



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

**ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ
ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ TRM**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Κράνης

Επιβλέπων: Σάββας Τριανταφύλλου, Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την συγγραφή και παράδοση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κλείνει ο κύκλος της προπτυχιακής φοίτησης μου στην σχολή των Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ένας κύκλος με χαρές, με δυσκολίες και κυρίως με πολλές εμπειρίες τόσο κατά την διάρκεια του ωραρίου της παρακολούθησης και εξέτασης των μαθημάτων στην σχολή όσο και κατά την συμμετοχή μου σε εκπαιδευτικές εκδρομές, ομιλίες και ημερίδες. Εμπειρίες που θα μου χρειαστούν όχι μόνο κατά την επαγγελματική μου σταδιοδρομία αλλά και στην ζωή μου γενικότερα. Κατά την διάρκεια της φοίτησης μου ήρθα σε επαφή με καθηγητές και συμφοιτητές όπου ο καθένας με τον τρόπο του συνέδραμε στην εξέλιξη μου ως πολιτικός μηχανικός αλλά και ως άνθρωπος. Νιώθω την ανάγκη να δώσω ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στους παρακάτω ανθρώπους.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, τον κύριο Σάββα Τριανταφύλλου. Υπομονετικός, καθοδηγητικός, επεξηγηματικός, πρόθυμος να απαντήσει σε οποιαδήποτε απορία μου αμέσως και με κατανόηση σε οποιαδήποτε δυσκολία εμφανιζόταν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Ένας καθηγητής πρότυπο που τον ευχαριστώ που με εμπιστεύτηκε να δουλέψουμε μαζί σε ένα τόσο ενδιαφέρον και χρήσιμο θέμα και ελπίζω να έχω την τύχη να συνεργαστώ ξανά μαζί του στο μέλλον.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου τόσο εντός όσο και εκτός σχολής, τόσο παλιούς όσο και νέους. Αυτά τα χρόνια της προπτυχιακής φοίτησης μου ζήσαμε μαζί χαρές και επιτυχίες, στεναχώριες και αποτυχίες, συγχαίροντας και υποστηρίζοντας ο ένας τον άλλο. Όλοι μαζί όμως εξελιχθήκαμε σαν άνθρωποι και προετοιμαστήκαμε για την επαγγελματική μας σταδιοδρομία.

Τέλος, δεν γίνεται να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου. Ευχαριστώ την μητέρα μου Κατερίνα, τον πατέρα μου Χαράλαμπο και τον αδερφό μου Στέφανο για την στήριξη τους, υλική και ψυχολογική, τις συμβουλές τους τόσο για την σχολή όσο και για την ζωή και που είναι πάντα δίπλα μου. Χωρίς αυτούς δεν θα ήμουν αυτός που είμαι και θα τους ευγνωμονώ για αυτό για πάντα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΩΜΕΝΩΝ

| | |
|--|------------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | III |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | VII |
| ABSTRACT | IX |
| 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ | 1 |
| 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 1 |
| 1.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ..... | 2 |
| 1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... | 2 |
| 1.5 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ | 3 |
| 2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΩΝ | 5 |
| 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ | 5 |
| 2.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΕΛΥΦΩΝ..... | 6 |
| 2.3 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΕΣ ΤΜΗΜΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ | 6 |
| 2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ | 8 |
| 2.5 ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ | 9 |
| 2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ | 12 |
| 2.7 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ | 13 |
| 3 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΑΠΟ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ | 15 |
| 3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ . | 16 |
| 3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΕΧΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ | 18 |
| 3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΕΧΩΝ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ..... | 20 |
| 3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΩΝ..... | 22 |
| 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΜΨΗΣ 3 ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ TRM ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ | 23 |

| | | |
|---|---|------------|
| 4.1 | ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ | 23 |
| 4.2 | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ ΑΒΑQUS..... | 24 |
| 4.3 | ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ..... | 28 |
| 4.4 | ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΙΔΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑ | 29 |
| 5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΜΨΗΣ 3 ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ TRM ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ..... | | 49 |
| 5.1 | ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 49 |
| 5.2 | ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΟΥΣ | 52 |
| 5.3 | ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ..... | 54 |
| 5.4 | ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΟΥΣ..... | 62 |
| 5.5 | ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΟΥΣ | 63 |
| 5.6 | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ | 64 |
| 5.7 | ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ..... | 74 |
| 6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΜΨΗΣ 3 ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ..... | | 77 |
| 6.1 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 78 |
| 6.2 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΜΟΝΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 88 |
| 6.3 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 93 |
| 7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ SC8R ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ CSS8 ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | | 105 |
| 7.1 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΜΟΝΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 106 |
| 7.2 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 109 |
| 7.3 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 3 ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΜΟΝΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ | 110 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.4 | TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 3 ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ..... | 111 |
| 8 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 113 |
| 8.1 | ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 113 |
| 8.2 | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ..... | 113 |
| 9 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 115 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το υλικό της φέρουσας τοιχοποιίας συναντάται διαχρονικά στον ελλαδικό χώρο. Μπορεί την σύγχρονη εποχή κυρίαρχα υλικά στην κατασκευαστική να αποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα και ο χάλυβας, όμως κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία υφίστανται ή και κατασκευάζονται ακόμα κυρίως εκτός των αστικών κέντρων. Επειδή όμως α) η φέρουσα τοιχοποιία σαν υλικό είναι ψαθυρό και με χαμηλές αντοχές και β) η μελέτη του υλικού με σύγχρονες μεθόδους ξεκίνησε σχετικά πρόσφατα (τέλη 20^{ου} αιώνα), είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη νέων μεθόδων, ελαφρά παρεμβατικών, όπου θα ενισχύσουν την φέρουσα ικανότητα των κατασκευών αυτών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί η μέθοδος ενίσχυσης της φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά TRM (μήτρα ενίσχυσης από τσιμεντοειδές οπλισμένη με πλέγματα ινών). Πρώτα, επειδή οι διαστάσεις των ενισχύσεων TRM παραπέμπουν σε πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (πάχος \ll μήκος, πλάτος) θα γίνει μια εισαγωγή στην θεωρία των κελυφών, ενώ με την χρήση προσομοιώματος αμφιέριστης πλάκας υπό ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο σε όλη την επιφάνειά της, με διαστάσεις που να αντιστοιχούν σε στοιχεία κελύφους, το οποίο θα προσομοιωθεί στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τα διαφορετικά στοιχεία κελυφών. Στην συνέχεια, στο ίδιο πρόγραμμα, θα προσομοιωθούν υπάρχοντες έλεγχοι ενισχυμένων δοκιμίων φέρουσας τοιχοποιίας με ενίσχυση TRM σε κάμψη 3 σημείων, θα πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση των ιδιοτήτων ενισχυμένου δοκιμίου (ιδιότητες υλικών, διατομών, ειδών πεπερασμένων στοιχείων) και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (Kariou et al., 2018).

