα που δημιουργούνται στις επιφάνειες μπορεί να είναι ανόμοια.

Στην συνέχεια καθορίστηκαν οι στηρίξεις του πλαισίου στο πειραματικό περιβάλλον. Από το πείραμα αναφοράς είναι γνωστό ότι το πλαίσιο στηρίχθηκε σε συγκεκριμένες θέσεις στα υποστυλώματα που δεν επέτρεπαν μετακίνηση αλλά επέτρεπαν σχετική στροφή. Έτσι, στην υπολογιστική προσομοίωση οροθετήθηκαν στα υποστυλώματα δύο περιοχές που αντιστοιχούσαν στις θέσεις των στηρίξεων του πραγματικού πλαισίου. Εκεί ορίστηκαν αρθρώσεις που μπορούσαν να προσομοιώσουν τον τρόπο στήριξης με τον καλύτερο τρόπο.



Εικόνα 4.6.3: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το πλαίσιο με τις στηρίξεις αρθρώσεων να φαίνονται στο κάτω τμήμα του. Το κάτω τμήμα είναι τα δύο υποστυλώματα και οι αρθρώσεις εκεί παριστάνουν στην στήριξη που δέχεται ένα πλαίσιο από τον υπόλοιπο φορέα.

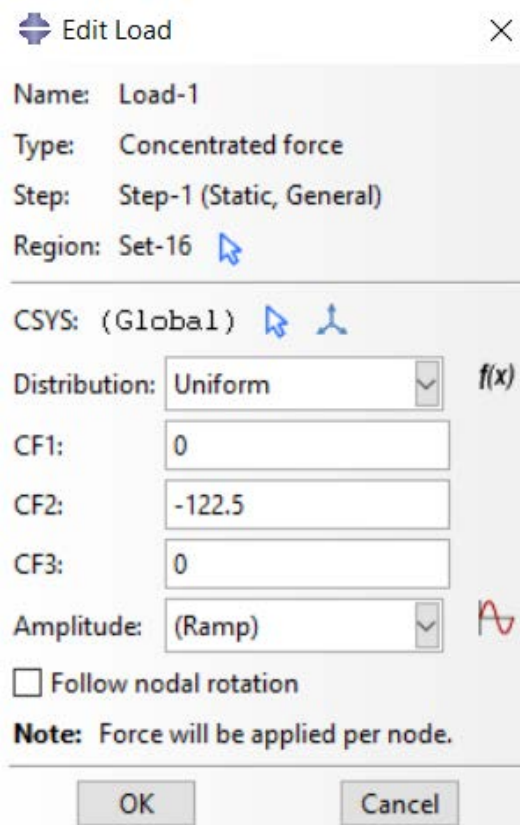


Εικόνα 4.6.4: Λεπτομέρεια που απεικονίζει το κάτω μέρος του πλαισίου όπου οι ακριβείς θέσεις των αρθρώσεων είναι πιο διακριτές.

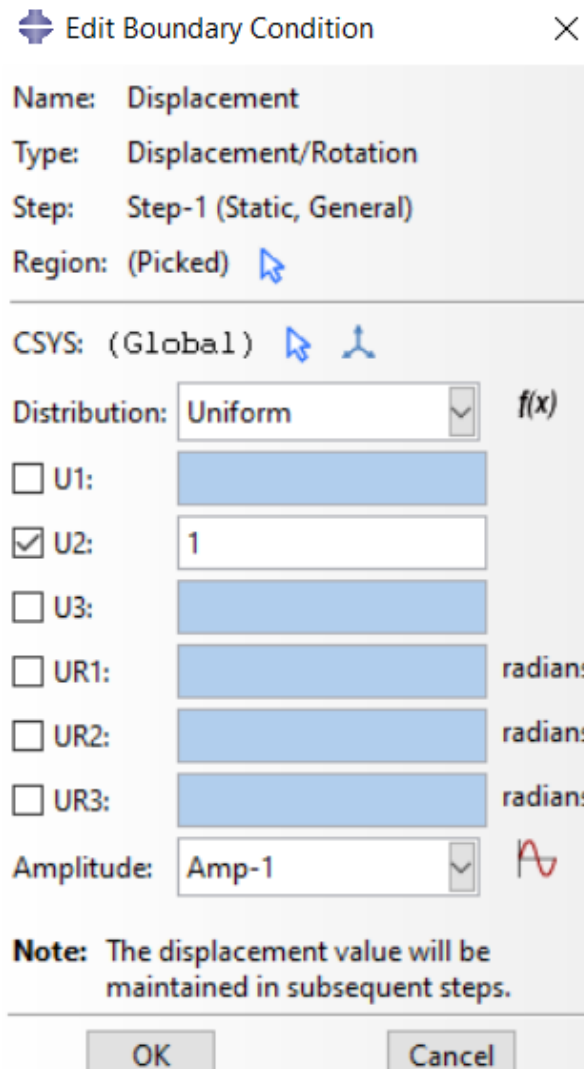
4.7 Ορισμός φορτίων

Τα φορτία που επιδρούν στο πλαίσιο είναι δύο ειδών. Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, το κάτω τμήμα του δοκιμίου καταπονούνταν μια σταθερή αξονική δύναμη, $v_c = N_c/A_{cfcm} \approx 0,05$. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια χαμηλότερη τιμή v_c (5-10%) χρησιμοποιείται συνήθως ως συντηρητική προσέγγιση για τέτοιες κατασκευές πλαισίων, καθώς συνήθως υπόκεινται σε αξονικές κανονικές δυνάμεις $v_c = N_c/A_{cfcm} \geq 0,05$ που σημαίνει ότι $N_c = 122.50$ kN. Τα δοκίμια φορτώθηκαν χρησιμοποιώντας ένα υδραυλικό έμβολο τοποθετημένο 1.475 m μακριά από το ελεύθερο άκρο της δοκού. Το έμβολο ήταν εξοπλισμένο με κυψέλη φορτίου και μετρητή γραμμικής διαφορικής μετατόπισης (LVDT). Μια ψηφιακή μονάδα ελέγχου συνδέθηκε στο έμβολο για την εφαρμογή ακριβών μετατοπίσεων ή δυνάμεων υπό έλεγχο λογισμικού. Τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε πλήρη κυκλική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το υδραυλικό έμβολο δέσμευσε το ελεύθερο κατακόρυφο άκρο των δοκών. Ένας μοχλοβραχίονας 1.475 m δημιούργησε τη ροπή στον κόμβο. Το δείγμα υποβλήθηκε σε επτά στάδια φόρτισης, με αυξανόμενες εφαρμοζόμενες παραμορφώσεις που κυμαίνονται από $\pm 8,5$ mm έως ± 68 mm, που αντιστοιχούν σε σχετική διολίσθηση ορόφων (SD) από 0,50% έως 4,00%. Κάθε επίπεδο φόρτισης περιλάμβανε τρεις επαναλήψεις παραμόρφωσης τόσο σε θετικές όσο και σε αρνητικές κατευθύνσεις.

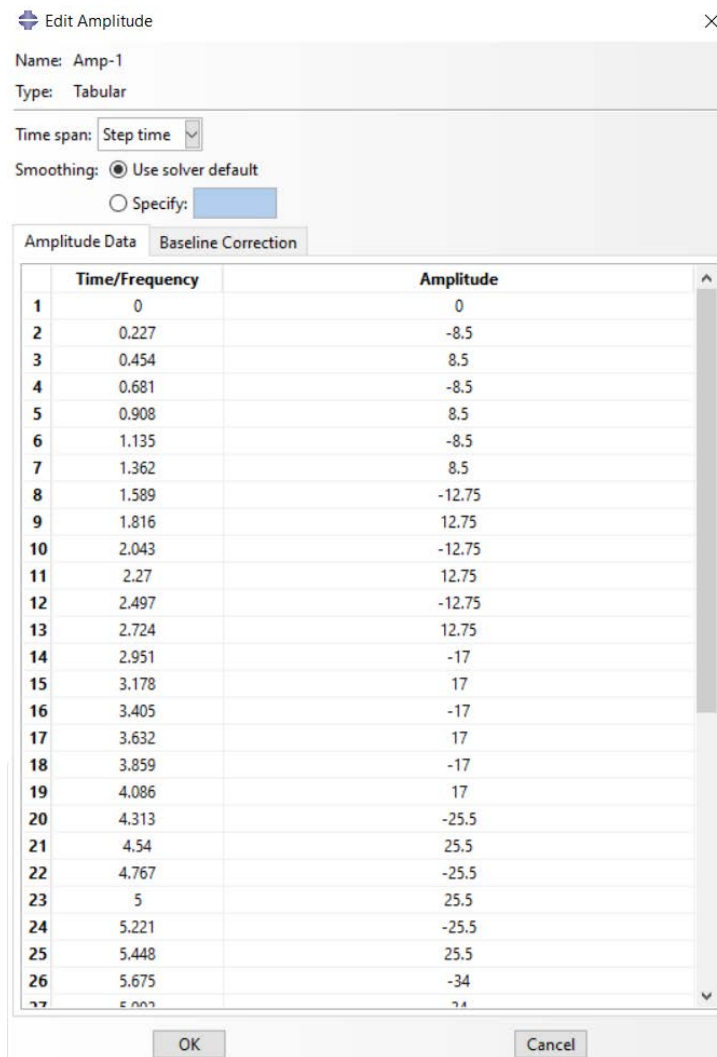
Με αυτό το πειραματικό πλαίσιο ορισμένο, η προσομοίωση των φορτίων ήταν η εξής: Αρχικά από το στοιχείο σχεδιασμού «φορτίων» (load) επιλέχθηκε η άσκηση σταθερού φορτίου στο σημείο αναφοράς που δημιουργήθηκε σε προηγούμενα στάδια του σχεδιασμού. Στην συνέχεια, το παραμορφωσιακό φορτίο δεν ορίστηκε ως δύναμη, αλλά το Abaqus δίνει την δυνατότητα να οριστεί ως ασκούμενη παραμόρφωση κατευθείαν. Έτσι, στην λίστα επιλογών από στηρίξεις επιλέχθηκε η «μετακίνηση» (displacement) και στον άξονα στον οποίο ασκείται εισήχθη ο αριθμός 1. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι διότι το ασκούμενο φορτίο είναι μεταβαλλόμενο και ο τρόπος που θα προσομοιαστεί αυτό είναι με την χρήση ενός «εύρους» (amplitude) τιμών. Το εύρος επιλέχθηκε από την λίστα ευρών ως «πινακοειδές» (tabular) και ορίστηκε ως εξής: Στον δοσμένο πίνακα που απαιτεί συμπλήρωσης για την δημιουργία του εύρους, η πρώτη λίστα αφορά τις χρονικές διαιρέσεις του χρονικού διαστήματος του βήματος αναλύσεως. Όπως ορίστηκαν από το πειραματικό πλαίσιο, τα βήματα της κυκλικής φορτίσεως είναι σαράντα τέσσερα (44) στον αριθμό και το χρονικό διάστημα του αναλυόμενου βήματος είναι ορισμένο ως 10 χρονικές μονάδες. Έτσι, οι 10 χρονικές μονάδες χωρίστηκαν σε 44 βήματα που προχωράνε αθροιστικά από 0 έως 10 με σταθερή προσαύξηση ανά τη φορά. Στην δεξιά στήλη τέθηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτές οι τιμές στην μορφή του εύρους λειτουργούν ως συντελεστές πολλαπλασιασμού, έτσι ανάλογα με την χρονική περίοδο πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό 1 και δίνουν την τιμή που αρμόζει.



Εικόνα 4.7.1: Τα δεδομένα εισαγωγής για το σταθερό αξονικό φορτίο που ασκείται στο υποστύλωμα.



Εικόνα 4.7.2: Τα δεδομένα εισαγωγής για το φορτίο κυκλικής φορτίσεως. Σημειώνεται το εύρος Amp-1 που έχει επιλεγθεί και που παρουσιάζεται παρακάτω.

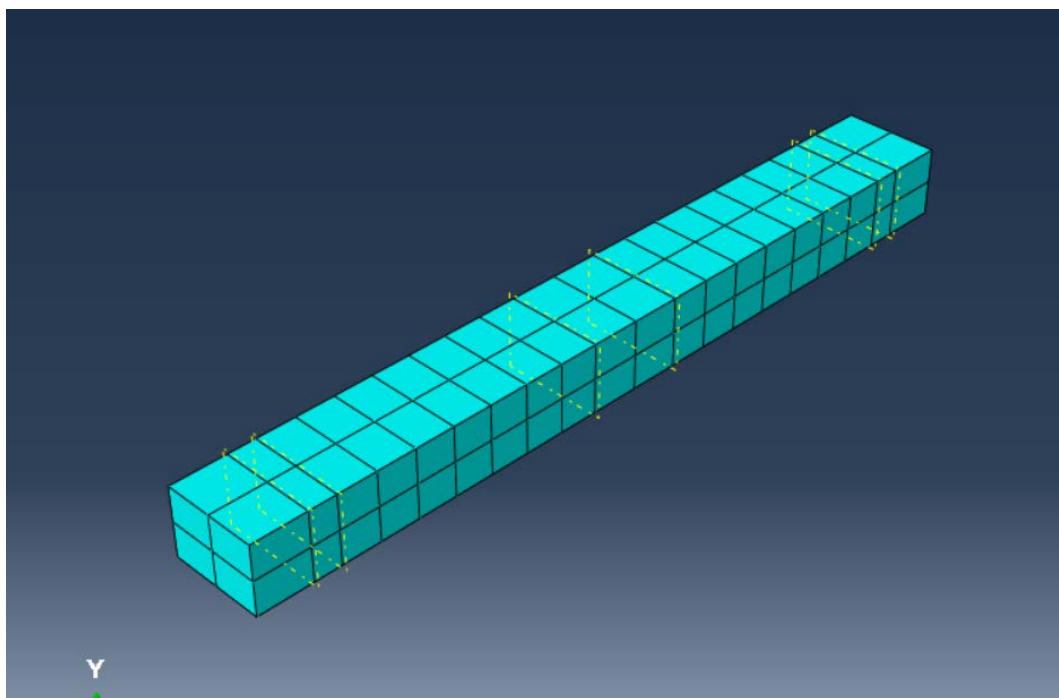


Εικόνα 4.7.3: Το πινακοειδές εύρος που ορίστηκε για την προσομοίωση της κυκλικής φορτίσεως της δοκού. Σημειώνονται η αριστερή στήλη που περιέχει χρονικές διαιρέσεις του βήματος αναλύσεως που αρχίζουν από το 0 και σταθερά αυξάνονται μέχρις το 10. Δίπλα αντιστοιχούν κυκλικές μετακινήσεις όπως ορίστηκαν από το πειραματικό πλαίσιο.

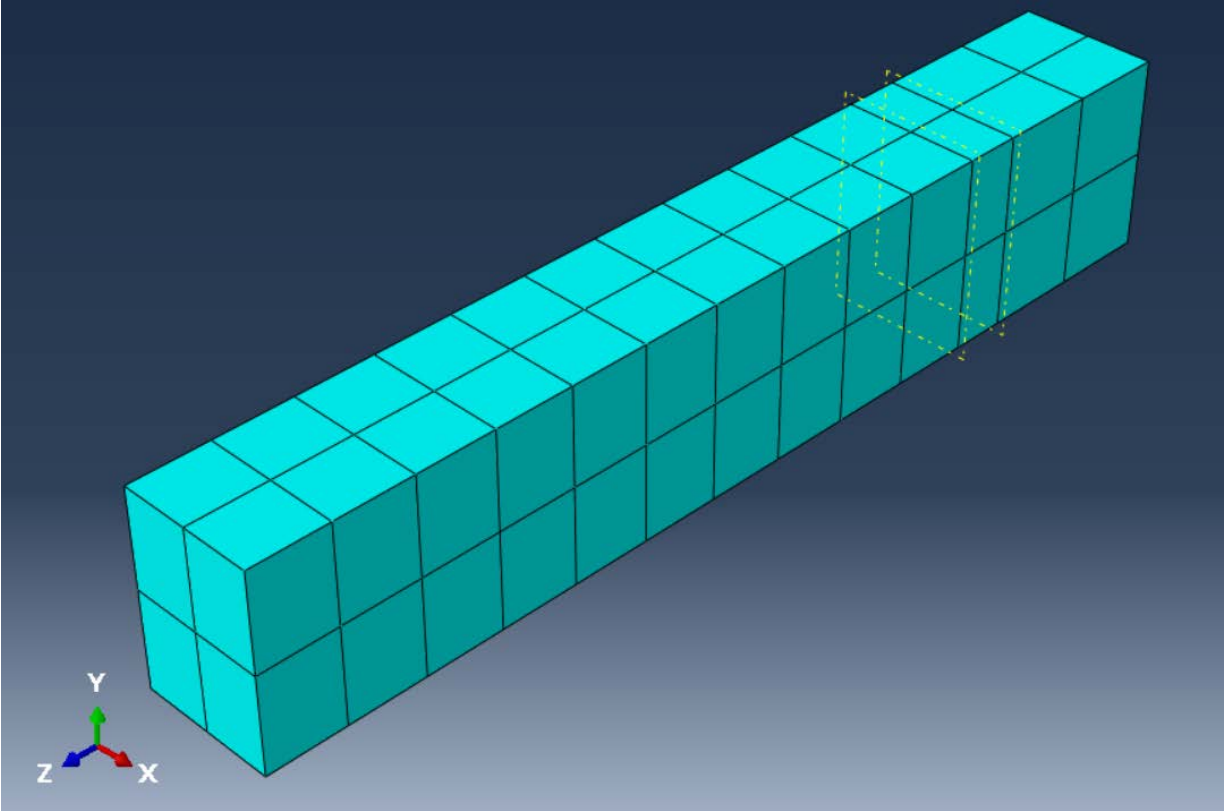
4.8 Ορισμός πλέξης των στοιχείων

Ένα πλέγμα σε ένα μοντέλο αναφέρεται σε μια διάταξη πεπερασμένων στοιχείων. Στο Abaqus παρέχεται η ευελιξία να οριστεί ένα πλέγμα είτε σε ένα μέρος της κατασκευής είτε σε ένα συγκρότημα μελών της. Η πλέξη περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε μια αναπαράσταση πεπερασμένων στοιχείων. Είναι αναγκαίο να γίνεται χρήση ενός επαρκώς εκλεπτυσμένου πλέγματος για να διασφαλίζονται ακριβή αποτελέσματα στην προσομοίωση. Τα χοντρά πλέγματα μπορεί να οδηγήσουν σε ανακρίβειες, ιδιαίτερα σε αναλύσεις που χρησιμοποιούν σιωπηρές ή σαφείς μεθόδους. Η ακαδημαϊκή άδεια του Abaqus που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία δεν επιτρέπει την ανάλυση κατασκευών των οποίων τα πλέγματα συνολικά περιέχουν άνω των χιλίων (1000) τμημάτων.