Η διπλωματική αυτή εξήγαγε σημαντικά συμπεράσματα, με κυριότερα να αφορούν τον ρόλο των πεπερασμένων στοιχείων που διαδραματίζουν στην προσομοίωση τόσο της ενίσχυσης αλλά και του τοιχώματος, καθώς επίσης, από την παραμετρική ανάλυση, πώς επηρεάζουν οι ιδιότητες του ενισχυμένου δοκιμίου την απόκρισή του κατά την διάρκεια του ελέγχου.

ABSTRACT

The material of unreinforced masonry has been met at the Greek region throughout the ages. Although, nowadays, reinforced concrete and steel are the most used materials for construction, there are also been, or going to be, constructions, made of unreinforced masonry, mostly outside the Greek cities. However, because a) unreinforced masonry is a brittle material, with low strength and b) the study of that material started recently (at the end of 20th century), it is mandatory the development of new, low invasive, methods, which will reinforce the durability of those constructions.

The present diploma thesis aims the response of masonry strengthened using textile-mortar system (cement-based mortar reinforced with textiles, TRM system). Firstly, since the dimensions of TRM systems are closed to shells, for finite element (thickness \ll length, width), it will be introduced the theory of shell elements, while with the use of finite element analysis program Abaqus, a two-opposite-sided-supported plane with pressure load at its whole area and dimensions referred to shell elements, will be simulated, in order to fully understand the values and possibilities of the different types of shell elements. After that, at the same program, there will be simulated true experiments of three-point bending tests of masonry walls strengthened using textile-mortar system. Then, there will be accomplished various parametric analysis of the properties (material, section, mesh properties) of the reinforced masonry and, in the end, the accomplished output results will be compared with the equivalent results of the experiments (Kariou et al., 2018).

This diploma thesis yielded some important conclusions, with the most fundamental ones referred to the value of the finite elements at the simulation of both the masonry wall and the textile-mortar system, as well, for the parametric analysis, how the properties of the reinforced masonry influence its response.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

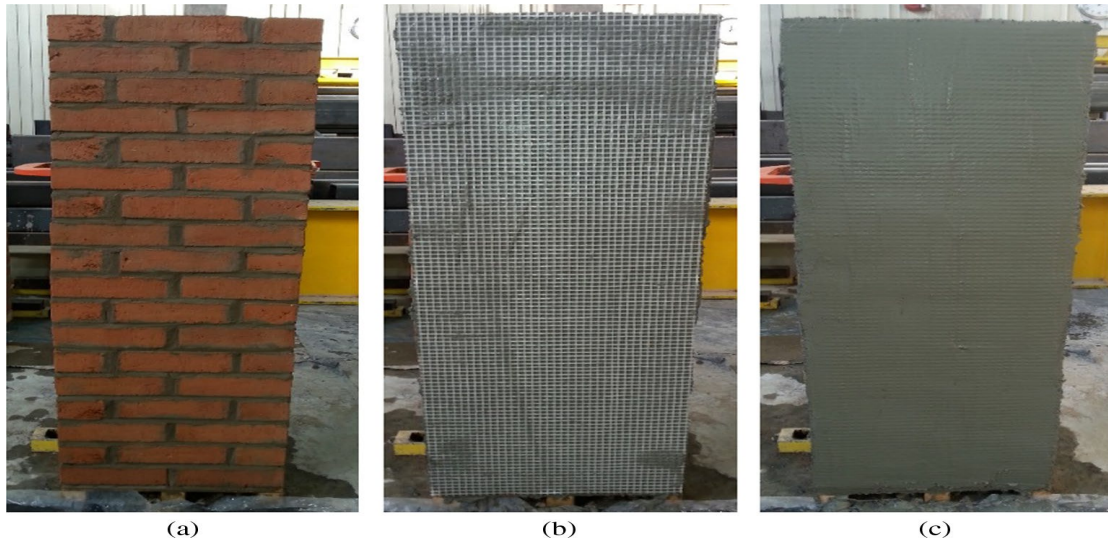
1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η τοιχοποιία είναι από τα αρχαιότερα δομικά υλικά που έχει χρησιμοποιήσει ο άνθρωπος στις κατασκευές του. Στην Ελλάδα, λόγω της αφθονίας του υλικού, υπάρχει μεγάλος αριθμός κατασκευών από τοιχοποιία οι οποίες μπορούν να χρονολογούνται από αρχαιοτάτων χρόνων (Ανάκτορο Μυκηνών), την βυζαντινή περίοδο (βυζαντινές εκκλησίες στον Μυστρά), μέχρι και σήμερα, με εκκλησίες, σχολεία αλλά και κατοικίες (συναντώνται περισσότερο εκτός των μεγάλων αστικών κέντρων). Παρόλα αυτά, η μελέτη του υλικού της φέρουσας τοιχοποιίας ως κατασκευαστικού υλικού ξεκίνησε σχετικά πρόσφατα, με το πρώτο κείμενο Ευρωκώδικα για κατασκευές από τοιχοποιία να κυκλοφορεί το 1989 (Ευρωκώδικας 6(1)), που σημαίνει ότι αρκετές κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία του προηγούμενου αιώνα έχουν κατασκευαστεί με χρήση διαφορετικών κανονισμών ή και εμπειρικά. Επίσης, η φέρουσα τοιχοποιία είναι ψαθυρό υλικό με χαμηλές σχετικά αντοχές με αποτέλεσμα σε σειсмоγενείς περιοχές, όπως ο ελλαδικός χώρος, να παρουσιάζονται φαινόμενα βλαβών, μερικής ή και πλήρους αστοχίας των φορέων από φέρουσα τοιχοποιία.

Για τους δυο παραπάνω λόγους (χρήση παλαιότερων κανονισμών και αδυναμία απόκρισης σε σεισμό) κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη νέων μεθόδων, ελαφρά παρεμβατικών, όπου θα ενισχύσουν την φέρουσα ικανότητα των κατασκευών αυτών.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της μεθόδου ενίσχυσης της φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά. Δύο ευρέως γνωστές μορφές ενίσχυσης με σύνθετα υλικά είναι η FRP ενίσχυση (μήτρα από πολυμερές υλικό οπλισμένη με πλέγματα ινών) και η TRM ενίσχυση (μήτρα από τσιμεντοειδές υλικό οπλισμένη με πλέγματα ινών). Από τα δύο είδη θα εξεταστεί η πιο σύγχρονη TRM ενίσχυση, η οποία προτιμάται λόγω χαμηλότερου κόστους κατασκευής, καλύτερης αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, συμβατότητας με τα υλικά του τοιχώματος (τσιμέντο, τοιχοποιία), ικανότητα χρήσης σε επιφάνειες με υγρασία και σε περιβάλλον με χαμηλές θερμοκρασίες και ικανοποίησης σε μεγάλο βαθμό της ανάγκης της ενίσχυσης της αντοχής της φέρουσας τοιχοποιίας (Raouf et al., 2017 και Kariou et al., 2018). Στο Σχ 1. 1 παρουσιάζεται η διαδικασία ενίσχυσης τοιχώματος με ενίσχυση TRM (Kariou et al., 2018).



Σχ 1. 1 Διαδικασία ενίσχυσης τοιχώματος με ενίσχυση TRM (a) τοίχωμα (b) είσοδος στο τοίχωμα πρώτης στρώσης τσιμεντοειδούς και εν συνέχεια στρώσης πλέγματος ινών από γυαλί (c) είσοδος στο τοίχωμα τελικής στρώσης τσιμεντοειδούς (Καρίου et al., 2018)

1.3 Ερευνητικοί στόχοι

Για την ικανοποίηση του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας τέθηκαν υπό διερεύνηση οι εξής στόχοι:

- Προσομοίωση του δοκιμίου από φέρουσα τοιχοποιία ενισχυμένο με ενίσχυση TRM σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.
- Πραγματοποίηση αναλύσεων του προσομοιώματος και επαλήθευση τους στη βάση πειραματικών αποτελεσμάτων (Καρίου et al., 2018).
- Βιβλιογραφική διερεύνηση της επίδρασης των ιδιοτήτων των υλικών, των διατομών αλλά και των ειδών πεπερασμένων στοιχείων της ενίσχυσης αλλά και του τοιχώματος στην απόκριση του προσομοιώματος μέσω πραγματοποίησης παραμετρικών αναλύσεων.

1.4 Μεθοδολογία

Για την ικανοποίηση των ερευνητικών στόχων επιλέχτηκε ένα πείραμα αναφοράς το οποίο ελέγχει την απόδοση της ενίσχυσης TRM της τοιχοποιίας. Συγκεκριμένα, επιλέχτηκε το πείραμα του ελέγχου του ενισχυμένου δοκιμίου φέρουσας τοιχοποιίας με ενίσχυση TRM σε κάμψη 3 σημείων (Καρίου et al., 2018). Για την προσομοίωση του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω των διαστάσεων της ενίσχυσης TRM (πάχος σημαντικά μικρότερο από μήκος και πλάτος) η ενίσχυση θα προσομοιωθεί σίγουρα με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (για το τοίχωμα είναι πιθανόν αλλά θα εξεταστεί). Για

την καλύτερη κατανόηση των στοιχείων κελυφών και για την μετέπειτα επιλογή του καταλληλότερου, πραγματοποιείται πρώτα η σύγκριση τους μέσω ενός άλλου προσομοιώματος αμφιέριστης πλάκας υπό ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση στο Abaqus. Έπειτα, θα προσομοιωθεί στο Abaqus το προαναφερθέν πείραμα κάμψης 3 σημείων της ενισχυμένης τοιχοποιίας με ενίσχυση TRM, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του τοιχώματος και της ενίσχυσης ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός τύπων πεπερασμένων στοιχείων που προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα και άρα το πραγματικό δοκίμιο (Kariou et al., 2018). Επίσης, για την προσομοίωση των συμπεριφορών και των ιδιοτήτων των υλικών του δοκιμίου, καθώς επίσης και για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων στο Abaqus μεταξύ τους και με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (Kariou et al., 2018) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel.

1.5 Διάρθρωση της εργασίας

Για την πραγματοποίηση της διερεύνησης των στόχων που τέθηκαν στην ενότητα 1.3, η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε 9 κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται η εισαγωγή στα θέματα που καλείται να παρουσιάσει η διπλωματική εργασία. Παρουσιάζεται το υπάρχον πρόβλημα, ο τρόπος αντιμετώπισης που θα μελετηθεί και τα βήματα πραγματοποίησης της μελέτης.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των κελύφων για την όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση τους επειδή αποτελούν το βασικό είδος πεπερασμένων στοιχείων που θα απασχολήσει.

Στο **Κεφάλαιο 3** πραγματοποιείται η προσομοίωση και ελαστική ανάλυση αμφιέριστης πλάκας υπό ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο προσομοιωμένη με πιθανά είδη κελυφωτών πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τα είδη των κελύφων καθώς και θα πραγματοποιηθεί μια πρώτη εκτίμηση για το πιο είναι το πιο κατάλληλο για την μετέπειτα προσομοίωση της ενίσχυσης TRM.

Στο **Κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται η προσομοίωση του δοκιμίου της ενισχυμένης τοιχοποιίας με ενίσχυση TRM με μια στρώση πλέγματος ινών

άνθρακα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Επίσης, στις ενότητες του κεφαλαίου αυτού θα αποφανθεί ο τρόπος σύνδεσης-αλληλεπίδρασης μεταξύ τοιχώματος και ενίσχυσης, καθώς επίσης και ο κατάλληλος συνδυασμός ειδών πεπερασμένων στοιχείων για την ενίσχυση και το τοίχωμα.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η Παραμετρική ανάλυση του ενισχυμένου δοκιμίου με ενίσχυση TRM με 1 στρώση ινών άνθρακα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με το αντίστοιχο πειραματικό αποτέλεσμα (Kariou et al., 2018). Οι εξεταζόμενες μεταβλητές είναι: γωνία τριβής τοιχοποιίας, γωνία τριβής τσιμεντοειδούς, θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας, θλιπτική αντοχή τσιμεντοειδούς, εφελκυστική αντοχή τσιμεντοειδούς, προσομοίωση ινών άνθρακα και στρώσεις ινών άνθρακα.

Στο **Κεφάλαιο 6** στο προσομοίωμα θα μεταβληθεί το είδος ενίσχυσης TRM (διαφορετικό υλικό ινών, διαφορετικό αριθμό στρώσεων ινών και διαφορετικό πάχος ενίσχυσης) ή θα διπλασιαστεί το πάχος της τοιχοποιίας ή και τα δύο. Έπειτα, θα πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις των νέων προσομοιωμάτων και στην συνέχεια η σύγκριση των νέων αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (Kariou et al., 2018).