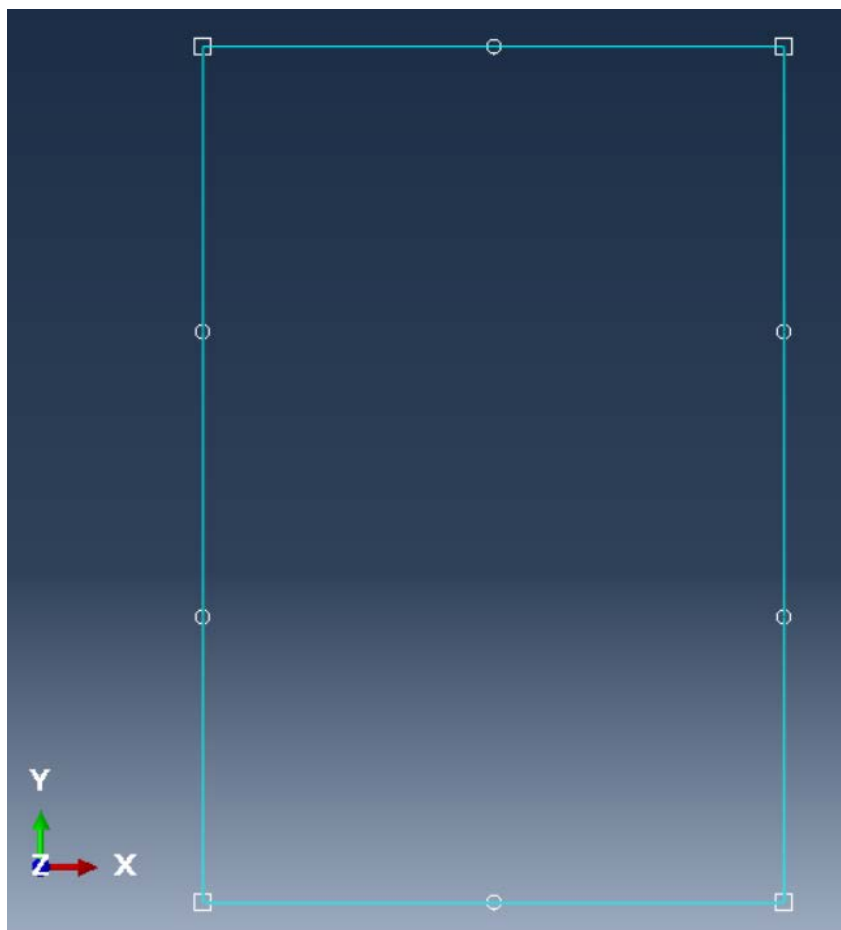
Για την δημιουργία του τελικού πλέγματος είναι αναγκαίο η διαδικασία να γίνει τμηματικά ανά τύπο στοιχείου. Αρχικώς, τα τμήματα δοκού και υποστυλωμάτων υπεβλήθησαν στην δημιουργία πλέγματός τους, με την πλέξη να φέρει διαστάσεις 13x2 ανά πλευρά. Τα υποστυλώματα έφεραν διαστάσεις πλέξης 20x2 ανά πλευρά. Οι πλέξεις αυτές ορίστηκαν δοκιμαστικώς με γνώμονα την επαρκή διακριτοποίηση των τμημάτων με σκοπό την ικανοποιητική ανάλυσή τους, αλλά και τους περιορισμούς που ορίζει η εκπαιδευτική άδεια του προγράμματος. Για τον σπλισμό πλέγματα ορίστηκαν στους τύπους διαμηκών σπλισμών και σπλισμών περισφίξεως που κυμαινόταν περίπου σε 10 υποδιαίρεσεις των ράβδων ανά τύπο.



Εικόνα 4.8.1: Το ορισμένο πλέγμα του υποστυλώματος. Σημειώνονται οι διαστάσεις 20x2 που είναι ίδιες ανά πλευρά για την διατήρηση συνοχής.



Εικόνα 4.8.2: Το ορισμένο πλέγμα της δοκού. Σημειώνονται οι διαστάσεις 13x2 που είναι ίδιες ανά πλευρά για την διατήρηση συνοχής



Εικόνα 4.8.3: Η πλέξη ενός οπλισμού περισφίξεως. Σημειώνονται οι 10 υποδιαιρέσεις του.

4.9 Ανάλυση της κατασκευής

Η ανάλυση μιας κατασκευής στο Abaqus γίνεται μέσω των «εργασιών» (jobs). Τα βήματα για την δημιουργία και υποβολή μιας εργασίας είναι τα εξής:

Αρχικά από την εργαλειοθήκη γίνεται η επιλογή για την δημιουργία μιας νέας εργασίας. Αυτή η ενέργεια θα ανοίξει το παράθυρο διαλόγου Δημιουργία εργασίας. Στη συνέχεια, ο επεξεργαστής εργασιών δίνει την δυνατότητα ορισμού τίτλου εργασίας και περιγραφής των βασικών μηχανισμών της σε ειδικό πλαίσιο. Μετά την ρύθμιση των βασικών παραμέτρων της εργασίας επιλέγεται η εντολή «υποβολή» (submit) για να ξεκινήσει η ανάλυση. Για την παρακολούθηση της προόδου αναλύσεως, μπορεί να γίνει χρήση του παραθύρου διαλόγου με το όνομα της εργασίας στη γραμμή τίτλου, όπου ένα γράφημα κατάστασης που απεικονίζει την πρόοδο της ανάλυσης. Καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, απαιτείται παρακολούθηση το κάτω πλαίσιο του πλαισίου διαλόγου για τυχόν μηνύματα προειδοποιήσεων ή σφαλμάτων. Όταν η εργασία ολοκληρωθεί επιτυχώς, η κατάσταση της εργασίας στο παράθυρο διαλόγου

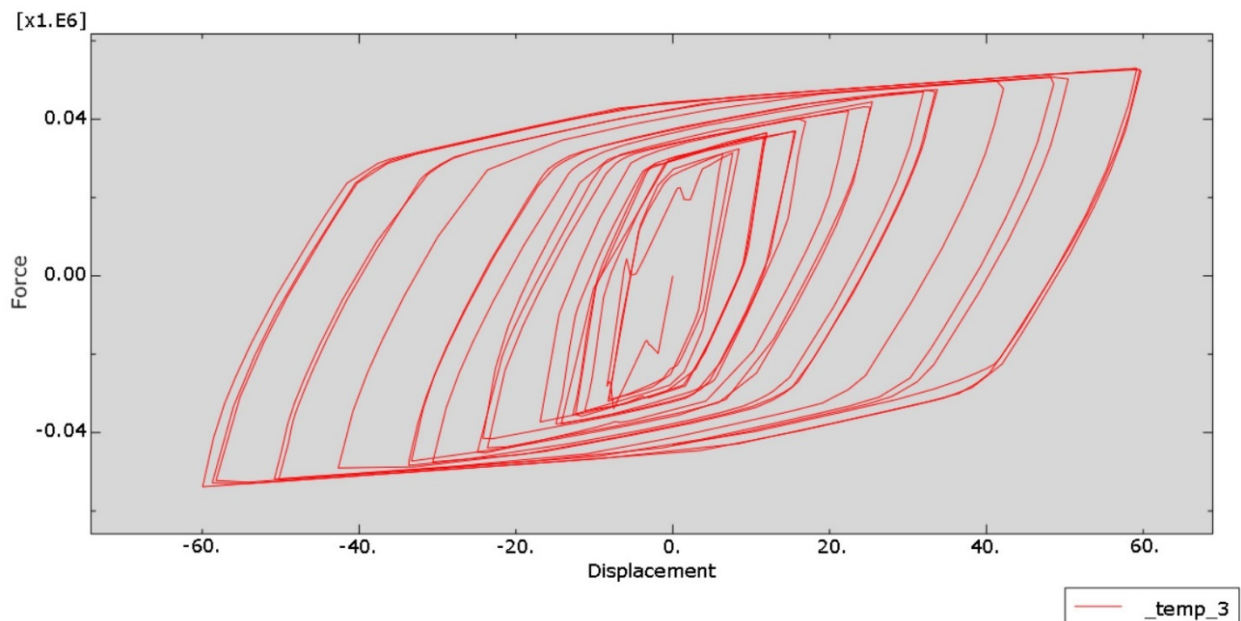
θα αλλάξει σε «ολοκληρώθηκε» (completed). Σε αυτό το σημείο, τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να παρουσιαστούν με την επιλογή του στοιχείου «οπτικοποίηση» (visualization), όπου το πρόγραμμα θα ανοίξει τη βάση δεδομένων εξόδου που δημιουργείται από την εργασία και θα παρουσιάσει το μη παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου της ανάλυσης.

5. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από τα τρία δοκίμια αφορούν την αντοχή του σκυροδέματος, την αντοχή του οπλισμού και των ενισχύσεων εσωτερικά και τις παραμορφώσεις που προκλήθηκαν από την φόρτιση. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν παρακάτω με τα πραγματικά αποτελέσματα που είναι δοσμένα από το πείραμα αναφοράς και θα γίνει γενικότερη ανάλυση της αξιοπιστίας τους.

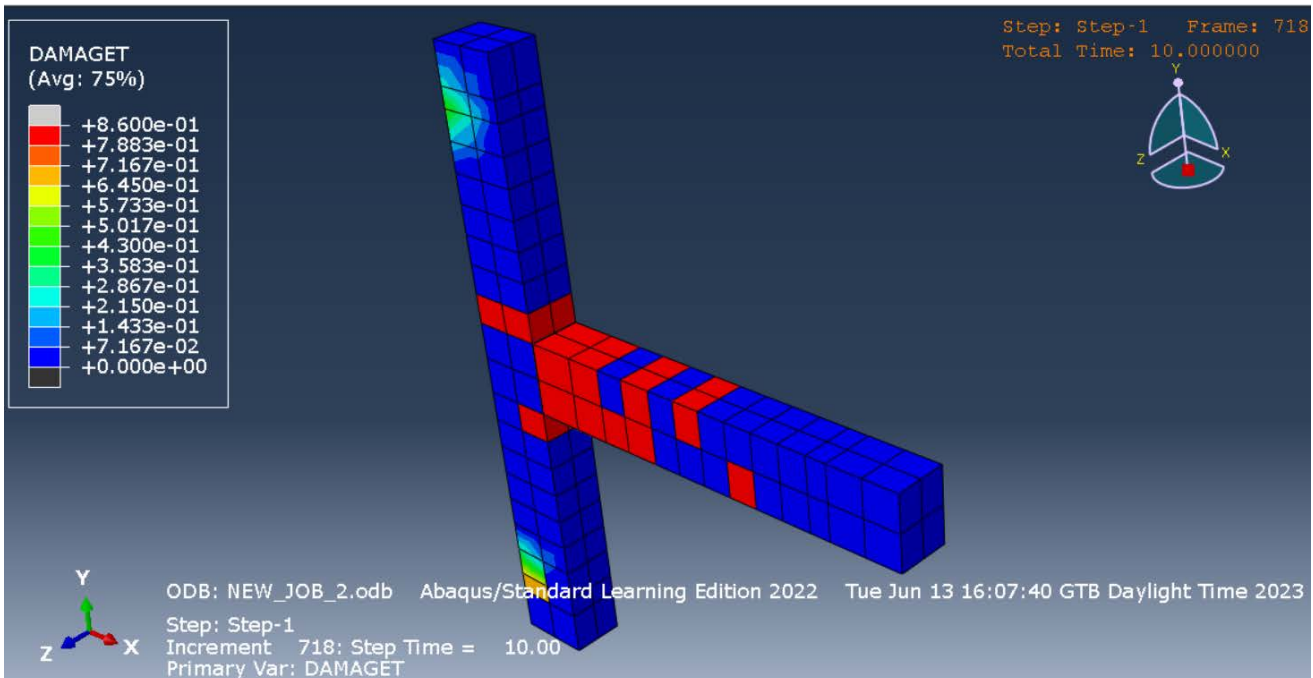
5.1 Δοκίμιο JBOV

Το βασικό δεδομένο της ανάλυσης είναι το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων που προκύπτει για το δοκίμιο ελέγχου. Η ανάλυση του προγράμματος έδειξε η μέγιστη ασκούμενη δύναμη ήταν 57.95 KN και η μέγιστη μετατόπιση ήταν 60 mm για το σημείο αναφοράς. Η βασική παρατήρηση από το αποτέλεσμα είναι ότι το δοκίμιο αναλύεται να έχει ελαστική συμπεριφορά.

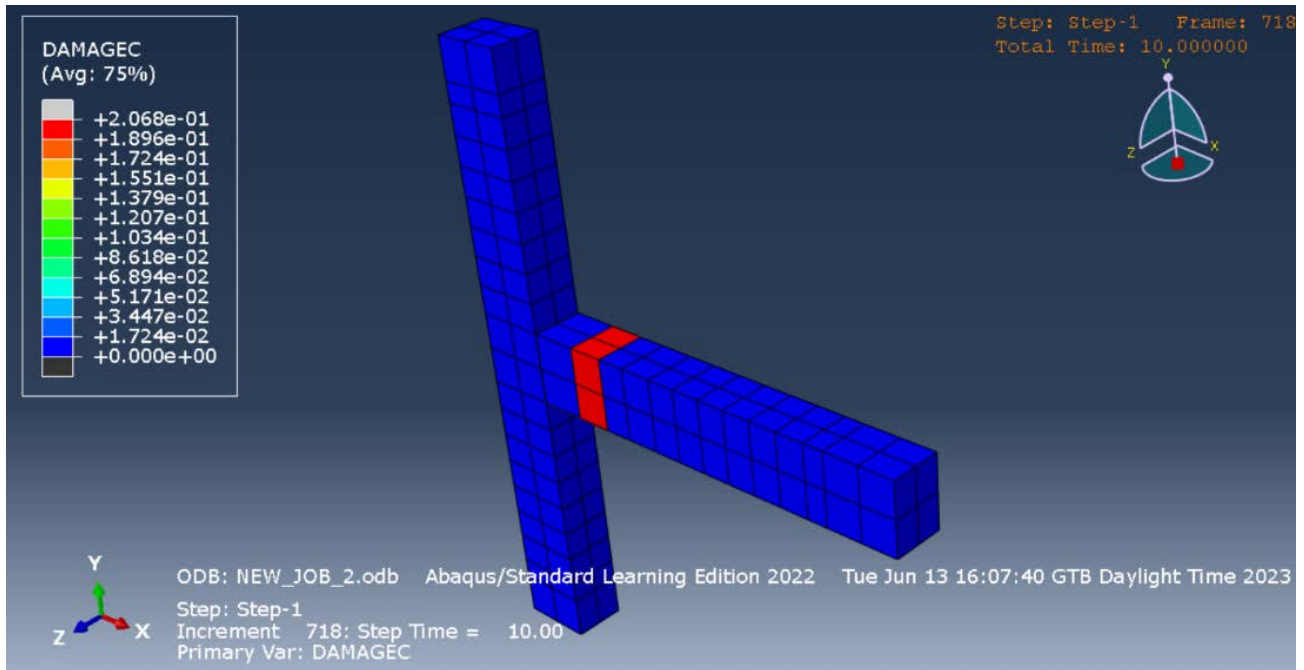


Εικόνα 7.1.1: Το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων του δοκίμιου JBOV. Σημειώνεται η ελαστική συμπεριφορά που εκδηλώνει με βάση το Abaqus.

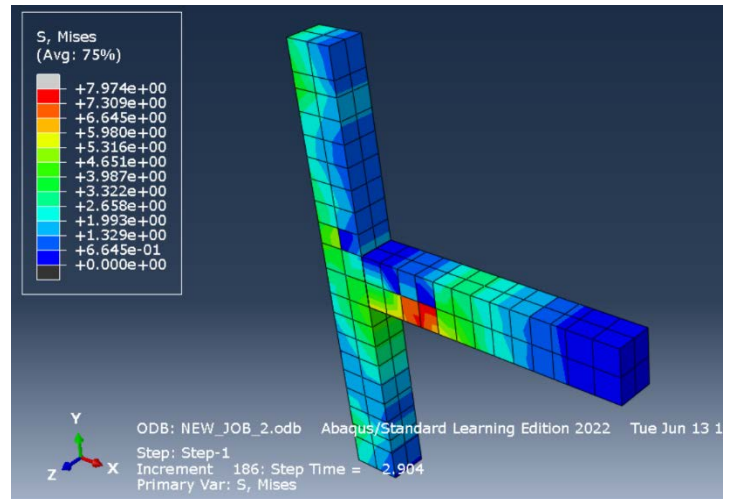
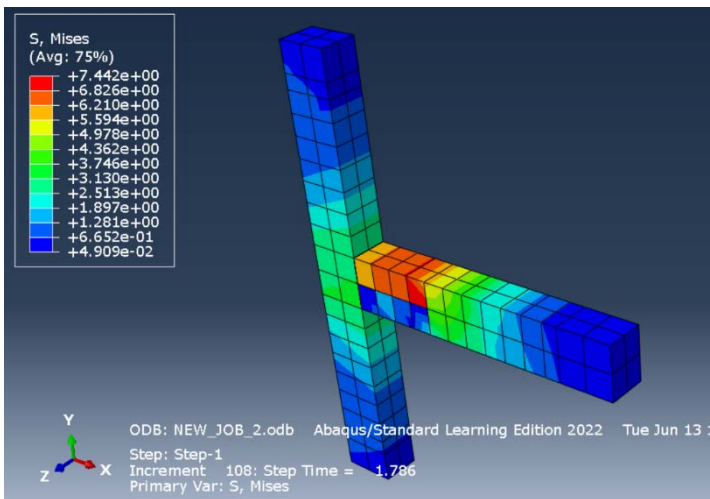
Στην συνέχεια η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπόνησης του δοκιμίου δίνει πληροφορίες για την αντοχή του δείγματος και την δυνατότητα της επισκόπησης τμημάτων που μπορούν να εμφανίσουν ρωγμές. Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής καταπόνησης του δοκιμίου έδειξε ότι καταπονήσεις λόγω εφελκυστικών τάσεων προκύπτουν σχεδόν κατευθείαν στην κυκλική φόρτιση με τα πιο κρίσιμα σημεία να είναι η περιοχή της δοκού που εφάπτεται στο υποστύλωμα και εκτείνεται σχεδόν στο 1/3 του συνολικού μήκους της δοκού. Στο υποστύλωμα υπάρχουν σημεία που υποδεικνύονται ως κρίσιμα από μεριάς εφελκυστικής καταπονήσεως και είναι οι περιοχές πέριξ του κόμβου συνδέσεως, δίχως όμως να εκτείνονται σε μεγάλη απόσταση από αυτόν. Η απεικόνιση της θλιπτικής καταπονήσεως έδειξε ότι η δοκός φέρει αποκλειστικά θλιπτικές καταπονήσεις μεγάλης φύσεως κυρίως στο τμήμα ενώσεως με τον κόμβο κοντά στην εξώτερη επιφάνεια του σκυροδέματος, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι οι ίνες της δοκού θλίβονται και εφελκύνονται περιοδικά ανάλογα με την κατεύθυνση της κυψέλης ασκήσεως του παραμορφωσιακού φορτίου. Δεν υπήρξε θλιπτική καταπόνηση στο υποστύλωμα από το σταθερό φορτίο που ασκούνταν αξονικά και αυτό είναι αναμενόμενο αφού τα υποστυλώματα είναι κατασκευασμένα ακριβώς για την ανάληψη τέτοιου είδους φορτίων. Στην τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπόνησης Von Mises παρατηρείται η εναλλαγή έντασης ανά μεριά που οφείλεται στα εναλλασσόμενα φορτία. Σημειώνεται οι η συγκέντρωση της εντάσεως συγκεντρώνεται στο 1/3 της δοκού από την μεριά επαφής με το υποστύλωμα. Ο σπλισμός εσωτερικά παρουσιάζει καταπόνηση στις διαμήκεις ράβδους της δοκού στο μήκος που αντιστοιχεί με την περιοχή του σκυροδέματος που εντείνεται επίσης. Μια πολύ χρήσιμη απεικόνιση είναι αυτή της αρχής μέγιστης κύριας έντασης (maximum principal stress) που υποδεικνύει τα σημεία στα οποία η ένταση υπερβαίνει της αντοχής εφελκυσμού και άρα είναι πιθανή η αστοχία. Η απεικόνιση αυτή δείχνει αναμενόμενα ότι η περιοχή της δοκού γύρω από τον κόμβο είναι επιρρεπής σε αστοχία, όμως δεν υπάρχει υπόδειξη για πρόκληση αστοχιών στο υποστύλωμα.