Στο **Κεφάλαιο 7** θα γίνει επανάληψη των βασικών παραμετρικών αναλύσεων των κεφαλαίων 5 και 6 αλλά με πλήρης τρισδιάστατο και με χρήση στοιχείων κελύφους μοντέλο: Ενίσχυση με στοιχεία συνεχούς κελύφους (continuum shell), τοίχωμα με στοιχεία συνεχούς συμπαγούς κελύφους (continuum solid shell). Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα των κεφαλαίων 5 και 6, καθώς και με τα αντίστοιχα πειραματικά (Kariou et al., 2018), ώστε να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια τελική σύνοψη και κατανόηση των εξαχθέντων συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας ενώ θα καταγραφούν και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

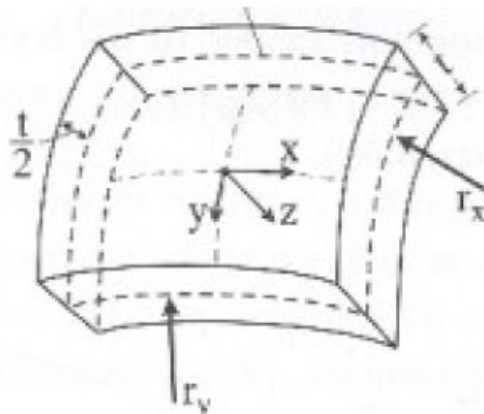
Στο **Κεφάλαιο 9** υπάρχει όλο το βιβλιογραφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

2 Πεπερασμένα στοιχεία κελυφών

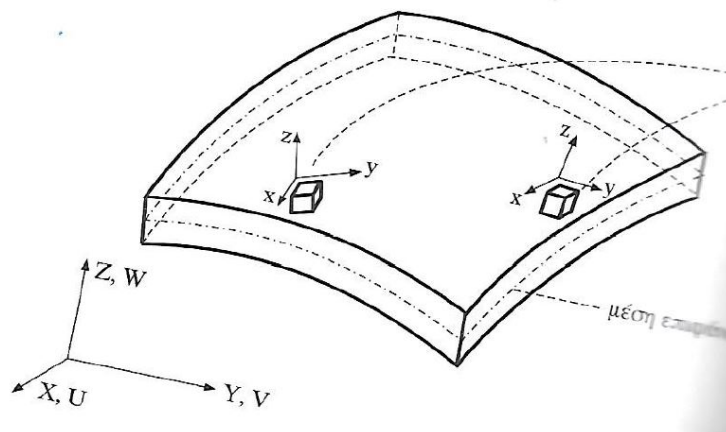
2.1 Ορισμός κελύφους

Τα κελύφη είναι λεπτοί καμπύλοι επιφανειακοί φορείς στα οποία το πάχος t είναι πολύ μικρότερο της ακτίνας καμπυλότητας r . Το πάχος τους επίσης είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από τις διαστάσεις του μήκους και του πλάτους τους. Παραδείγματα φορέων ή τμημάτων φορέων από κελύφη αποτελούν οι τρούλοι ναών, οι κυλινδρικές οροφές, τα σιλό, οι δεξαμενές και οι ενισχύσεις τοιχωμάτων. Για να μελετηθούν ορθώς τα κελύφη, αναγκαία είναι η γνώση της γεωμετρίας του σχήματος τους. Αυτή περιγράφεται από μία συνάρτηση $F(x,y,z)$ της μέσης επιφάνειας η οποία ορίζεται ως η επιφάνεια που διχοτομεί σε κάθε σημείο το πάχος t του κελύφους (Τσαπρούνης, 2017). Στα Σχ 2. 1 Α) και Β) παρουσιάζονται τα στοιχεία κελύφους εικονικά.

A)



B)



Σχ 2. 1Α) (Τσαπρούνης, 2017),Β) (Παπαδρακάκης, 2001) Στοιχείο κελύφους

2.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΕΛΥΦΩΝ

Υπάρχουν πολλές θεωρίες κελυφών, ανάλογα με τις παραδοχές που υιοθετούνται. Η γνωστή ως κλασσική θεωρία κελυφών αντιστοιχεί στα λεπτά κελύφη, στα οποία ισχύει ότι η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση θεωρείται αμελητέα. Όσο αναφορά τα παχιά κελύφη, σε αυτά λαμβάνονται υπόψιν και οι εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις και, μερικές φορές, η ύπαρξη της ανοιγμένης παραμόρφωσης ϵ_z (Παπαδρακάκης, 2001).

Η μελέτη των λεπτών κελυφών βασίζεται σε δύο βασικές παραδοχές (Τσαπρούνης, 2017):

→Ισχύει η θεωρία των μικρών μετακινήσεων, δηλαδή οι μετακινήσεις είναι τόσο μικρές ώστε μεταβολές στη γεωμετρία του κελύφους να μην αλλάζουν τις συνθήκες ισορροπίας του συστήματος.

→Ισχύει η γραμμική θεωρία ελαστικότητας.

Επιπλέον πραγματοποιούνται οι εξής παραδοχές (Τσαπρούνης, 2017):

1 Οι μετακινήσεις είναι πολύ μικρές σε σχέση με το πάχος του κελύφους.

2 Επίπεδες διατομές κάθετες στη μέση επιφάνεια παραμένουν επίπεδες και κάθετες και στη μέση επιφάνεια της παραμορφωμένης κατάστασης. Έτσι οι διατμητικές παραμορφώσεις γ_{xz} , $\gamma_{yz} \approx 0$.

3 Οι ϵ_z , σ_z θεωρούνται αμελητέες.

2.3 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΕΣ ΤΜΗΜΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Το κέλυφος μπορεί και συνδυάζει τη συμπεριφορά της πλάκας, ως προς την συμπεριφορά σε κάμψη, και την συμπεριφορά του δίσκου ως προς την μεμβρανική συμπεριφορά. Για το κέλυφος, οι καμπτικές τάσεις αντιστοιχούν στις καμπτικές τάσεις της πλάκας και προκαλούν τις καμπτικές ροπές, τις ροπές συστροφής και τις τέμνουσες δυνάμεις του κελύφους:

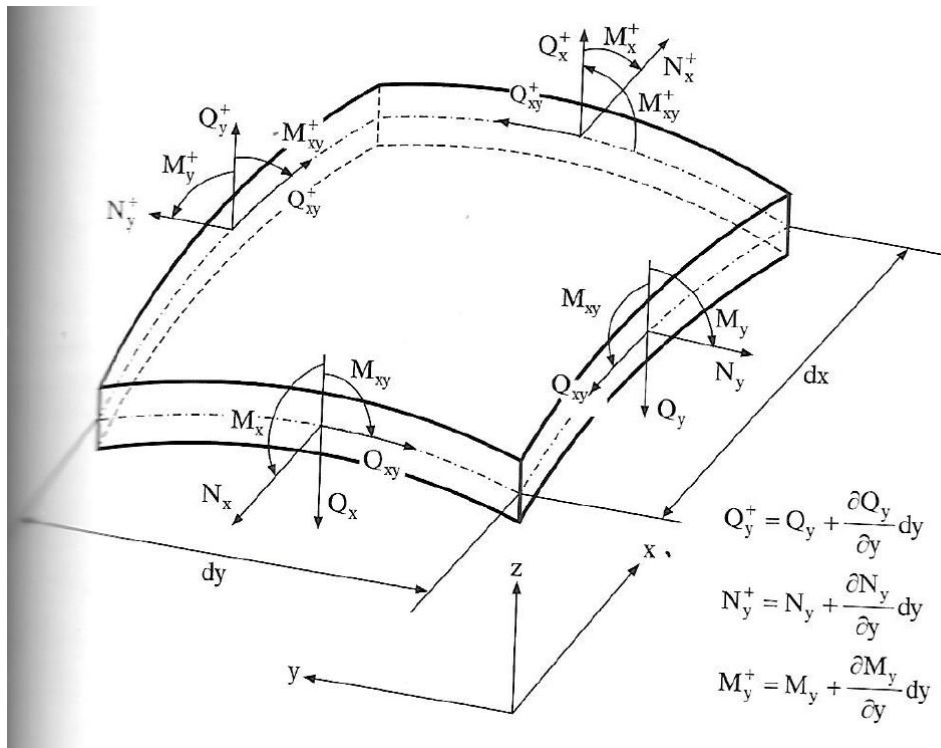
$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z \, dz \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z \, dz \quad M_{xy} = M_{yx} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z \, dz$$