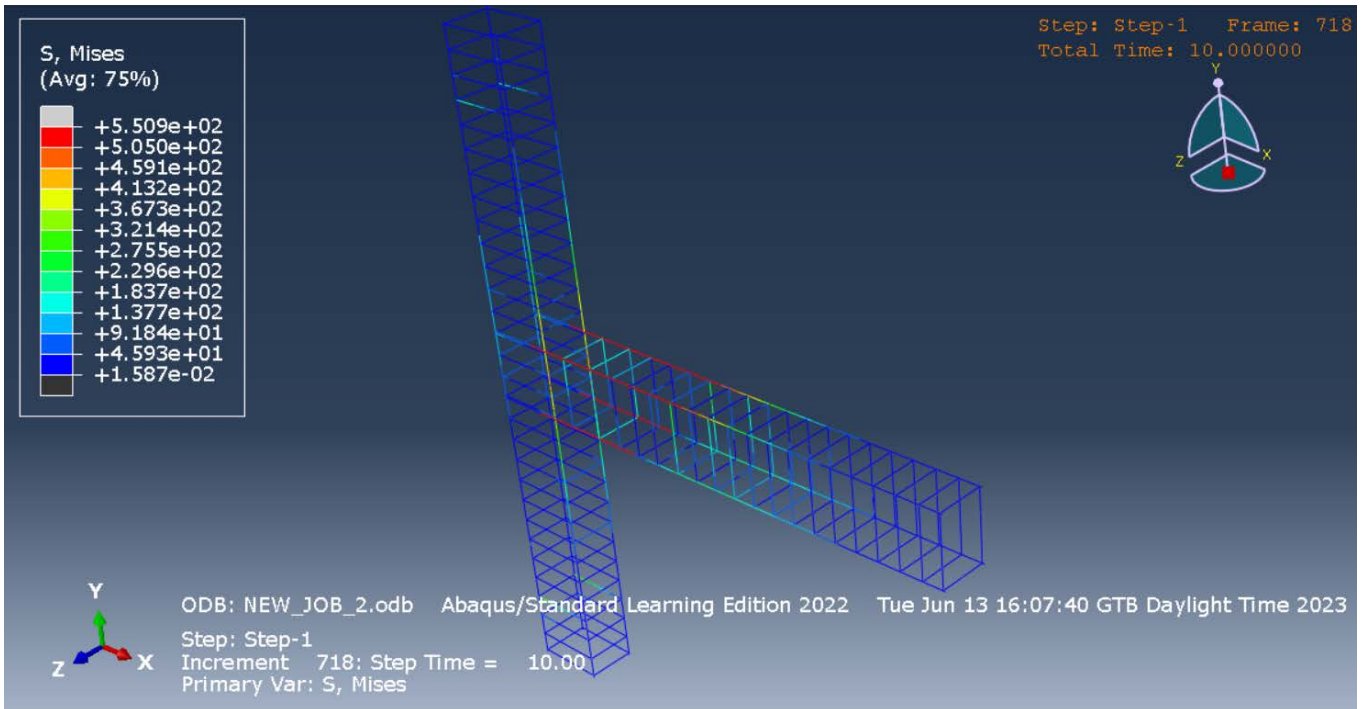
Εικόνα 5.1.2: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής εντάσεως του δοκιμίου JBOV. Σημειώνεται η περιοχή της δοκού γύρω από τον κόμβο που φέρει τη μεγαλύτερη καταπόνηση.



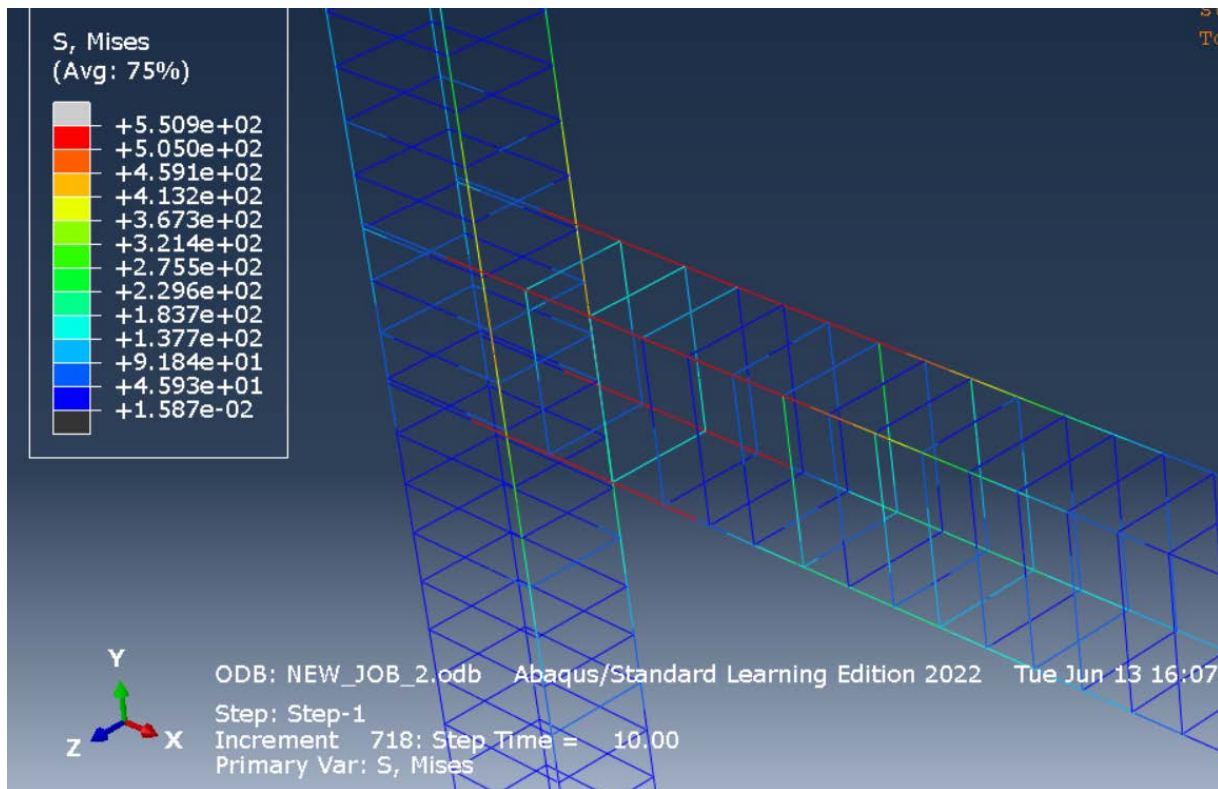
Εικόνα: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της θλιπτικής εντάσεως του δοκιμίου JBOV. Σημειώνεται η περιοχή της δοκού γύρω από τον κόμβο που φέρει τη μεγαλύτερη καταπόνηση.



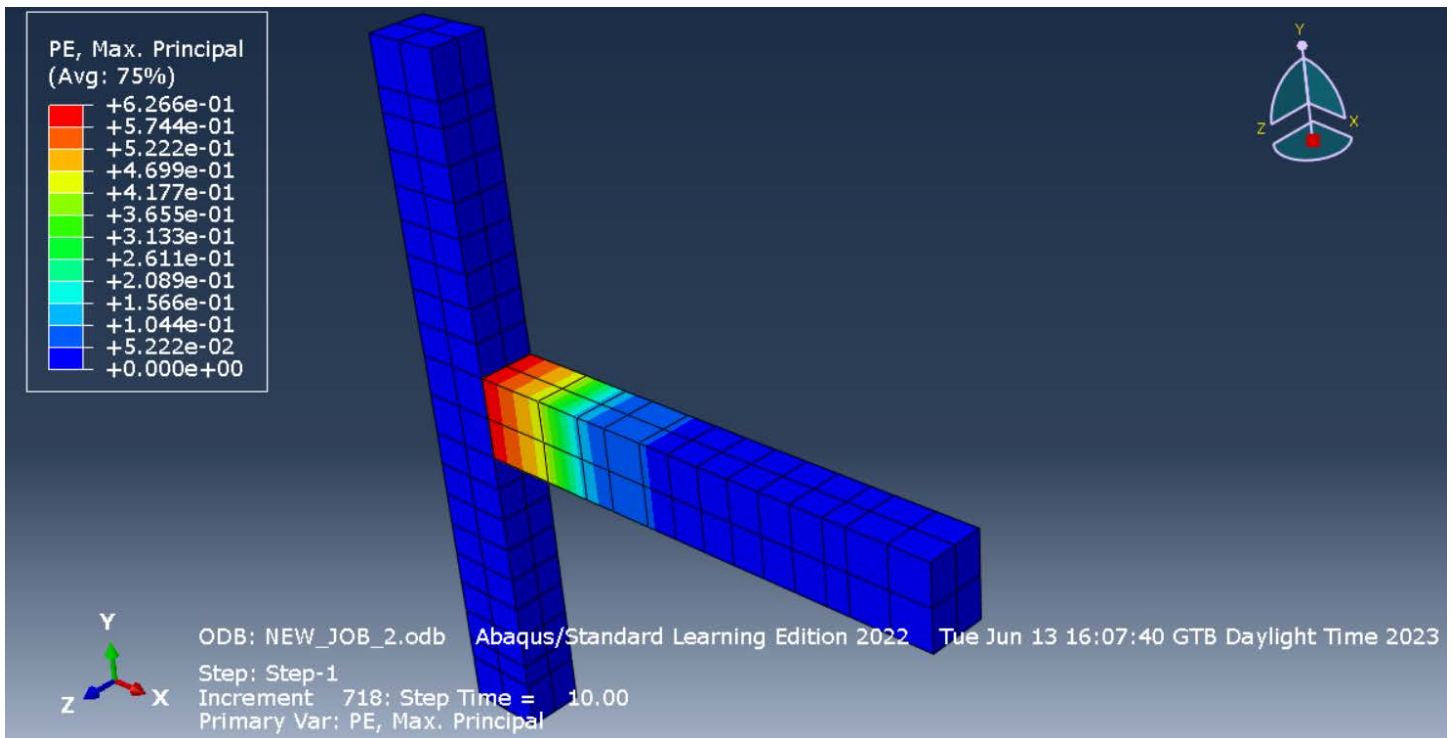
Εικόνα 5.1.3: Στιγμιότυπα της τρισδιάστατης απεικόνιση της εντάσεως του δοκιμίου JBOV κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της κυκλικής φορτίσεως. Σημειώνονται οι εναλλαγές στην ένταση που έχουν να κάνουν με τις ίνες του σκυροδέματος που αναλόγως της κατευθύνσεως του φορτίου θλίβονται ή εφελκύνονται.



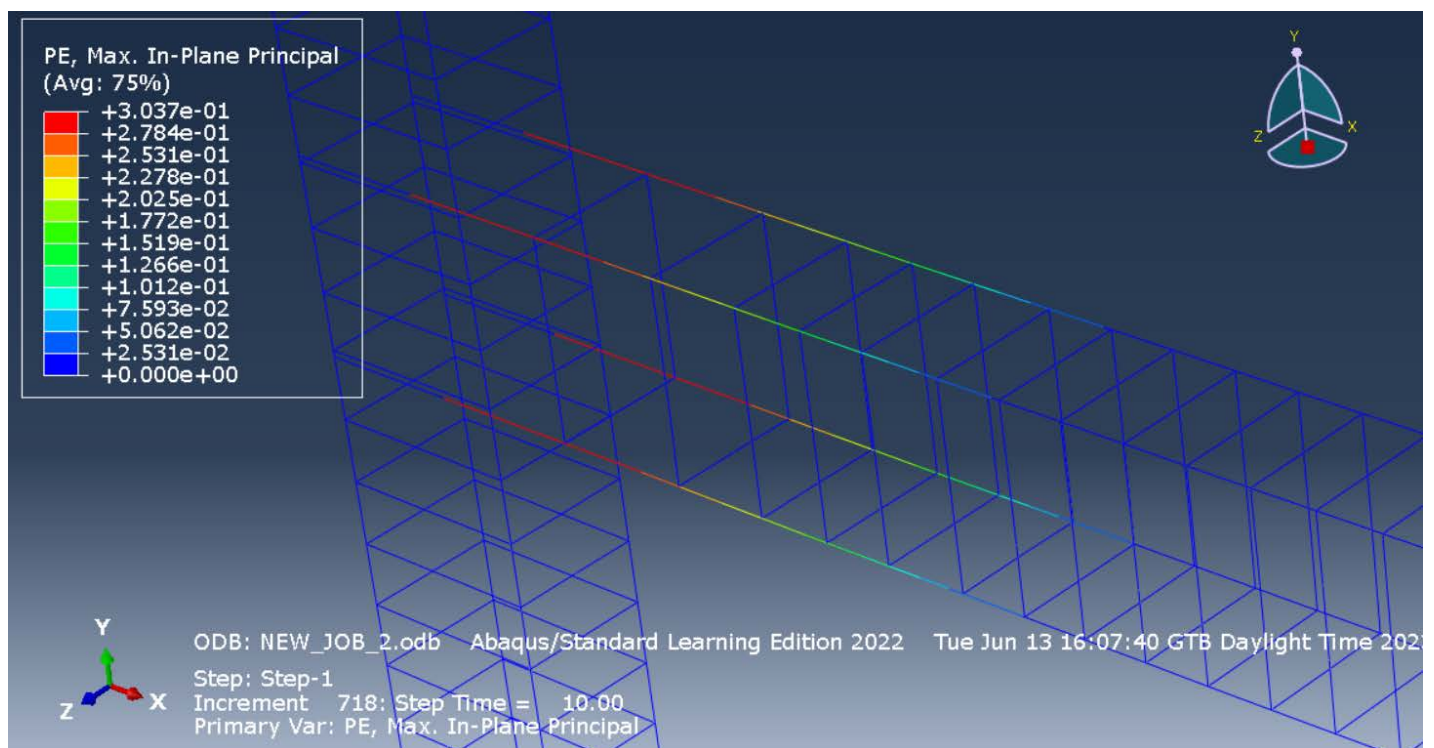
Εικόνα 5.1.4: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπόνησης του οπλισμού κατά Von Mises. Σημειώνονται τα τμήματα των διαμηκών ράβδων της δοκού αντιστοιχούν με τα ίδια τμήματα του σκυροδέματος που υφίστανται καταπόνηση.



Εικόνα 5.1.5: Λεπτομέρεια της τρισδιάστατης απεικόνισης της καταπόνησης του οπλισμού κατά Von Mises



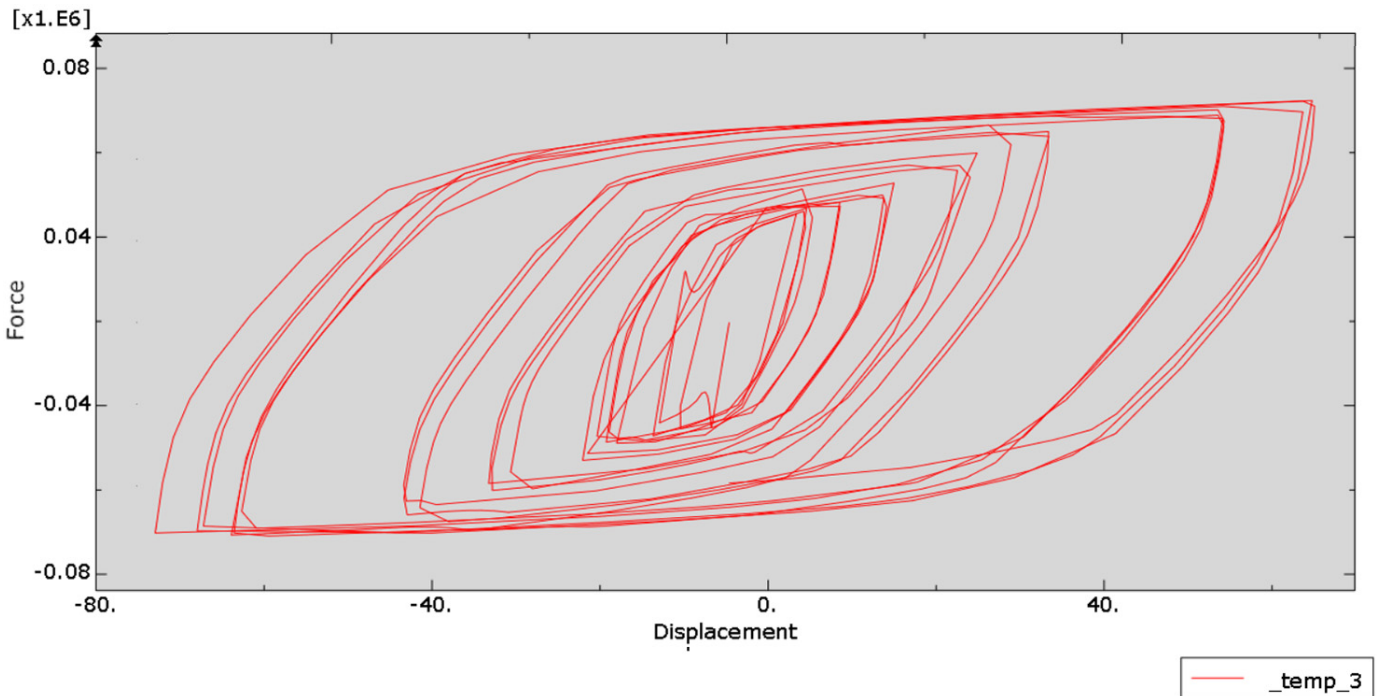
Εικόνα 5.1.8: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης που δείχνει που είναι πιθανότερη η εμφάνιση αστοχιών.