$$Q_x = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{zx} \, dz \quad Q_y = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{yz} \, dz$$

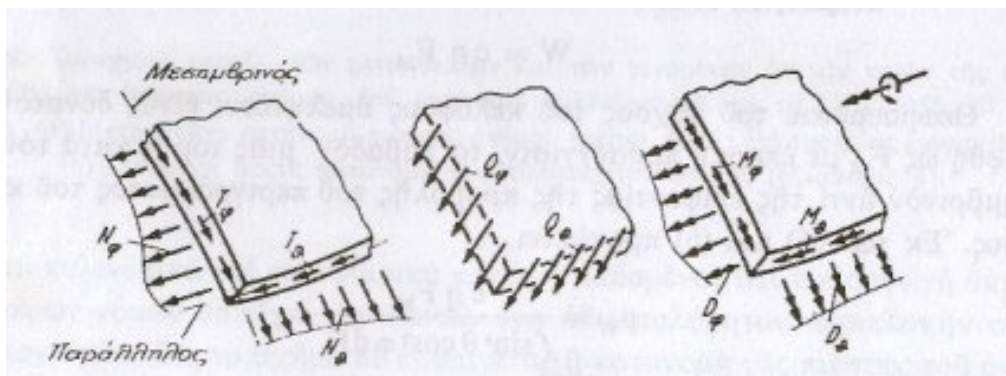
Αντίστοιχα, οι μεμβρανικές τάσεις αντιστοιχούν προς τις τάσεις ενός προβλήματος επίπεδης έντασης, δρουν στο εφαπτομενικό επίπεδο της μέσης επιφάνειας και προκαλούν εφαπτομενικές δυνάμεις. Οι τάσεις σ_z είναι, όπως και στην πλάκα, πολύ μικρότερες των σ_x , σ_y και συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη (Παπαδρακάκης, 2001):

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \quad Q_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} dz$$

Στο Σχ 2. 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα εντατικά μεγέθη ανά μονάδα μήκους του κελύφους, ενώ στο Σχ 2. 3 παρουσιάζονται οι εσωτερικές δυνάμεις στο κέλυφος χωριστά σε (α) Ορθές και διατμητικές δυνάμεις (β) Τέμνουσες δυνάμεις (γ) Ροπές κάμψης και συστροφής.



Σχ 2. 2 Εντατικά μεγέθη ανά μονάδα μήκους του κελύφους (Παπαδρακάκης, 2001)



Σχ 2. 3 Κατανεμημένες εσωτερικές δυνάμεις σε κέλυφος (α) Ορθές και διατμητικές δυνάμεις (β) Τέμνουσες δυνάμεις (γ) Ροπές κάμψης και συστροφής (Τσαπρούνης, 2017)

Αναλύοντας τις εσωτερικές δυνάμεις στο Σχ 2. 3 (Τσαπρούνης, 2017):

Κατανεμημένες ορθές δυνάμεις: $N_{\theta}, N_{\phi} \rightarrow \left[\frac{\delta \nu \alpha \mu \eta}{\mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma} \right]$

Κατανεμημένες εφαπτομενικές διατμητικές δυνάμεις: $T_{\theta}, T_{\phi} \rightarrow \left[\frac{\delta \nu \alpha \mu \eta}{\mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma} \right]$

Κατανεμημένες τέμνουσες δυνάμεις: $Q_{\theta}, Q_{\phi} \rightarrow \left[\frac{\delta \nu \alpha \mu \eta}{\mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma} \right]$

Κατανεμημένες ροπές κάμψης: $M_{\theta}, M_{\phi} \rightarrow \left[\frac{\delta \nu \alpha \mu \eta \times \mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma}{\mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma} \right]$

Κατανεμημένες ροπές συστροφής: $D_{\theta}, D_{\phi} \rightarrow \left[\frac{\delta \nu \alpha \mu \eta \times \mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma}{\mu \acute{\eta} \kappa \omicron \varsigma} \right]$

Αυτές οι δυνάμεις και ροπές παρουσιάζονται με τη θετική φορά τους. Η θετική φορά προσδιορίζεται βασιζόμενη στην φυσική σημασία των πρόσημων. Για παράδειγμα, οι ορθές θετικές δυνάμεις είναι αυτές που εφελκύνουν το κέλυφος (εφελκυστικές). Στα κελύφη προτείνεται διαφοροποίηση μεταξύ των εφαπτομενικών διατμητικών δυνάμεων και των τεμνουσών, παρόλο που στους γραμμικούς φορείς και οι δύο αποκαλούνται είτε τέμνουσες είτε διατμητικές δυνάμεις. Σύμφωνα με το Σχ 2. 3 , οι εφαπτομενικές διατμητικές δυνάμεις ενεργούν εντός της μέσης επιφάνειας και τείνουν να παραμορφώσουν ένα ιδεατό στοιχειώδες ορθογώνιο, που βρίσκεται πάνω στην τομή αυτής της επιφάνειας, σε λοξό παραλληλόγραμμο. Αντίθετα, οι κατανεμημένες τέμνουσες είναι συνισταμένες διατμητικές τάσεις, που ενεργούν κάθετα στη μέση επιφάνεια. Τέλος, στο Σχ 2. 3 (γ), οι κατανεμημένες ροπές προσομοιώνονται με διανύσματα με διπλό βέλος, για να διακρίνονται από τα διανύσματα των δυνάμεων, τα οποία παριστάνονται με μονό βέλος (Τσαπρούνης, 2017).