Εικόνα 5.1.7: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης του σπλισμού που δείχνει που είναι πιθανό να διαρρεύσει ο σπλισμός με βάση την αρχή.

5.2 Δοκίμιο JBOR

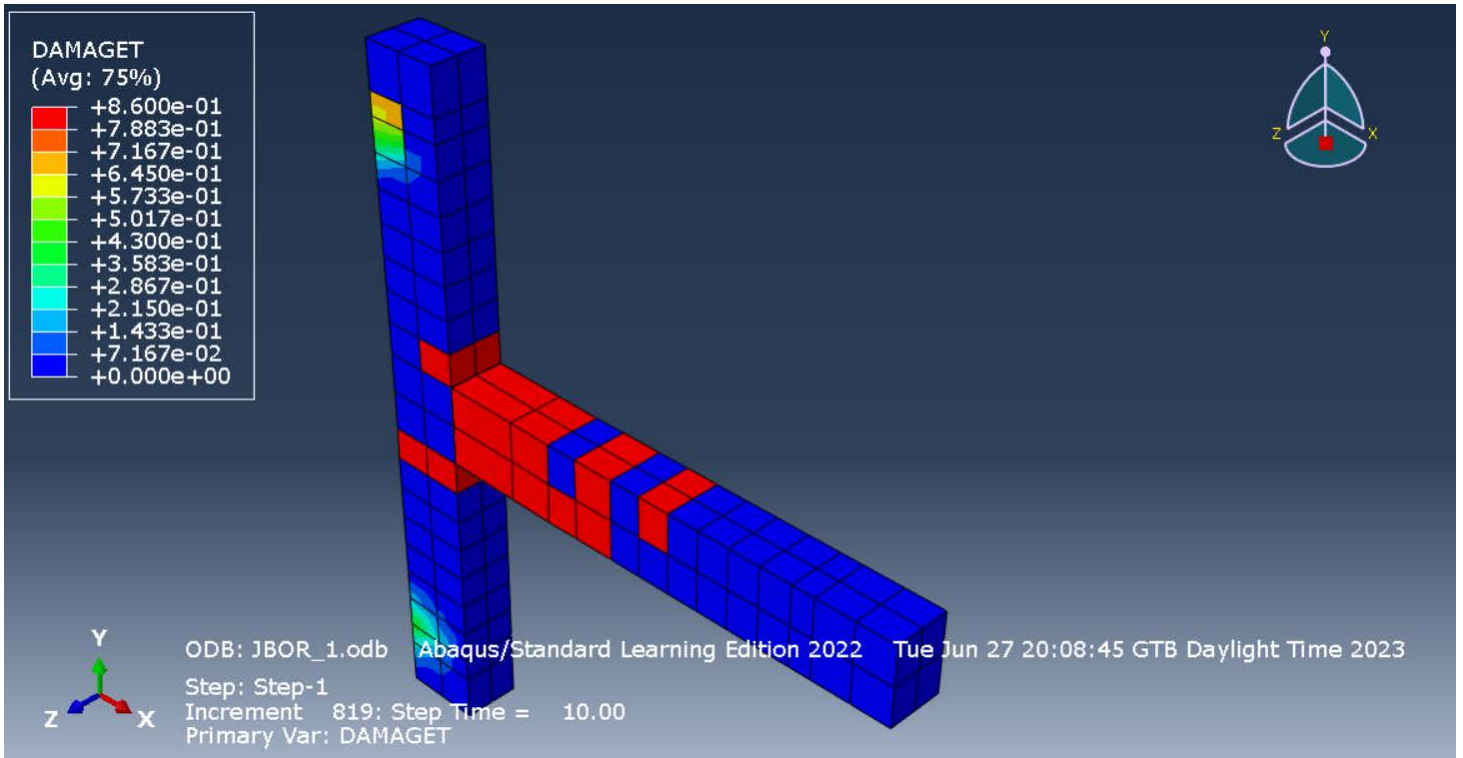
Το δοκίμιο JBOR ήταν ενισχυμένο με 4 ράβδους στην περιοχή του κόμβου με την μέθοδο BE. Η ανάλυση του προγράμματος έδειξε η μέγιστη ασκούμενη δύναμη ήταν 63.03 KN και η μέγιστη μετατόπιση ήταν 72 mm για το σημείο αναφοράς. Η βασική παρατήρηση από το αποτέλεσμα είναι ότι το δοκίμιο αναλύεται να έχει ελαστική συμπεριφορά.



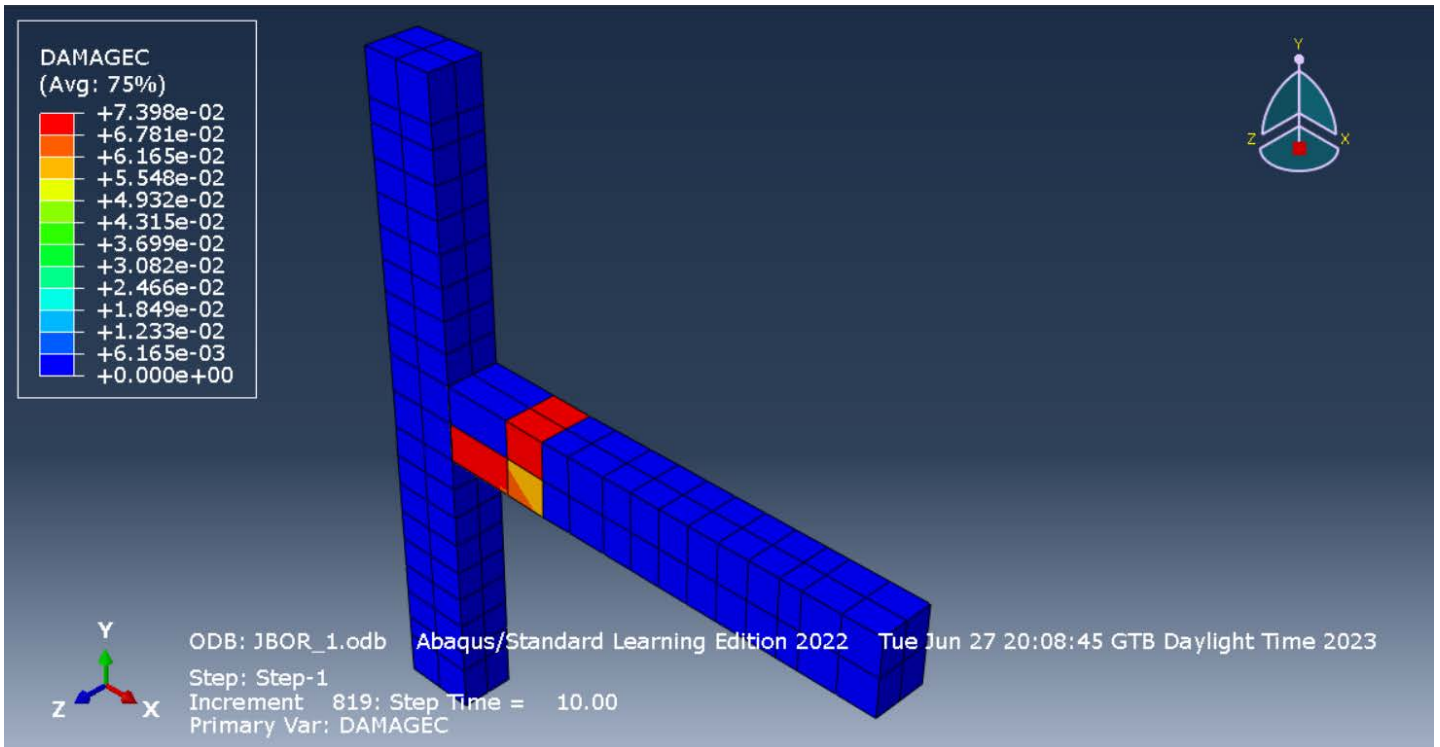
Εικόνα 5.2.1: Το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων του δοκιμίου JBOR. Σημειώνεται η ελαστική συμπεριφορά που εκδηλώνεται και σε αυτό το δείγμα με βάση το Abaqus.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής καταπόνησης του δοκιμίου έδειξε ότι καταπονήσεις λόγω εφελκυστικών τάσεων προκύπτουν αργότερα στην κυκλική φόρτιση με τα πιο κρίσιμα σημεία να είναι πάλι η περιοχή της δοκού που εφάπτεται στο υποστύλωμα και εκτείνεται σχεδόν στο 1/3 του συνολικού μήκους της δοκού. Η απεικόνιση της θλιπτικής καταπόνησης έδειξε ότι η δοκός φέρει θλιπτικές καταπονήσεις στο κάτω τμήμα ενώσεως με τον κόμβο κοντά στην εξώτερη επιφάνεια του σκυροδέματος, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι οι ίνες της δοκού θλίβονται και εφελκύνονται περιοδικά ανάλογα με την κατεύθυνση της κυψέλης ασκήσεως του παραμορφωσιακού φορτίου. Δεν υπήρξε θλιπτική καταπόνηση στο υποστύλωμα από το σταθερό φορτίο που ασκούνταν. Στην τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπόνησης Von Mises παρατηρείται ξανά εναλλαγή έντασης ανά μεριά που οφείλεται στα εναλλασσόμενα φορτία. Σημειώνεται οι η συγκέντρωση της εντάσεως συγκεντρώνεται στο 1/3 της δοκού από την μεριά επαφής με το υποστύλωμα. Ο οπλισμός εσωτερικά παρουσιάζει αυξημένη αντοχή στις διαμήκεις ράβδους της δοκού στο μήκος που αντιστοιχεί με την περιοχή του σκυροδέματος που

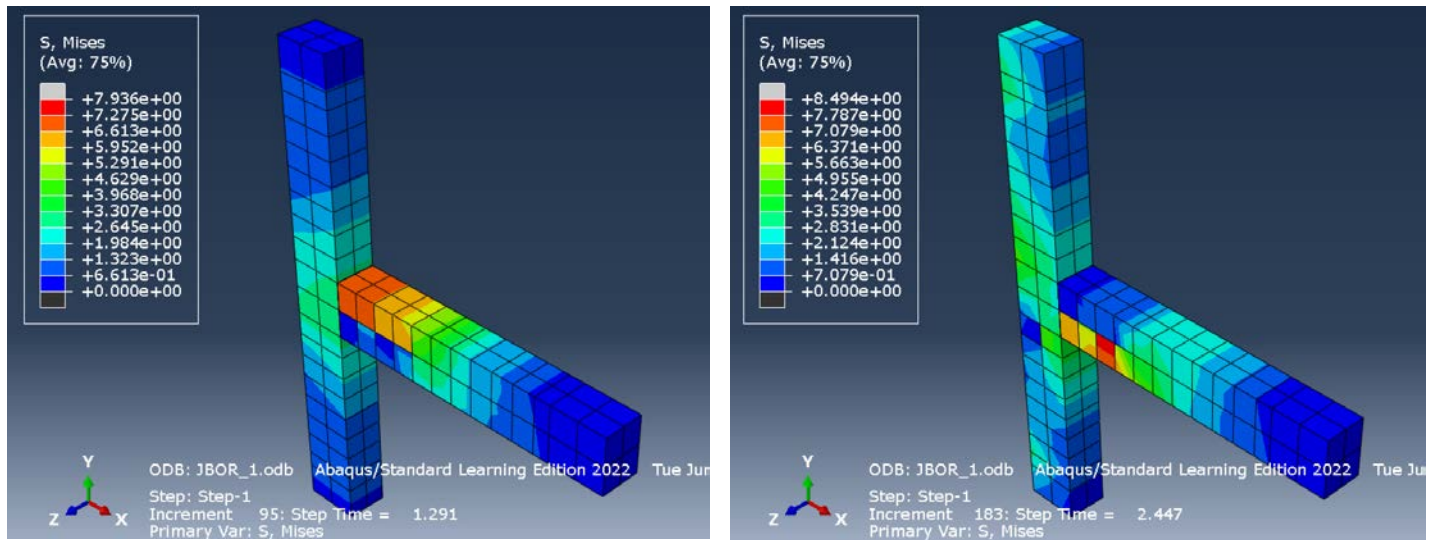
εντείνεται επίσης. Στην απεικόνιση αρχής μέγιστης κύριας έντασης (maximum principal stress) φαίνεται αναμενόμενα ότι η περιοχή της δοκού γύρω από τον κόμβο είναι επιρρεπής σε αστοχία, όμως δεν υπάρχει υπόδειξη για πρόκληση αστοχιών στο υποστυλώμα.



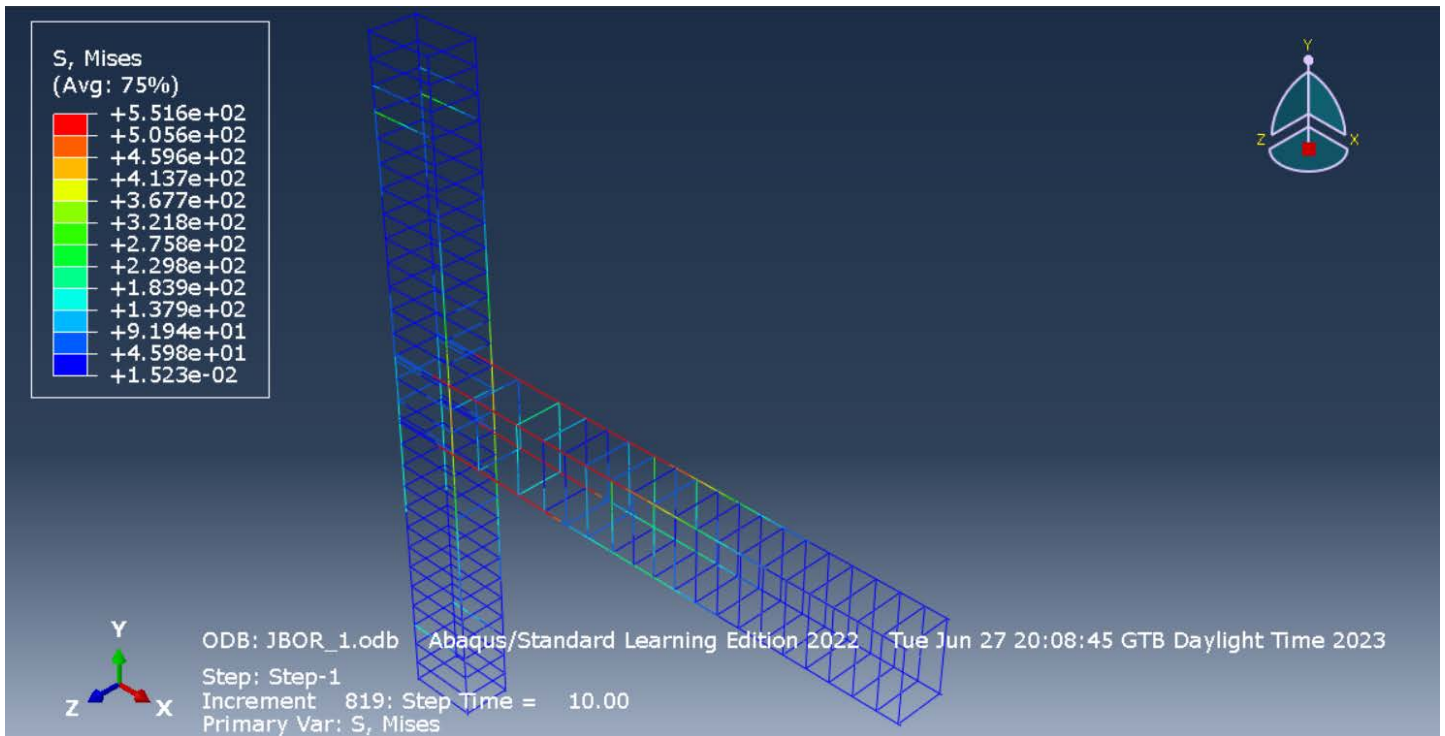
Εικόνα 5.2.2: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής εντάσεως του δοκιμίου JBOR.