2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

Τρεις είναι οι κατηγορίες που χωρίζονται τα πεπερασμένα στοιχεία κελυφών (Παπαδρακάκης, 2001):

1. Επίπεδα στοιχεία κελυφών: Αυτά συνδυάζουν τις ιδιότητες ενός στοιχείου επίπεδης έντασης και ενός στοιχείου πλάκας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα επίπεδα τριγωνικά

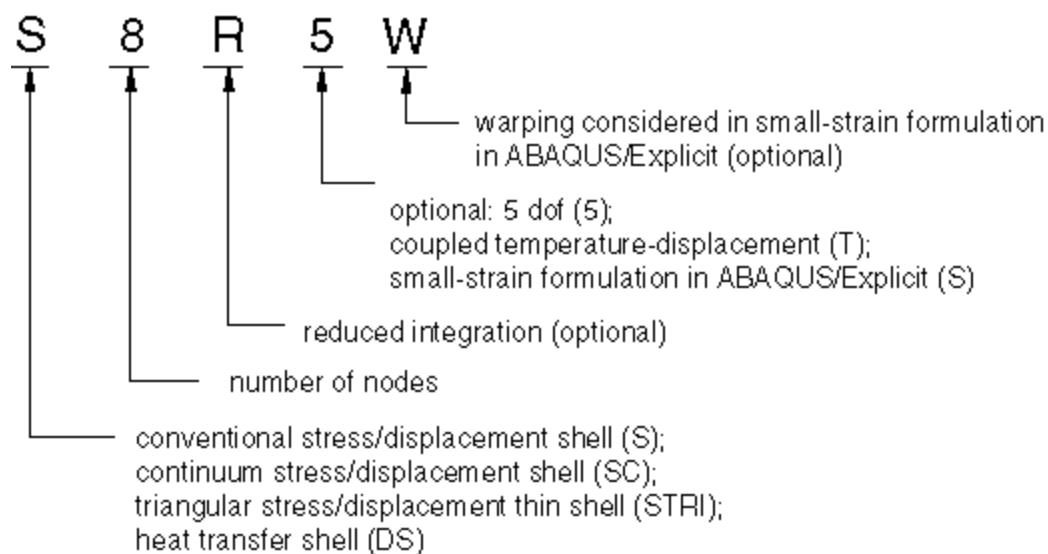
στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία προσομοιώνουν τα κελύφη ως πολυεδρικές επιφάνειες, διατυπώνουν τις χαρακτηριστικές τους εξισώσεις σχετικά απλά, καλύπτουν τον έλεγχο συρραφής και δεν παραμορφώνονται κατά την μετατόπισή τους ως στερεά σώματα. Από την άλλη μεριά όμως, συνήθως δεν μπορούν να προσομοιώσουν την σύζευξη των καμπτικών και των μεμβρανικών παραμορφώσεων που υπάρχει σε όλα τα σημεία του κελύφους. Παρόλα αυτά, επιτυγχάνεται κάποια μορφή σύζευξη κατά την μόρφωση του μητρώου στιβαρότητας του φορέα, και έτσι αμβλύνεται η αδυναμία προσομοίωσης της σύζευξης της μεμβρανικής και καμπτικής συμπεριφοράς σε κάθε στοιχείο χωριστά.

2. Καμπύλα στοιχεία κελυφών: Αποτελούν μια αυστηρή θεώρηση της κλασσικής θεωρίας κελυφών. Τα καμπύλα πεπερασμένα στοιχεία παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια, η οποία κυμαίνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της θεωρίας κελυφών που χρησιμοποιούν. Η διατύπωση όμως των χαρακτηριστικών εξισώσεων τους, στην οποία εμπλέκεται και η καμπύλη γεωμετρία του κελύφους, είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και δύσκολη.
3. Εκφυλισμένα στοιχεία κελυφών: Πρόκειται για εκφυλισμό ως προς τη διεύθυνση του άξονα z , πεπερασμένων στοιχείων τρισδιάστατης ελαστικότητας. Τα στοιχεία που προκύπτουν από εκφυλισμό πεπερασμένων στοιχείων τρισδιάστατης ελαστικότητας βασίζονται στην ισοπαραμετρική θεώρηση, δύνανται να λαμβάνουν υπόψη τις εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις και μπορούν να έχουν καμπύλη μέση επιφάνεια. Τα εκφυλισμένα στοιχεία κελυφών βρίσκονται ανάμεσα των άλλων δύο τύπων στοιχείων ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την ευκολία στη χρήση τους.

2.5 ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ

Οι συμβάσεις των πεπερασμένων στοιχείων των κελυφών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus (το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί για την εκπόνηση της μελέτης) παρουσιάζονται παρακάτω:

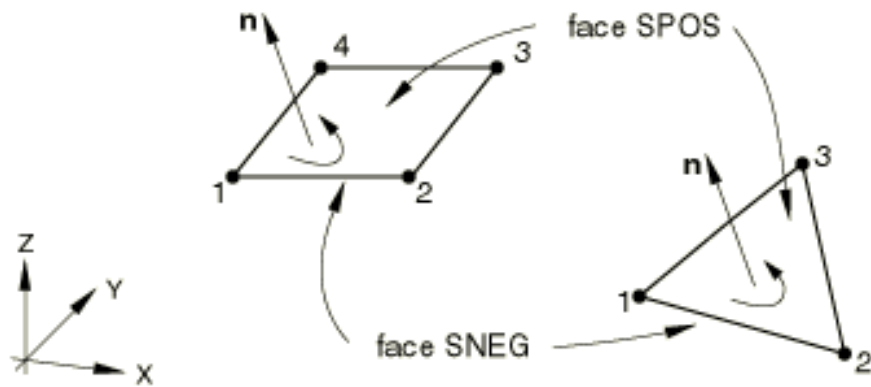
A) Το όνομα των στοιχείων κελύφους εξαρτάται από τη διάσταση του στοιχείου και πραγματοποιείται σύμφωνα με το Σχ 2. 4



Σχ 2. 4 Σύμβαση ονομασίας στοιχείων κελύφους

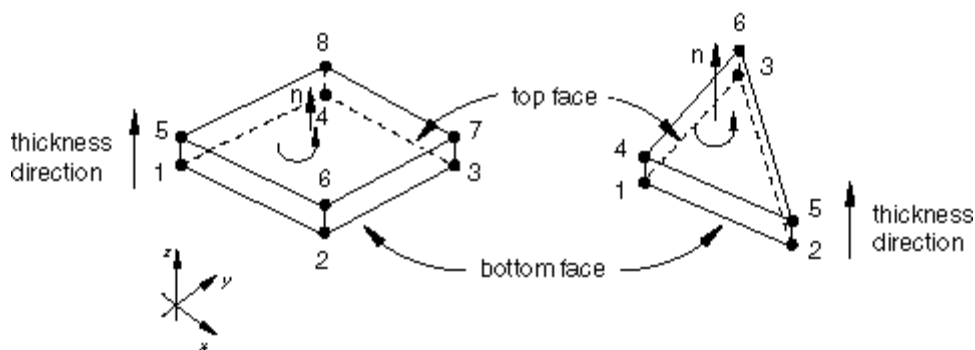
Για παράδειγμα, το S4R είναι ένα στοιχείο κελύφους 4 κόμβων, τετράπλευρο, τάσης/μετατόπισης με μειωμένη ολοκλήρωση και σύνθεση μεγάλης τάσης, ενώ το SC8R είναι ένα στοιχείο κελύφους συνεχούς τάσης/μετατόπισης 8 κόμβων, τετράπλευρο, πρώτης τάξης, με μειωμένη ολοκλήρωση.

Β) «Επάνω» επιφάνεια ενός συμβατικού στοιχείου κελύφους ονομάζεται η επιφάνεια στη θετική κανονική κατεύθυνση και περιγράφεται ως θετική (SPOS) όψη για τον ορισμό επαφής. Αντίστοιχα η «κάτω» επιφάνεια βρίσκεται στην αρνητική κατεύθυνση κατά μήκος της κανονικής και περιγράφεται ως αρνητική (SNEG) όψη για τον ορισμό επαφής. Το θετικό και το αρνητικό χρησιμοποιούνται επίσης για τον προσδιορισμό της επάνω και της κάτω επιφάνειας όταν καθορίζονται οι μετατοπίσεις της επιφάνειας αναφοράς από τη μεσαία επιφάνεια του κελύφους. Η SPOS ορίζει τη σύμβαση για την εφαρμογή φορτίου πίεσης και την παραγωγή ποσοτήτων που ποικίλλουν ανάλογα με το πάχος του κελύφους. Ένα φορτίο θετικής πίεσης που εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο κελύφους παράγει ένα φορτίο που δρα προς την κατεύθυνση της θετικής κανονικής. Για τρισδιάστατα συμβατικά κελύφη το θετικό κανονικό βρίσκεται σύμφωνα με το Σχ 2. 5.



Σχ 2. 5 Θετικά κανονικά για τρισδιάστατα συμβατικά κελύφη

Γ) Όσο αναφορά τα συνεχή κελύφη, η επάνω και η κάτω όψη του στοιχείου και, ως εκ τούτου, η κανονική, η κατεύθυνση στοίβαξης και η κατεύθυνση του πάχους του στοιχείου ορίζονται από την κομβική συνδεσιμότητα. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το Σχ 2. 6, για το τριγωνικό στοιχείο συνεχούς κελύφους εντός επιπέδου (SC6R) η όψη με τους γωνιακούς κόμβους 1, 2 και 3 είναι η κάτω όψη και η όψη με τους γωνιακούς κόμβους 4, 5 και 6 είναι η επάνω όψη, ενώ για το στοιχείο τετράπλευρου συνεχούς κελύφους (SC8R), η όψη με τους γωνιακούς κόμβους 1, 2, 3 και 4 είναι η κάτω όψη και η όψη με τους γωνιακούς κόμβους 5, 6, 7 και 8 είναι η επάνω όψη. Η κατεύθυνση στοίβαξης και η κατεύθυνση του πάχους ορίζονται και οι δύο ως η κατεύθυνση από την κάτω όψη προς την επάνω όψη.



Σχ 2. 6 Προεπιλεγμένες κανονικές τιμές και κατεύθυνση πάχους για στοιχεία συνεχούς κελύφους.

Δ) Στα συμβατικά κελύφη, η τάση στην κατεύθυνση του πάχους λαμβάνεται ίση με μηδέν και η παραμόρφωση προκύπτει μόνο από το φαινόμενο Poisson. Όμως, για τα συνεχή κελύφη, η τάση στην κατεύθυνση του πάχους μπορεί να μην ισούται με μηδέν, ενώ μπορεί να

προκαλέσει επιπλέον καταπόνηση πέραν αυτής λόγω του φαινομένου του Poisson. Η καταπόνηση του πάχους λόγω του φαινομένου του Poisson ονομάζεται "παραμόρφωση Poisson", ενώ οποιαδήποτε άλλη πρόσθετη τάση ονομάζεται "αποτελεσματική καταπόνηση πάχους".

2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Τα στοιχεία κελύφους χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση κατασκευών στις οποίες η μία διάσταση (πάχος) είναι σημαντικά μικρότερη από τις άλλες διαστάσεις (μήκος, πλάτος). Τα στοιχεία συμβατικού κελύφους (Conventional shell elements) χρησιμοποιούν αυτή τη συνθήκη για να διακριτοποιήσουν έναν φορέα ή τμήμα φορέα ορίζοντας τη γεωμετρία σε μια επιφάνεια αναφοράς. Τότε, το πάχος ορίζεται μέσω του ορισμού της ιδιότητας του τμήματος. Τα συμβατικά στοιχεία κελύφους έχουν μεταφορικούς και στρεπτικούς βαθμούς ελευθερίας. Χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή τρισδιάστατης και αξονικής συμμετρικής ανάλυσης, στατικής και δυναμικής ανάλυσης. Μερικά στοιχεία δύνανται να περιλάβουν την επίδραση της εγκάρσιας διατμητικής παραμόρφωσης και της αλλαγής πάχους. Μερικά στοιχεία επιτρέπουν μεγάλες περιστροφές και πεπερασμένη παραμόρφωση μεμβράνης, ενώ άλλα επιτρέπουν μεγάλες περιστροφές αλλά μικρές παραμορφώσεις. Το Abaqus περιλαμβάνει συμβατικά στοιχεία κελύφους γενικής χρήσης, χονδρού και λεπτού κελύφους.

Τα συμβατικά στοιχεία κελύφους γενικής χρήσης (general-purpose conventional shell elements) είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο, επειδή παρέχουν ορθές και ακριβείς λύσεις στις περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ανάλυση με τα λεπτά ή παχιά συμβατικά στοιχεία κελύφους. Τα συμβατικά στοιχεία κελύφους γενικής χρήσης επιτρέπουν την εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση.

Τα χονδρά συμβατικά στοιχεία κελύφους (thick conventional shell elements) χρειάζονται στην περίπτωση όπου η ευκαμψία εγκάρσιας διάτμησης είναι σημαντική και χρειάζεται η παρεμβολή δεύτερης τάξης.

Τα λεπτά συμβατικά στοιχεία κελύφους (thin conventional shell elements) χρειάζονται στην περίπτωση όπου η ευκαμψία εγκάρσιας διάτμησης είναι

αμελητέα και πρέπει το κέλυφος να παραμένει ορθογώνιο ως προς την επιφάνεια αναφοράς του (περιορισμός Kirchhoff).