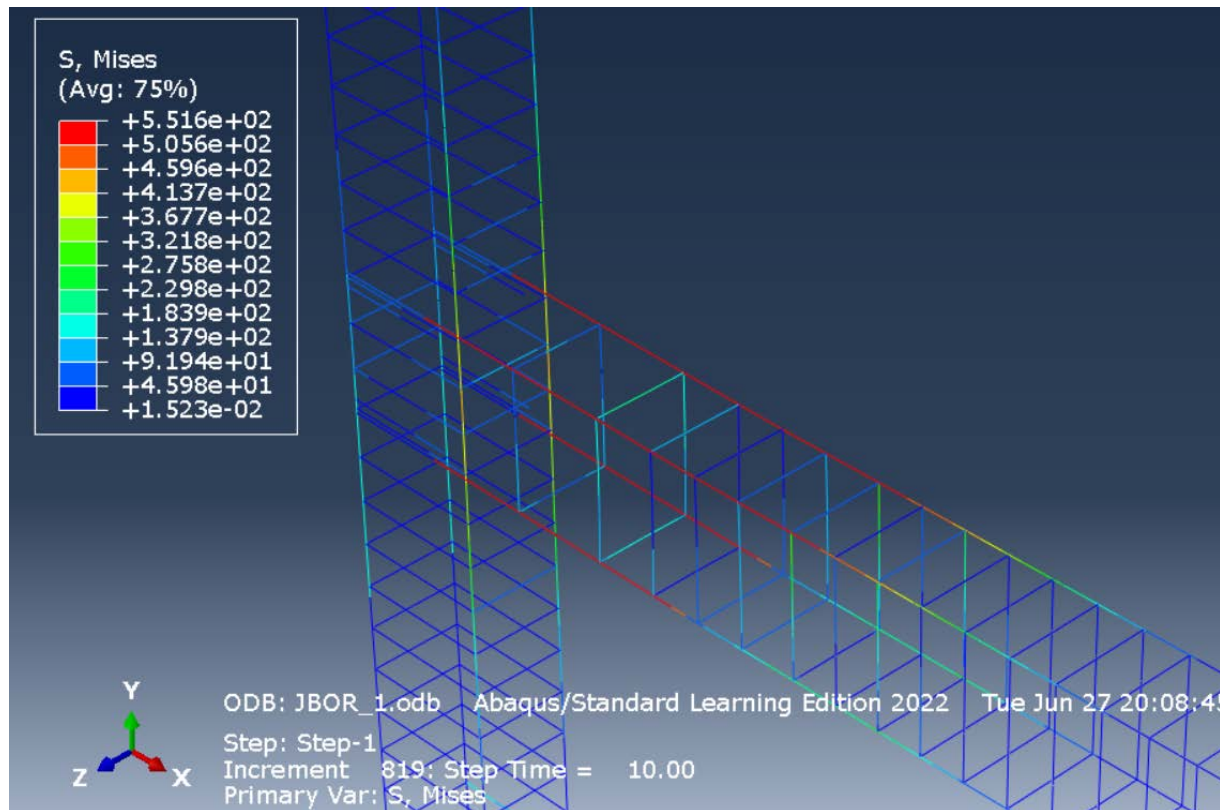
Εικόνα 5.2.3: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της θλιπτικής εντάσεως του δοκιμίου JBOR.



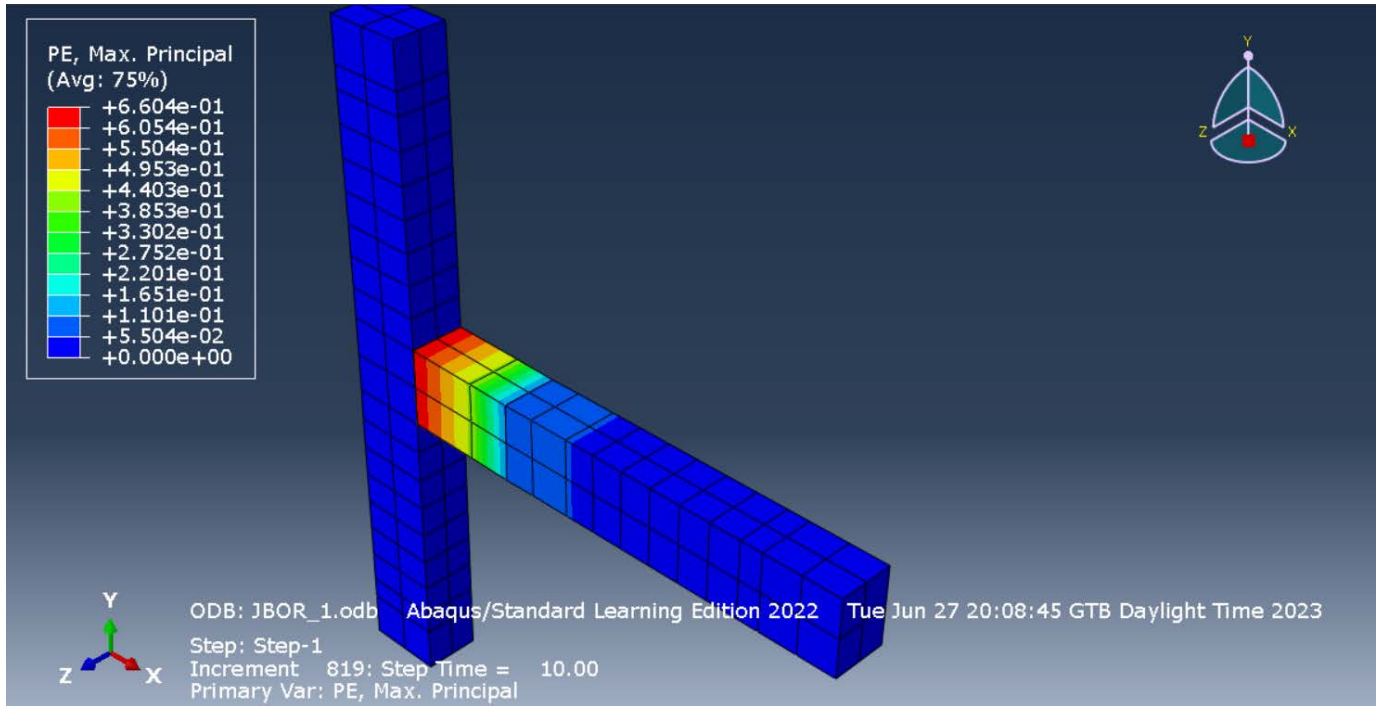
Εικόνα 5.2.4: Στιγμιότυπα της τρισδιάστατης απεικόνιση της εντάσεως του δοκιμίου JBOR κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της κυκλικής φορτίσεως.



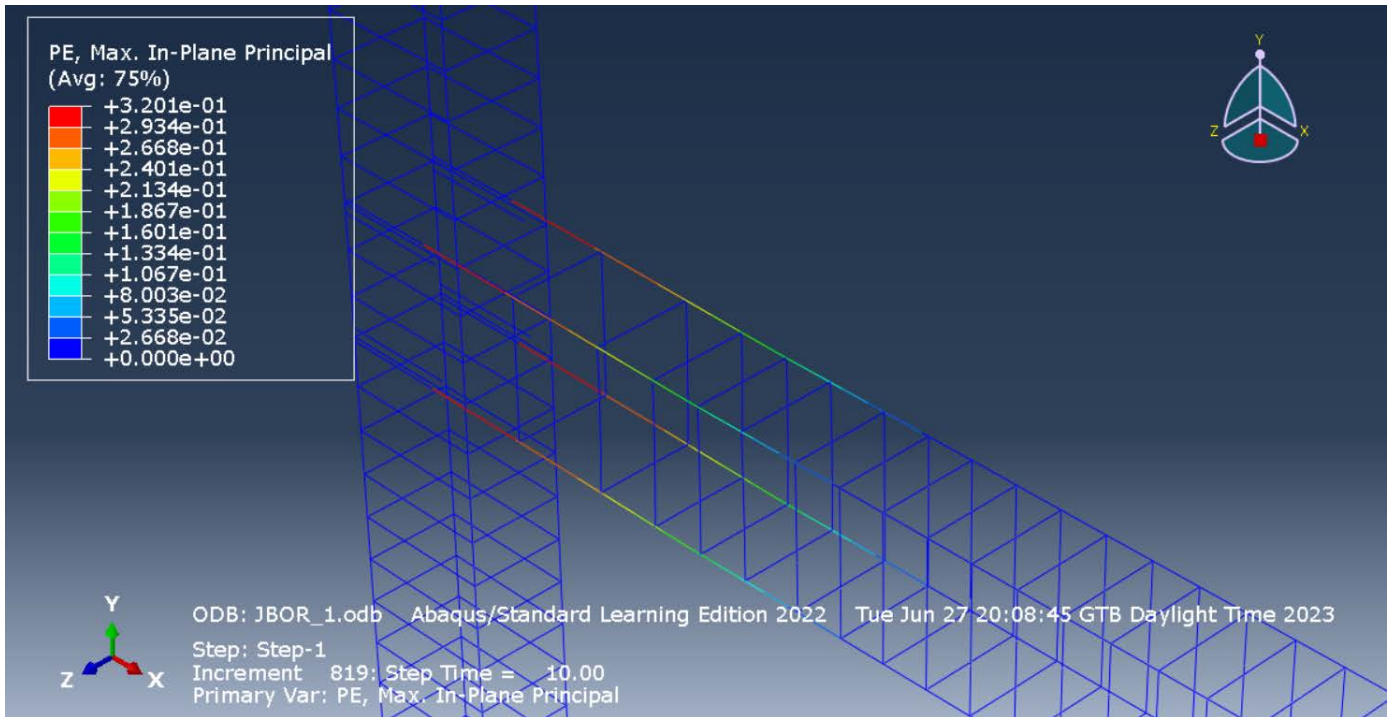
Εικόνα 5.2.5: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπόνησης του σπλισμού κατά Von Mises.



Εικόνα: Λεπτομέρεια της τρισδιάστατης απεικόνισης της καταπόνησως του οπλισμού κατά Von Mises.



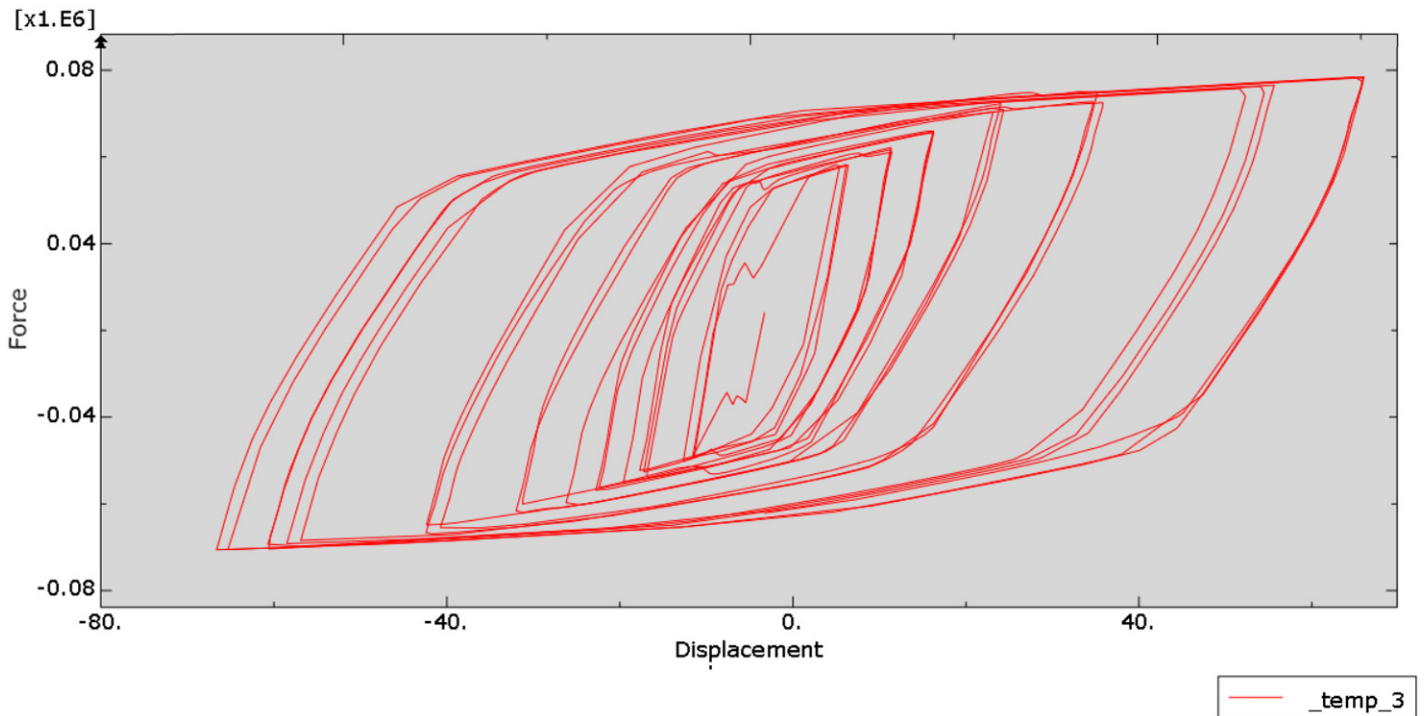
Εικόνα 5.2.6: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης που δείχνει που είναι πιθανότερη η εμφάνιση αστοχιών.



Εικόνα 5.2.7: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης του σπλισμού που δείχνει που είναι πιθανό να διαρρέψει ο σπλισμός με βάση την αρχή.

5.3 Δοκίμιο JBOVFX

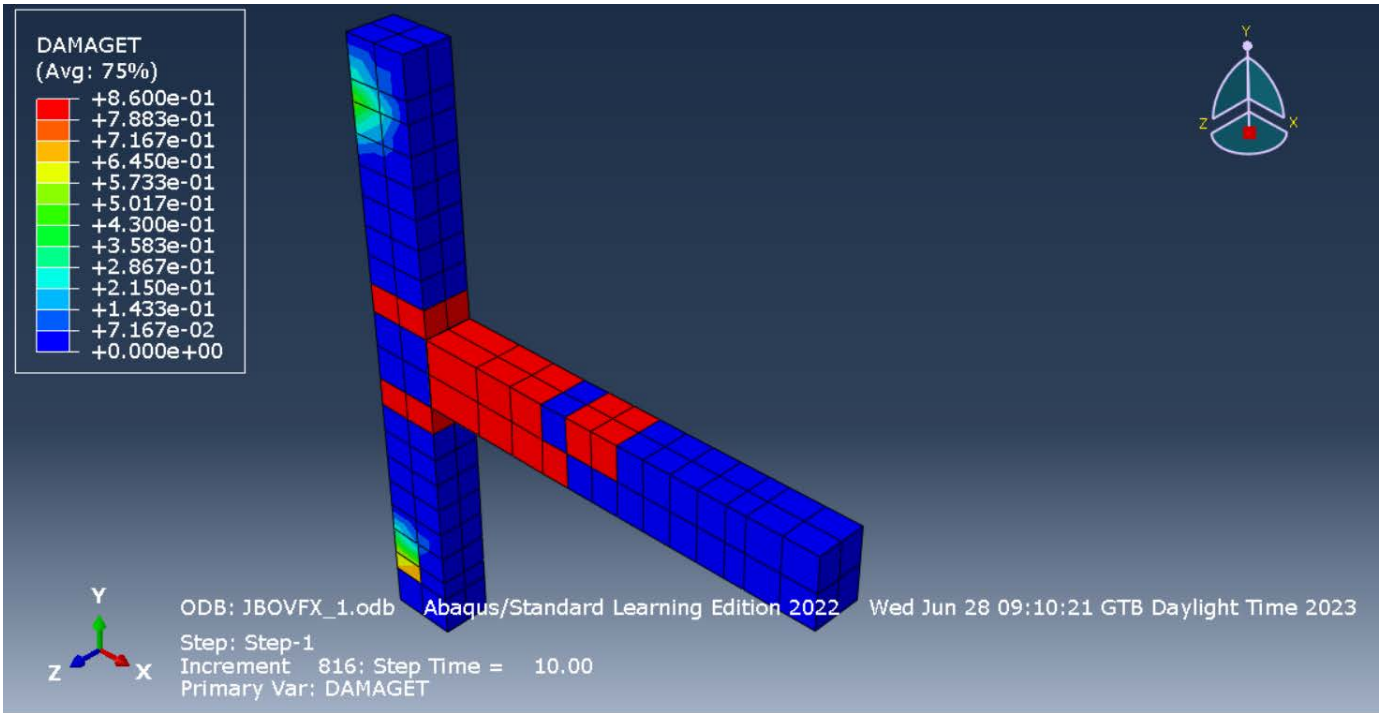
Το δείγμα JBOVFX έφερε δύο ράβδους από CFRP διαγώνια στον πυρήνα του κόμβου. Η ανάλυση του προγράμματος έδειξε η μέγιστη ασκούμενη δύναμη ήταν 70.03 KN και η μέγιστη μετατόπιση ήταν 74 mm για το σημείο αναφοράς. Ομοίως με τα προηγούμενα δείγματα, η βασική παρατήρηση από το αποτέλεσμα είναι ότι το δοκίμιο αναλύεται να έχει ελαστική συμπεριφορά.



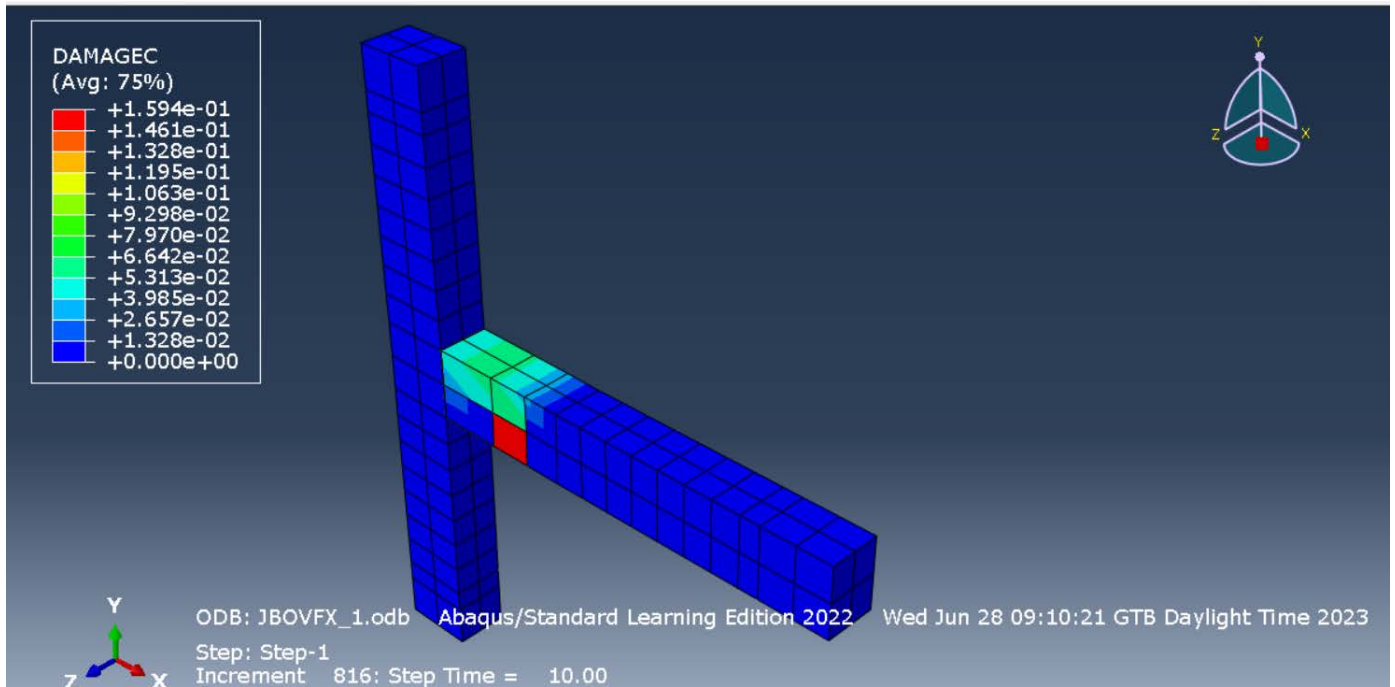
Εικόνα 5.3.1: Το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων του δοκιμίου JBOVFX.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής καταπόνησης του δοκιμίου έδειξε ότι καταπονήσεις λόγω εφελκυστικών τάσεων αρχίζουν να εμφανίζονται στο πρώτο ¼ της κυκλικής φορτίσεως και φθάνουν στην μέγιστη έκτασή τους περίπου στο μέσον της φόρτισης, με τα πιο κρίσιμα σημεία να είναι πάλι η περιοχή της δοκού που εφάπτεται στο υποστύλωμα και εκτείνεται σχεδόν στο 1/3 του συνολικού μήκους της δοκού. Η απεικόνιση της θλιπτικής καταπόνησεως έδειξε ότι η δοκός φέρει ελάχιστες θλιπτικές καταπονήσεις που βρίσκονται μόνο στο κάτω τμήμα ενώσεως με τον κόμβο κοντά στην εξώτερη επιφάνεια του σκυροδέματος. Δεν υπήρξε θλιπτική καταπόνηση στο υποστύλωμα από το σταθερό φορτίο που ασκούνταν. Στην τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπόνησης Von Mises παρατηρείται εναλλαγή μειωμένης έντασης ανά μεριά που οφείλεται στα εναλλασσόμενα φορτία. Σημειώνεται οι η συγκέντρωση της εντάσεως συγκεντρώνεται στο 1/3 της δοκού από την μεριά επαφής με το υποστύλωμα. Ο σπλισμός εσωτερικά παρουσιάζει αυξημένη αντοχή στις διαμήκεις ράβδους της δοκού στο μήκος που αντιστοιχεί με την περιοχή του σκυροδέματος που εντείνεται επίσης. Στην απεικόνιση αρχής μέγιστης κύριας έντασης (maximum principal stress) φαίνεται αναμενόμενα ότι η περιοχή της

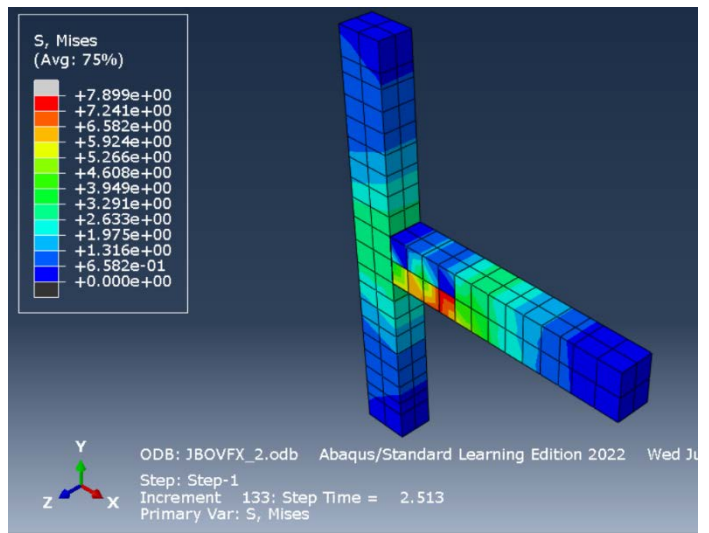
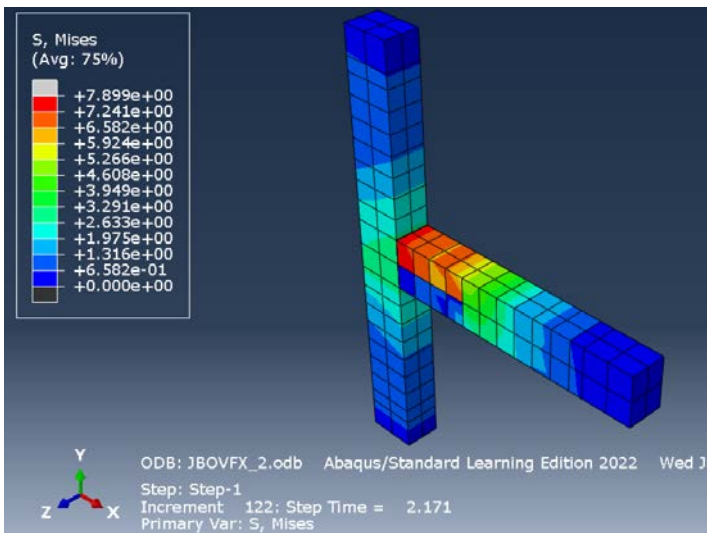
δοκού γύρω από τον κόμβο είναι επιρρεπής σε αστοχία, όμως δεν υπάρχει υπόδειξη για πρόκληση αστοχιών στο υποστύλωμα.



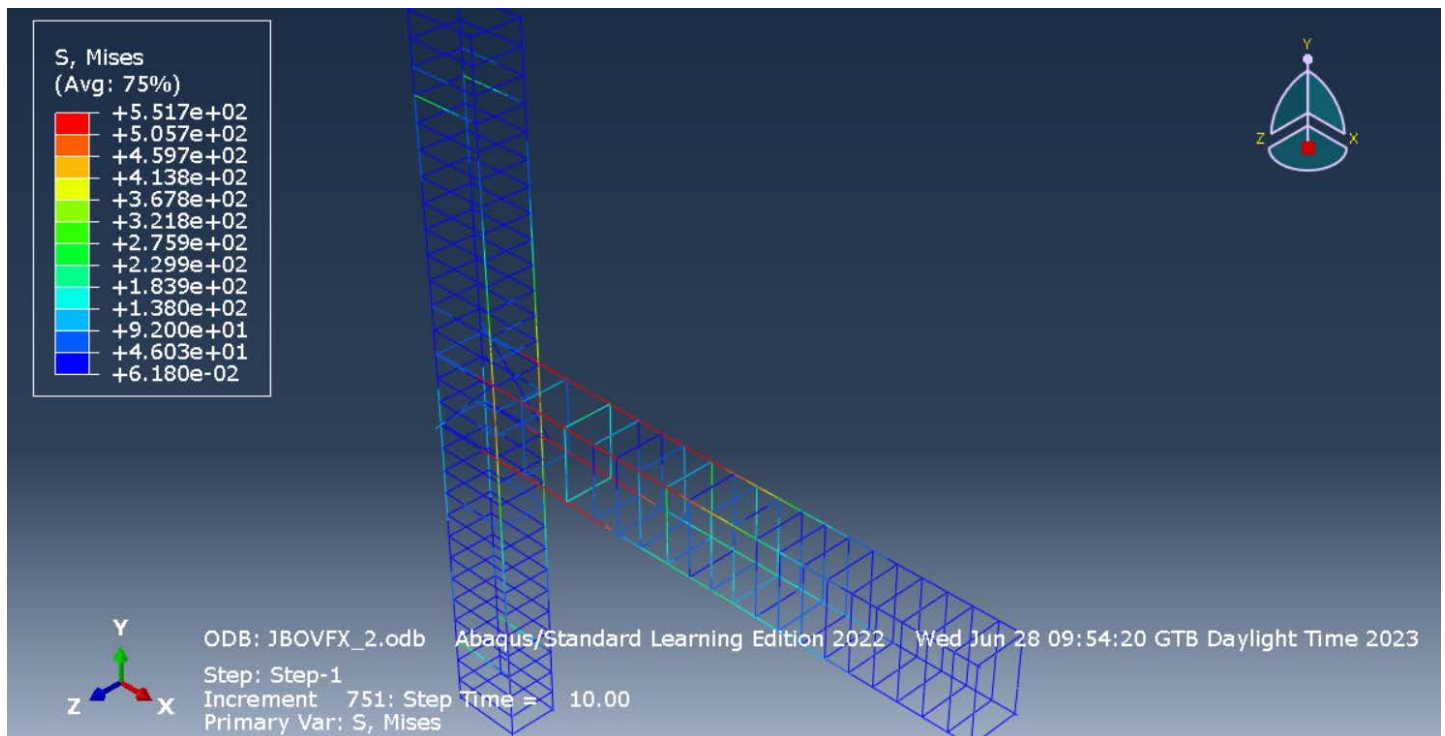
Εικόνα 5.3.2: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της εφελκυστικής εντάσεως του δοκιμίου JBOVFX.



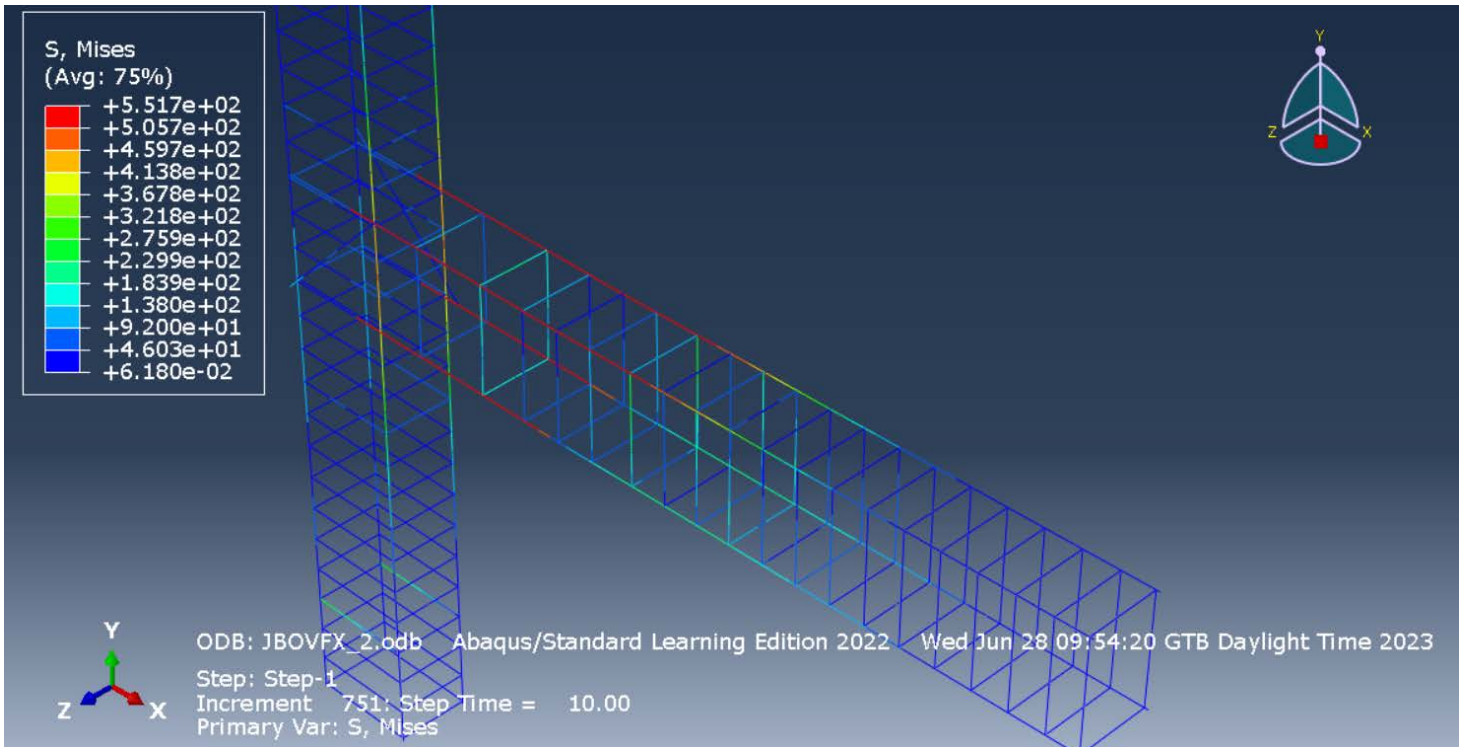
Εικόνα 5.3.3: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της θλιπτικής εντάσεως του δοκιμίου JBOVFX.



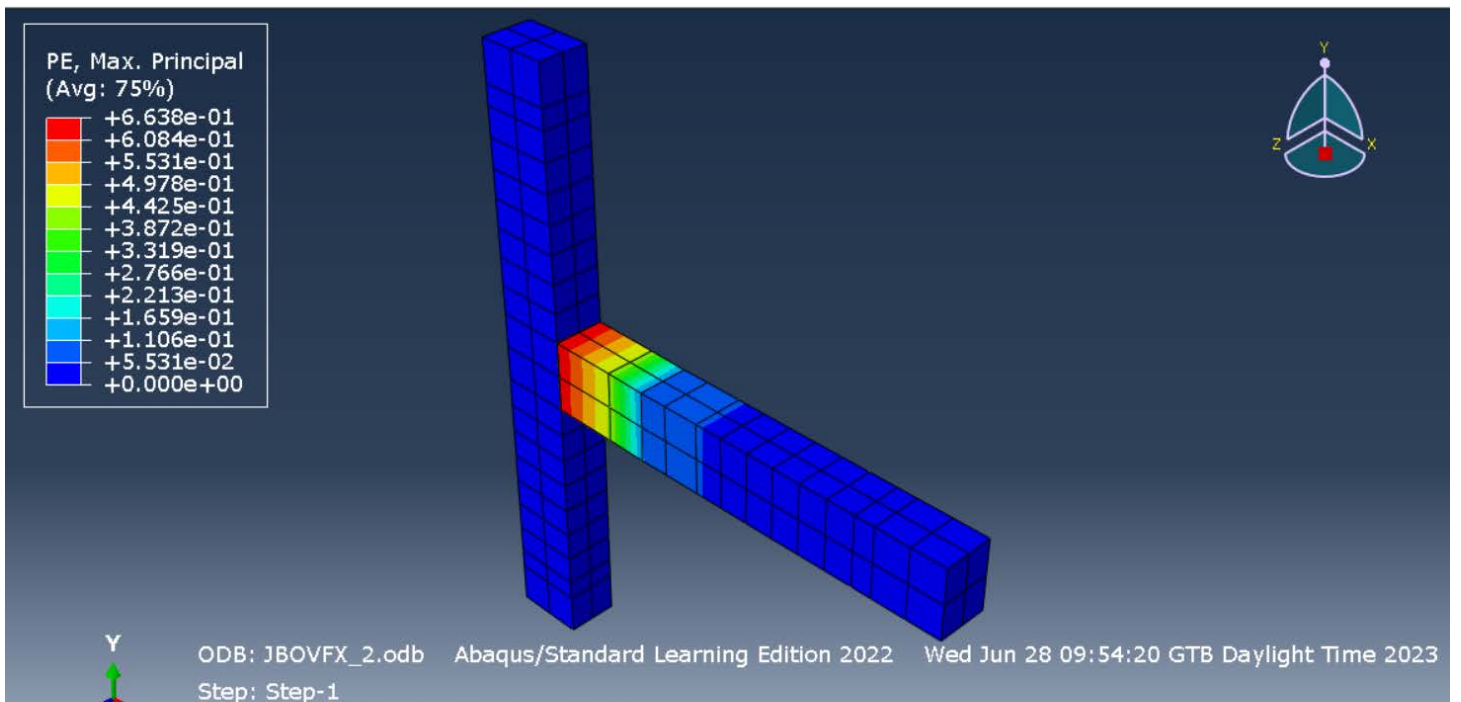
Εικόνα 5.3.4: Στιγμιότυπα της τρισδιάστατης απεικόνισης της εντάσεως του δοκιμίου JBOVFX κατά Von Mises κατά τη διάρκεια της κυκλικής φορτίσεως.



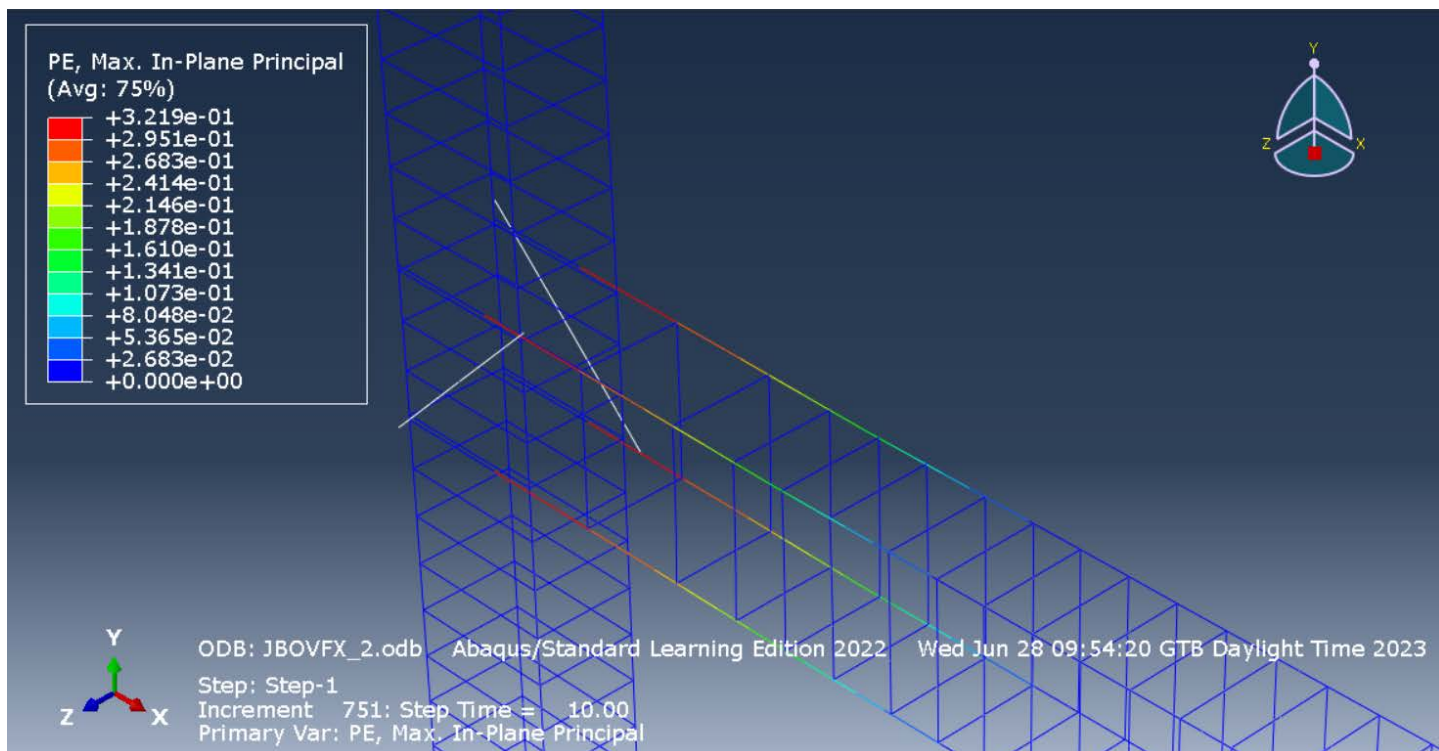
Εικόνα 5.3.5: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της καταπονήσεως του οπλισμού κατά Von Mises.



Εικόνα 5.3.6: Λεπτομέρεια της τρισδιάστατης απεικόνισης της καταπόνησης του οπλισμού κατά Von Mises.



Εικόνα 5.3.6: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης που δείχνει που είναι πιθανότερη η εμφάνιση αστοχιών.



Εικόνα 5.3.7: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της μέγιστης κύριας έντασης του οπλισμού που δείχνει που είναι πιθανό να διαρρεύσει ο οπλισμός με βάση την αρχή.

6. Ανάλυση αποτελεσμάτων

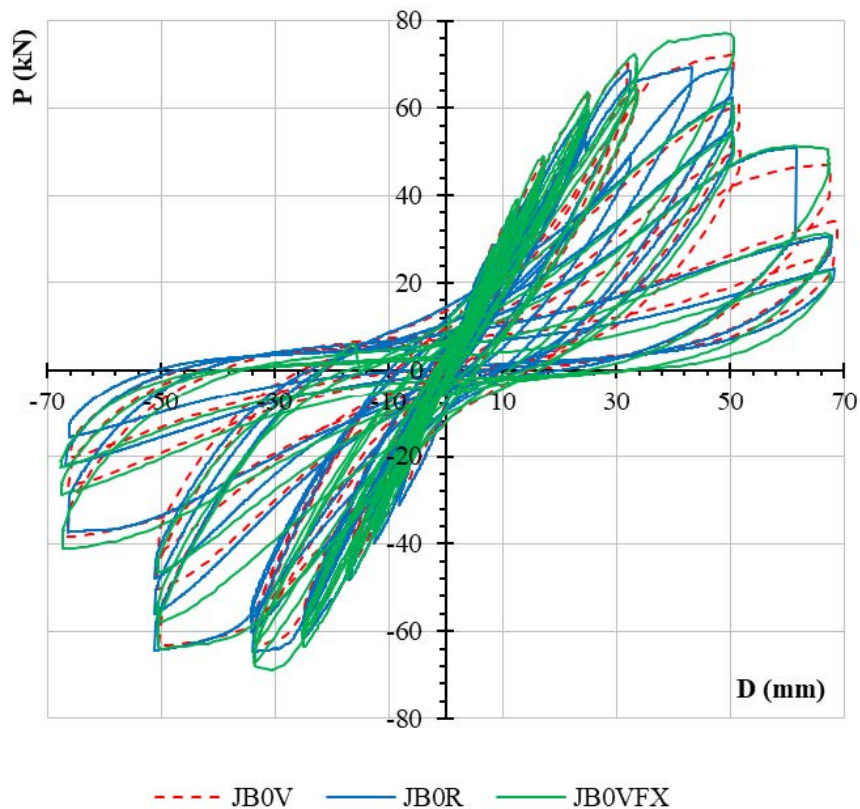
Συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα του πραγματικού πειράματος παρατηρείται διαφορά στην απόκριση των δειγμάτων στην κυκλική φόρτιση. Βασικό σημείο είναι ο τρόπος που εκδηλώνεται η παραμορφωσιακή τους συμπεριφορά. Τα δοκίμια του πειραματικού πλαισίου όπως είναι αναμενόμενο παρουσίασαν πλαστική συμπεριφορά με παραμορφώσεις και δημιουργία ρωγμών, ενώ τα αντίστοιχά τους στις υπολογιστικές προσομοιώσεις εμφάνισαν ελαστική συμπεριφορά. Αυτό το αποτέλεσμα εξηγείται κυρίως από τους εγγενείς περιορισμούς της ακαδημαϊκής άδειας του Abaqus/Standard που επιτρέπει μόνο στατικές αναλύσεις για τον υπολογισμό αντιδράσεων και περιορίζει σημαντικά τα τμήματα πλέξης των αναλυόμενων σχημάτων σε 1000 συνολικώς στοιχεία. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά μειώνουν σημαντικά το εύρος ορισμένων αποτελεσμάτων που μπορούν να αποκτηθούν, όπως η φύση της αποκρίσεως και το τελικό παραμορφωμένο σχήμα, όμως μπορούν παρόλα αυτά να δώσουν αξιόπιστες πληροφορίες, όπως οι τιμές των αντιδράσεων. Στα διαγράμματα δυνάμεων – μετατοπίσεων οι τιμές των αντιδράσεων υπολογίστηκαν επαρκώς κοντά στις τιμές που αποκτήθηκαν από τα πραγματικά πειράματα, με το ίδιο να παρατηρείται και με τις τιμές των μεγίστων μετατοπίσεων.

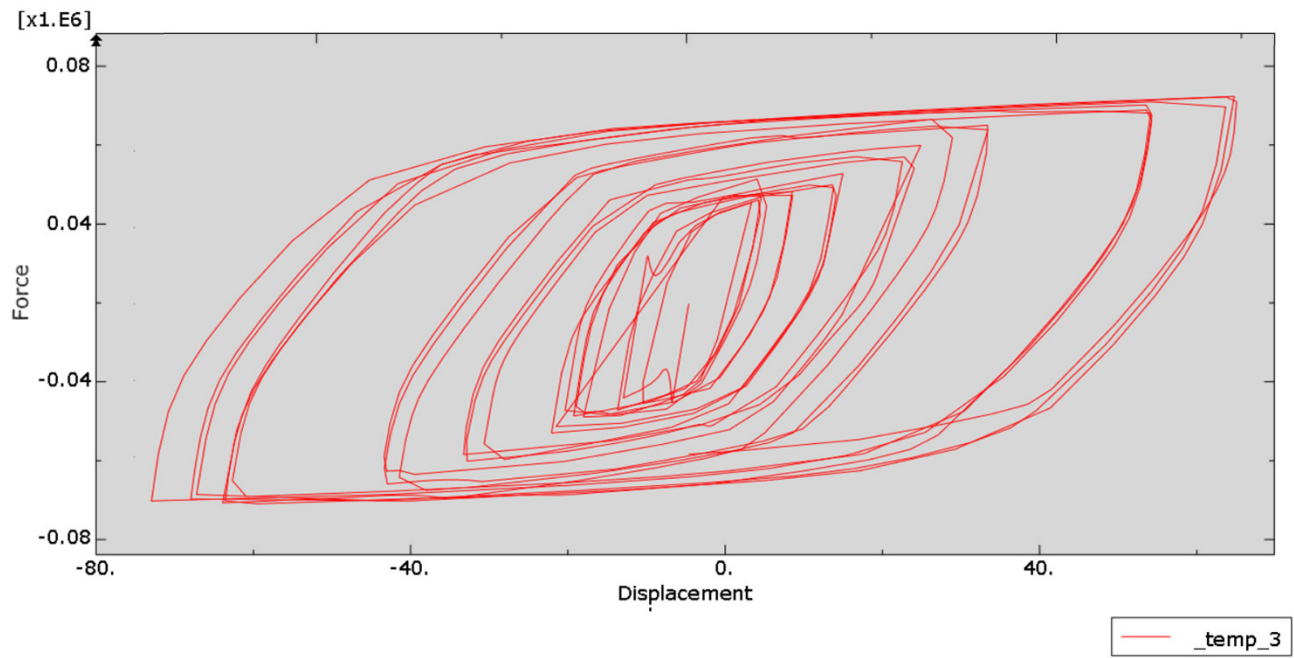
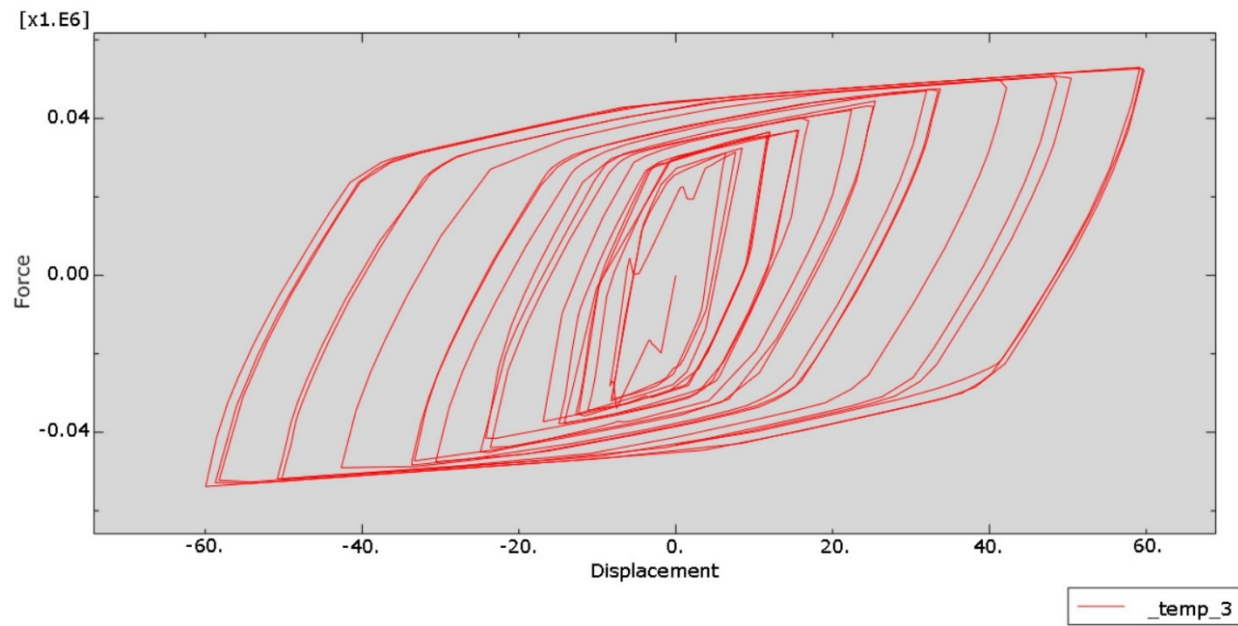
Αυτό επαληθεύει και από υπολογιστικό πλαίσιο ότι οι εκλεγμένες ενισχύσεις για τις συνδέσεις δοκών με υποστυλώματα φέρουν όντως ικανοποιητικές βελτιώσεις σε αντοχή και γενικότερη αντισεισμική απόκριση. Αρχικώς, το δοκίμιο ελέγχου έδειξε ότι ο προβλεπόμενος σπλισμός όπως αυτός ορίζεται από τις καθιερωμένες διατάξεις, έχει μειωμένη αντοχή σε μέτρια προς μεγάλα παραμορφωσιακά φορτία, όπως φάνηκε από τις τρισδιάστατες απεικονίσεις θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, η χρονική απεικόνιση της φόρτισης έδειξε ότι παραμορφώσεις μεγαλύτερες των 12.75mm ξεκινούσαν να φέρνουν σημαντικές καταπονήσεις στο σκυρόδεμα, με το Abaqus να υποδεικνύει την πιθανότητα αστοχίας στις απεικονίσεις μέγιστης κύριας έντασης ήδη από την τρίτη επανάληψη ασκήσεως των 12.75mm στην δοκό. Αυτή η αδυναμία του κόμβου είναι αναμενόμενη, αφού όπως έχει προαναφερθεί στην βιβλιογραφική ανάλυση, ερευνητές σε πολλές δημοσιεύσεις έχουν υποδείξει ότι σχεδόν όλοι οι κατασκευαστικοί κώδικες παγκοσμίως παραβλέπουν τον ικανοποιητικό σπλισμό των συνδέσεων αυτών. Έτσι, οι συνδέσεις αντέχουν παραμορφώσεις μικρής κλίμακας σεισμών όπως αυτοί που προσομοιώνονται με τα 8.5mm, αλλά αρχίζουν σταδιακά να αστοχούν όταν τα φορτία εντείνονται σε μεγαλύτερα μεγέθη.

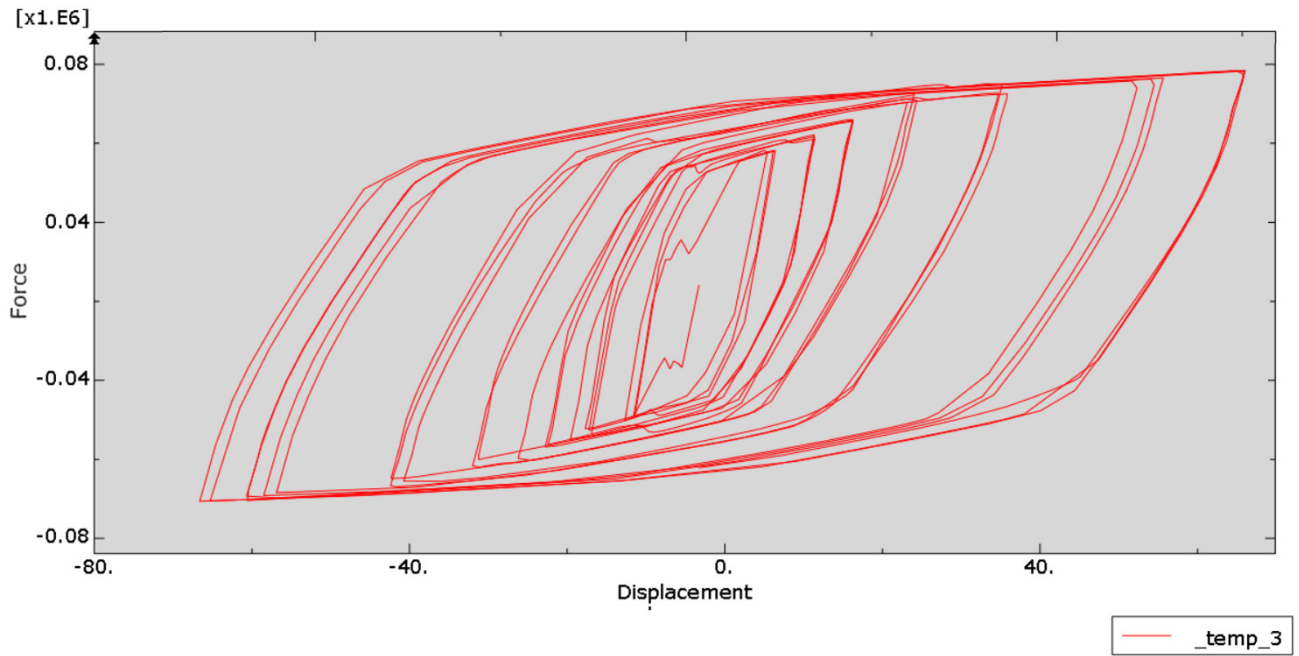
Όταν οι κόμβοι ενισχύονται έστω και με στοιχειώδη μέσα, όπως είναι δηλαδή η ενσωμάτωση επιπλέον ράβδων εντός του πυρήνα του κόμβου στο δοκίμιο JBOR, η αντισεισμική συμπεριφορά βελτιώνεται αμέσως με αυξήσεις στις αντοχές. Στο πειραματικό περιβάλλον του άρθρου αναφοράς, η αύξηση των δυνάμεων κυμάνθηκε περίξ του 6%, που είναι πολύ κοντά στην αύξηση 8.76% που παρατηρήθηκε στην ψηφιακή προσομοίωση. Επιπλέον, η μέγιστη παραμόρφωση που καταγράφηκε ήταν κοντά στην πραγματική. Αυτό δείχνει ότι το Abaqus γενικώς παρέχει ένα βαθμό αξιοπιστίας στον υπολογισμό αντιδράσεων και μετατοπίσεων. Από τις απεικονίσεις καταπονήσεων του σπλισμού εσωτερικά του δοκίμιου παρατηρείται ότι οι υπολογισμοί του προγράμματος υποδεικνύουν ότι ο σπλισμός δεν φθάνει το όριο διαρροής του χάλυβα ακόμα και στις μεγαλύτερες παραμορφωσιακές φορτίσεις. Κάτι τέτοιο δεν

είναι λογικό, αφού ο χαλύβδινος σπλισμός εκτιμάται να διαρρέει περίπου στα μέσα της κυκλικής φόρτισης, όταν δηλαδή και το σκυρόδεμα ξεκινάει να παρουσιάζει την δημιουργία ρωγμών. Οι καταπονήσεις κατά Von Mises παρουσιάζουν λογική κατανομή θλιπτικών και εφελκυστικών εντάσεων που εναλλάσσονται αναλόγως της κατευθύνσεως του φορτίου.

Το δοκίμιο JB0VFX στην ψηφιακή του προσομοίωση παρουσίασε τα ίδια χαρακτηριστικά αποκρίσεως κυρίως την ελαστική συμπεριφορά στην κυκλική φόρτιση. Η αυξημένη αντοχή του δείγματος είναι εμφανής από το διάγραμμα δυνάμεων – μετατοπίσεων που παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στις αντιδράσεις της τάξεως 17.56% από το δοκίμιο ελέγχου και 11% από το δοκίμιο JBOR. Επιπλέον, στην χρονική απεικόνιση της κυκλικής φορτίσεως φαίνεται πως η σύνδεση και η προέκτασή της προς την δοκό φέρουν πιο ομαλή παραμορφωσιακή απόκριση στα επιβαλλόμενα φορτία. Αυτό εξηγείται από την ενισχυμένη αγκύρωση που προσφέρουν οι ράβδοι CFRP που επιτρέπουν την απορρόφηση ενέργειας που έρχεται από την άσκηση του φορτίου. Παρόμοια με τα προηγούμενα δοκίμια ο σπλισμός δείχνει να μην διαρρέει, κάτι που δεν συνάδει με την πραγματικότητα ακόμα και για ένα ενισχυμένο δοκίμιο όπως το εξεταζόμενο, αφού οι φορτίσεις είναι τόσο μεγάλες που μετά από κάποιο σημείο ο σπλισμός εσωτερικά θα υπόκειτο τελικώς σε διαρροή.







Εικόνα 6.1: Συγκέντρωση των διαγραμμάτων δυνάμεων – μετατοπίσεων από το πραγματικό πείραμα και των τριών δοκιμών ξεχωριστά παρακάτω του. Σημειώνεται πως στο διάγραμμα αναφέρονται με ξεχωριστά χρώματα τα τρία διαφορετικά δοκίμια και τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν με τη σειρά τις αποκρίσεις των δοκιμών JBOV, JBOR, JBOVFX αντιστοίχως.

7. Συμπεράσματα

Οι αναλύσεις των τριών δοκιμών στο ψηφιακό περιβάλλον του προγράμματος Abaqus φέρνουν συμπεράσματα δύο πτυχών: της αξιολόγησης της αποκρίσεως των δοκιμών αναφορικά με τις ενισχύσεις τους και της αξιολόγησης της χρήσης και αξιοπιστίας του προγράμματος Abaqus για προσομοιώσεις κόμβων και γενικότερα στοιχείων από Ο/Σ.

7.1 Αξιολόγηση της αποκρίσεως των δοκιμών

Το δοκίμιο ελέγχου έδειξε ότι σε περιπτώσεις πλήξης από σεισμούς μέτριας προς μεγάλης εντάσεως, οι υφιστάμενες κατασκευές που φέρουν κόμβους οπλισμένους με τις τωρινές διατάξεις θα υποστούν ζημιές στις συνδέσεις αυτές. Είναι λοιπόν σαφώς αναγκαίο – εάν η αντισεισμική επιβίωση ενός κτηρίου κριθεί προτεραιότητα υψίστης σημασίας – η θωράκιση των κόμβων να είναι ένα από τα βασικά μέτρα που θα παρθούν για να εξασφαλιστεί η στατικότητα. Η μέθοδος βαθιάς ενσωμάτωσης (BE) που αναλύθηκε στο δοκίμιο JBOR πέτυχε τον στόχο της βελτίωσης της ικανότητας του κόμβου να αντισταθεί σε παραμορφωσιακά φορτία, όμως η ενίσχυση αυτή δεν κρίνεται αρκετή για να σημειώσει κάποιου είδους ουσιαστική εξασφάλιση της αντισεισμικής ανθεκτικότητας του κόμβου. Τα αποτελέσματα αυτά που αποκτήθηκαν από την ψηφιακή προσομοίωση είναι σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα που παρέχονται από το πείραμα αναφοράς. Άλλες μορφές στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος που υπήχθησαν σε διαφορετικής εντάσεως φορτίσεις έφεραν ικανοποιητικότερες αποκρίσεις, όπως οι δοκοί από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ράβδους BE από την έρευνα του Valerio et al^[29] και οι ενισχυμένοι δοκοί του Rahman et al^[30] που οδήγησαν σε σημαντικές αυξήσεις της τάξεως έως και του 54%. Όμως, αυτές οι έρευνες έφεραν κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες, όπως σκυρόδεμα αυξημένης αντοχής και χαλύβδινοι ράβδοι ειδικών κραμάτων και περίπλοκων διαμορφώσεων εντός των κόμβων. Επομένως, αν και υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές για πειράματα που απέδωσαν μεγαλύτερης τάξεως αντοχές, η φύση αυτών των πειραμάτων ήταν διερευνητική και πολλές από τις διατάξεις ενισχύσεως ίσως να μην είναι τόσο ρεαλιστικές όσο οι διατάξεις που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αντοχής πολύ κοντινής σε σκυροδέματα που είναι ευρέως διαθέσιμα στην αγορά και χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στον κατασκευαστικό κλάδο. Επιπλέον, ο τύπος χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε είναι συνήθης σε κατασκευές, οπότε τα αποτελέσματα των δοκιμών που αναλύθηκαν είναι πιο ρεαλιστικά ως προς την δομή τους.

Η χρήση ράβδων ενισχύσεως CFRP στον πυρήνα των κόμβων φέρει σαφώς μεγαλύτερες αντοχές, που καθιστούν αυτήν την λύση την ικανοποιητικότερη για εφαρμογή. Παρόλα αυτά, η σχεδίαση και

κατασκευή τέτοιου είδους ράβδων δεν είναι προτυποποιημένες και για την εισαγωγή τους στον κατασκευαστικό κλάδο απαιτούνται συγκεκριμένες προεργασίες για την παραγωγή τέτοιων στοιχείων. Για το πείραμα αναφοράς, οι ράβδοι από CFRP κατασκευάστηκαν ειδικά και μια γενική τους παραγωγή θα φέρει δαπάνες που με τη σειρά τους θα αυξήσουν το κόστος προμήθευσης. Επιπλέον, για την μετά σεισμού ενίσχυση των κόμβων υπάρχει το εξ' αρχής κόστος της προετοιμασίας της περιοχής για την ενσωμάτωση των στοιχείων, δηλαδή της απομάκρυνσης του ζημιωμένου σκυροδέματος και της διάνοιξης οπών στον κόμβο. Επομένως, ιδίως μιλώντας για την βέλτιστη πειραματικώς λύση – δηλαδή την χρήση ράβδων από CFRP – η όλη διαδικασία βγάζει οικονομικώς νόημα στην περίπτωση που για ένα κτήριο – λόγω μιας εγγενούς ιστορικής ή αισθητικής σημασίας του – απαιτείται η επισκευή από ζημιές και η θωράκισή του για μελλοντικούς σεισμούς. Ειδάλλως, το κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση αυτών των ενισχύσεων ίσως καθιστά την επιδιόρθωση αποτρεπτική από οικονομικής απόψεως, αφού στην περίπτωση που οι κόμβοι ενός κτηρίου έχουν αστοχήσει σε σημείο που απαιτείται επιδιόρθωση, κατά πάσα πιθανότητα θα υπάρχουν και άλλες ζημιές στο κτήριο που θα χρήζουν επισκευής αυξάνοντας κατακόρυφα το συνολικό κόστος της γενικής ανακατασκευής. Μια περίπτωση στην οποία τον κόστος εφαρμογής μειώνεται σημαντικά είναι στην ενίσχυση των συνδέσεων κατά την διάρκεια κατασκευής των κτηρίων, όμως αυτή η λύση στέκεται πέραν της θέματος της παρούσας εργασίας.

Για αυτούς τους λόγους περαιτέρω έρευνα απαιτείται για την δημιουργία και εγκατάσταση οικονομικότερων στοιχείων ενίσχυσης που θα καθιστούν την επί τόπου εφαρμογή τους μια πρακτική λύση για τον μηχανικό. Μια βελτίωση στις μεθόδους εγκαταστάσεως τέτοιων στοιχείων σε υφιστάμενους κόμβους επίσης θα βοηθούσε στην μείωση των δαπανών που σχετίζονται με την συγκεκριμένη διαδικασία.

7.2 Αξιολόγηση της χρήσης και αξιοπιστίας του προγράμματος Abaqus

Βασικός άξονας της διεκπεραίωσης της εργασίας ήταν η χρήση του προγράμματος Abaqus. Παρόλο που το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση κατασκευών από ομογενή υλικά όπως μεταλλικές κατασκευές, το λειτουργικό του πλαίσιο παρείχε την δυνατότητα μοντελοποίησης και ανάλυσης στοιχείων από Ο/Σ. Οι δυνατότητες εντοιχισμού τμημάτων εντός μεγαλύτερων στοιχείων και η δημιουργία ενσωματωμένων περιοχών απεδείχθησαν κρίσιμες για τον σωστό σχεδιασμό των δοκιμών. Επίσης, ειδικές λειτουργίες όπως η τρισδιάστατη συναρμολόγηση και η εργαλειοθήκη σχεδιασμού επέτρεψαν την δημιουργία του περίπλοκου χαλύβδινου σκελετού των δοκών και υποστυλωμάτων καθώς και των ενισχύσεων των συνδέσεων τους. Έτσι, η διαδικασία σχεδιασμού των πλαισίων εξελίχθηκε φυσιολογικά εντός του πλαισίου το προγράμματος δίχως την εμφάνιση δυσκολιών ή εμποδίων που θα είχαν να κάνουν με την αδυναμία του Abaqus να προσομοιώσει σωστά την μορφή στοιχείων από σύνθετα υλικά όπως το Ο/Σ.

Παρόλα αυτά, αναφορικά με την ανάλυση της κυκλικής φορτίσεως, είναι εμφανές από τα αποτελέσματα και των τριών δοκιμών ότι η πλαστική συμπεριφορά που εμφανίζει το Ο/Σ δεν μπορούσε να προσομοιαστεί επαρκώς. Βασικός λόγος για την αδυναμία της ορθής προσομοίωσης των πλαισίων ίσως

να είχε να κάνει – όπως και προαναφέρθηκε – με τον αριθμητικό περιορισμό των τμημάτων πλέξης που επιτρέπεται στα μοντέλα από την ακαδημαϊκή άδεια του Abaqus. Είναι γεγονός πως όσο μικρότερα είναι τα τμήματα που απαρτίζουν μια πλέξη τόσο πιο αναλυτική και πιο κοντά στην πραγματικότητα θα είναι η ανάλυσή της, επομένως ίσως αυτός ο περιορισμός να στάθηκε ως το βασικό εμπόδιο μιας πειστικής προσομοίωσης. Πέραν αυτού του ζητήματος το Abaqus έδειξε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την παροχή δεδομένων για τις δυνάμεις αντίδρασης και τις μετατοπίσεις που έλαβαν μέρος, όπως μαρτυρά το γεγονός ότι τα διαγράμματα δυνάμεων – μετατοπίσεων και από τα τρία δοκίμια είναι σε συμφωνία με αυτά από δόθηκαν από τα πειράματα αναφοράς. Επιπλέον, η προσομοίωση της συμπεριφοράς του οπλισμού ως προς τις καταπονήσεις από την φόρτιση απεδείχθη εξίσου ελλιπής, αφού παρατηρήθηκε και στα τρία δοκίμια ότι ο οπλισμός δεν διέρρηε ακόμα και στα μεγαλύτερα επιβαλλόμενα φορτία, κάτι που δεν συνάδει με την πραγματικότητα. Για αυτόν τον λόγο η ικανότητα του Abaqus να προσομοιώσει στοιχεία από Ο/Σ, κρίνοντας από τις αναλύσεις που διεκπεραιώθηκαν με την ακαδημαϊκή άδειά του, δεν φέρνει πλήρως αξιόπιστα και εν συμφωνία με την πραγματικότητα αποτελέσματα. Σημειώνεται, ότι προηγούμενες έρευνες μοντελοποίησης ενσωμάτων στον επεξεργαστή του προγράμματος τμήματα κώδικα που κατασκεύαζαν οι μελετητές που έφεραν μαθηματικά μοντέλα για την πλήρη προσομοίωση του σκυροδέματος, με σκοπό την υποβοήθηση του επεξεργαστή να φέρει ορθά αποτελέσματα. Απαιτείται λοιπόν περαιτέρω διερεύνηση για την εξακρίβωση του εάν μέσω πιο λεπτομερών πλεγμάτων μοντελοποίησης οι αναλύσεις μελών από Ο/Σ θα φέρουν πιο λογικές προσομοιώσεις με τα εργαλεία και τους μηχανισμούς που είναι διαθέσιμα στον μηχανικό, ιδίως με την χρήση των πλήρων δυνατοτήτων που παρέχονται από την επαγγελματική άδεια του προγράμματος.

Βιβλιογραφία

1. Moussard, M., Garibaldi, P., & Curbach, M. (2018). The Invention of Reinforced Concrete (1848 – 1906). In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet* (σ.σ. 2785–2794). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_316
2. BROWN, J. M. (1966). W. B. Wilkinson (1819-1902) and his place in the History of Reinforced Concrete. *Transactions of the Newcomen Society*, 39(1), 129–142. <https://doi.org/10.1179/tns.1966.009>
3. Wight JK, MacGregor JG. Reinforced concrete. Pearson Education UK; 2016. ISBN-13: 978-0-13-217652-1, ISBN-10: 0-13-217652-1
4. Forty A. Concrete and culture: a material history. Reaktion Books; 2013 Feb 15. ISBN-10: 1780236360, ISBN-13: 978-1780236360
5. Mir M. Ali. (2001). Evolution of Concrete Skyscrapers: from Ingalls to Jin mao. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 1(1), 2–14. <https://doi.org/10.56748/ejse.1111>
6. FREYSSINET, E. (1950). LECTURE ON PRE-STRESSED CONCRETE: PRINCIPLES & APPLICATIONS. JOINT MEETING WITH SOCIETE DES INGENIEURS CIVILS DE FRANCE (BRITISH SECTION). 17 NOVEMBER 1949. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 33(4), 331–380. <https://doi.org/10.1680/IJOTI.1950.12924>
7. Marcos, I., San-José, J.-T., Santamaría, A., & Garmendia, L. (2018). Early Concrete Structures: Patented Systems and Construction Features. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(3), 310–319. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1323241>
8. Τύποις Π. Δ. Σακελλάριου (1907). Οικία Αλεξάνδρου Αφεντούλη επί της οδού Σταδίου και πλατείας Κολοκοτρώνη κατασκευασθείσα διά σκροκονιάματος σιδηροπαγούς συστήματος Hennebique (σ.σ. 131-137). <http://hdl.handle.net/123456789/843>
9. Duggal SK. Earthquake resistant design of structures. New Delhi: Oxford university press; 2007.
10. Paulay T, Priestley MN. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York: Wiley; 1992 Mar.
11. Sarkar P, Agarwal R, Menon D. Design of RC beam column joints under seismic loading—a review. *Journal of Structural Engineering (India)*. 2007;33(6):449-57.
12. Kaliluthin AK, Kothandaraman S, Ahamed TS. A review on behavior of reinforced concrete beam column joint. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2014 Apr;3(4):11299-312.

13. Joint ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures, (ACI 352R-76)," ACI JOURNAL, Proceedings V. 73, No. 7, July 1976, σ.σ. 375-393.
14. Engindeniz, Murat & Kahn, Lawrence & Zureick, AH. (2005). Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art. *Aci Structural Journal*. 102. 187-197.
15. Tsonos, Alexander- Dimitrios. (2000). Seismic Rehabilitation of Reinforced Concrete Joints by the Removal and Replacement Technique.
16. Karayannis, C. G.; Chaliouris, C. E.; and Sideris, K. K., "Effectiveness of RC Beam-Column Connection Repair Using Epoxy Resin Injections," *Journal of Earthquake Engineering*, V. 2, No. 2, 1998, σ.σ. 217-240.
17. Paulay, R., Park, R., and Priestley, M. J. N., "Reinforced Concrete Beam-Column Joints Under Seismic Actions," *Journal ACI*, Vol. 75, No. 11, November 1978, σ.σ. 585-593.
18. Takeda, T., Sozen, M. A., & Nielsen, N. N. (1970). Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes. *Journal of the Structural Division*, 96(12), 2557–2573. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002765>
19. Moehle J. Seismic design of reinforced concrete buildings. McGraw-Hill Education; 2015.
20. ACI Committee 224, "Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures (ACI 224.1R-93 [Reapproved 1998])," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1993, 22 pp.
21. Alcocer, S. M., and Jirsa, J. O., "Strength of Reinforced Concrete Frame Connections Rehabilitated by Jacketing," *ACI Structural Journal*, V. 90, No. 3, May-June 1993, pp. 249-261.
22. Choudhuri, D.; Mander, J. B.; and Reinhorn, A. M., "Evaluation of Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Frame Structures: Part I — Experimental Performance of Retrofitted Subassemblages," Technical Report NCEER-92-0030, SUNY/Buffalo, 1992.
23. Ghobarah, A.; Aziz, T. S.; and Biddah, A., "Rehabilitation of Reinforced Concrete Frame Connections Using Corrugated Steel Jacketing," *ACI Structural Journal*, V. 4, No. 3, May-June 1997, pp. 283-294.
24. Tsonos, A. G., "Seismic Retrofit of R/C Beam-to-Column Joints using Local Three-Sided Jackets," *European Earthquake Engineering*, No. 1, 2001, pp. 48-64.
25. Antonopoulos, C. P., and Triantafillou, T. C., "Analysis of FRP Strengthened RC Beam-Column Joints," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 6, No. 1, Feb. 2002, pp. 41-51.
26. Ghobarah, A., and Said, A., "Shear Strengthening of Beam-Column Joints," *Engineering Structures: The Journal of Earthquake, Wind and Ocean Engineering*; V. 24, No. 7, July 2002, pp. 881-888.
27. Gergely, J.; Pantelides, C. P.; and Reaveley, L. D., "Shear Strengthening of RCT-Joints Using CFRP Composites," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 4, No. 2, May 2000, pp. 56-64.
28. Golias, E., Vougioukas, E. A., Wittmann, K., Kalogeropoulos, G. I., & Karayannis, C. (2022). Cyclic response of RC beam-column joints strengthened with transverse steel

- bars and with C-FRP diagonal ties. *Acta Polytechnica*, 62(2), 274–282.
<https://doi.org/10.14311/AP.2022.62.0274>
29. Valerio, P., Ibell, T. J., & Darby, A. P. (2009). Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 162(5), 311–321. <https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.5.311>
 30. Rahman, R., Dirar, S., Jemaa, Y., Theofanous, M., & Elshafie, M. (2018). Experimental Behavior and Design of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints Strengthened with Embedded Bars. *Journal of Composites for Construction*, 22(6).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000883](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000883)
 31. ACI (American Concrete Institute). 2002. Recommendations for design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete structures. ACI 352R-02. Farmington Hills, MI: ACI.
 32. Han, J., Li, Z., & Song, J. (2010). The Application of Finite Element Analysis Software (ABAQUS) in Structural Analysis. *2010 International Conference on Computational and Information Sciences*, 68–71. <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2010.24>
 33. Hamid Sinaei. (2012). Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by ABAQUS. *Scientific Research and Essays*, 7(21).
<https://doi.org/10.5897/SRE11.1393>
 34. Abbas, A. A., Syed Mohsin, S. M., & Cotsovos, D. M. (2014). Seismic response of steel fibre reinforced concrete beam–column joints. *Engineering Structures*, 59, 261–283.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.046>
 35. Najafgholipour, M. A., Dehghan, S. M., Dooshabi, A., & Niroomandi, A. (2017). Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections with Governing Joint Shear Failure Mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(7), 1200–1225. <https://doi.org/10.1590/1679-78253682>
 36. Maranha JR, Maranha das Neves E. The experimental determination of the angle of dilatancy in soils. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4) 2009* (pp. 147-150). IOS Press.
 37. Park, Y., & Ang, A. H. -S. (1985). Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722–739.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
 38. Takeda, T., Sozen, M. A., & Nielsen, N. N. (1970). Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes. *Journal of the Structural Division*, 96(12), 2557–2573.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002765>