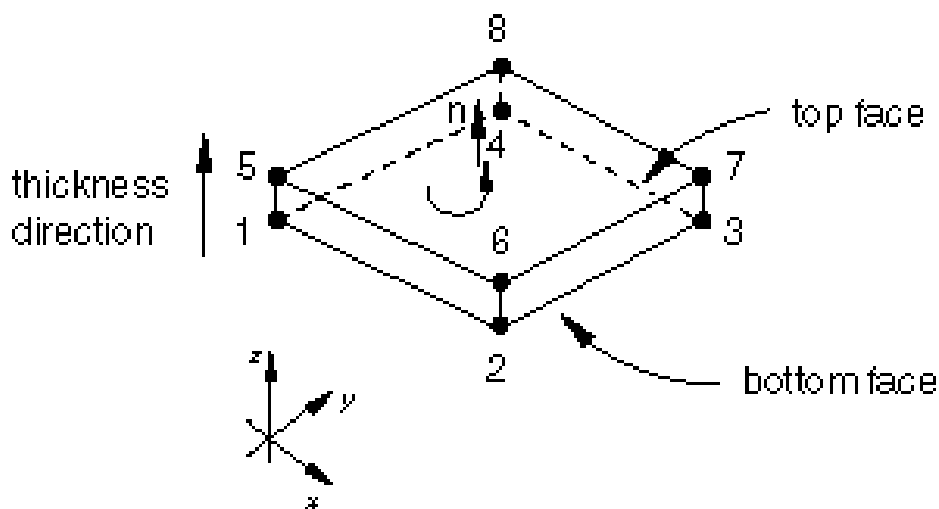
Τα στοιχεία συνεχούς κελύφους (continuum shell elements) διακριτοποιούν ένα ολόκληρο τρισδιάστατο σώμα, σε αντίθεση με τα συμβατικά κελύφη που διακριτοποιούν μια επιφάνεια αναφοράς. Το πάχος καθορίζεται από την κομβική γεωμετρία του στοιχείου. Ως προς την προσομοίωση, τα στοιχεία συνεχούς κελύφους μοιάζουν με τρισδιάστατα συνεχή στερεά, αλλά η κινηματική και δομική συμπεριφορά τους είναι παρόμοια με τα στοιχεία συμβατικού κελύφους. Τα στοιχεία συνεχούς κελύφους έχουν μόνο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας, σε αντίθεση με τα συμβατικά κελύφη, που έχουν μεταφορικούς και στρεπτικούς βαθμούς ελευθερίας. Πρόκειται για στοιχεία κελύφους γενικής χρήσης, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τρισδιάστατη ανάλυση. Χρησιμοποιούν γραμμική παρεμβολή και χρησιμοποιούνται για στατικές και δυναμικές αναλύσεις. Επιτρέπουν πεπερασμένη παραμόρφωση μεμβράνης και μεγάλες περιστροφές, οπότε είναι κατάλληλα για μη γραμμική γεωμετρική ανάλυση. Μπορούν να συμπεριλάβουν τις επιπτώσεις της εγκάρσιας διατμητικής παραμόρφωσης και της αλλαγής πάχους. Μπορούν να στοιβάζονται για να παρέχουν πιο εκλεπτυσμένη απόκριση διαμέσου πάχους, κάτι που δεν δύνανται τα συμβατικά στοιχεία κελύφους. Η στοιβάξη στοιχείων συνεχούς κελύφους επιτρέπει πλουσιότερη πρόβλεψη εγκάρσιας διατμητικής τάσης και δύναμης.

Αν και τα στοιχεία συνεχούς κελύφους διακριτοποιούν ένα τρισδιάστατο τμήμα ή φορέα, θα πρέπει να εξεταστεί αν η συνολική παραμόρφωση που υφίστανται αυτά τα στοιχεία είναι σύμφωνη με την παραδοχή επίπεδης τάσης τους ως προς το στρώμα. Η απόκριση πρέπει να κυριαρχεί στην κάμψη και να μην παρατηρείται σημαντική αλλαγή πάχους (<10% αλλαγή πάχους). Σε διαφορετική περίπτωση, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κανονικά τρισδιάστατα στερεά στοιχεία.

2.7 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Για προσομοιώματα λεπτών φορέων που απαιτούν τρισδιάστατη συμπεριφορά στερεού, προτείνεται το στοιχείο συνεχούς συμπαγούς κελύφους (Continuum solid shell elements). Τα στοιχεία αυτά συνδυάζουν τις ιδιότητες των στερεών στοιχείων να χρησιμοποιούν τρισδιάστατους

δομικούς νόμους και των στοιχείων συνεχούς κελύφους να έχουν πολύ καλή απόκριση κάμψης για μεγάλους λόγους διαστάσεων. Τα στοιχεία αυτά είναι κατάλληλα για λεπτές δομικές εφαρμογές, απλές και σύνθετες, όπου χρειάζεται μια πλήρη τρισδιάστατη δομική απόκριση. Έχουν μόνο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας και είναι πλήρως συμβατά με τα κανονικά στοιχεία συνεχούς ροής. Χρησιμοποιούν πλήρη ενοποίηση και δεν έχουν λειτουργίες κλεψύδρας. Στο Σχ 2. 7 απεικονίζεται μια χαρακτηριστική προσομοίωση στοιχείου συνεχούς συμπαγούς κελύφους. Οι επάνω και κάτω όψεις του στοιχείου (άρα και το κανονικό στοιχείο, η κατεύθυνση στοίβαξης και το πάχος) ορίζονται από την κομβική συνδεσιμότητα. Η όψη με τους γωνιακούς κόμβους 1, 2, 3 και 4 αποτελεί την κάτω όψη και η όψη με τους γωνιακούς κόμβους 5, 6, 7 και 8 αποτελεί την επάνω όψη. Η κατεύθυνση στοίβαξης και η κατεύθυνση του πάχους θέτονται και οι δύο ως η κατεύθυνση από την κάτω προς την επάνω όψη. Η κατεύθυνση του πάχους και η κατεύθυνση στοίβαξης πρέπει πάντα να βρίσκονται στην τρίτη κατεύθυνση των ισοπαραμετρικών κατευθύνσεων του στοιχείου.



Σχ 2. 7 Κανονική κατεύθυνση και κατεύθυνση πάχους για στοιχεία συνεχούς συμπαγούς κελύφους.

3 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΑΠΟ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Για την καλύτερη κατανόηση των διαφορετικών στοιχείων κελύφους αλλά και για την σύγκριση μεταξύ τους θα πραγματοποιηθεί ελαστική ανάλυση μιας αμφιέριστης πλάκας με διαφορετικά στοιχεία κελύφους στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Το Abaqus εμπεριέχει εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων έτσι ώστε να μπορεί να προσομοιώσει οποιαδήποτε γεωμετρία. Επίσης έχει την δυνατότητα χρήσης αρκετών διαφορετικών επιλογών υλικών για προσομοίωση της συμπεριφοράς των πιο τυπικών από αυτά, όπως μέταλλα, ελαστικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα και γεωτεχνικά υλικά όπως είδη εδαφών και βράχος. Τέλος έχει μεγάλο φάσμα δυνατοτήτων για προσομοίωση γραμμικών και μη γραμμικών εφαρμογών, ενώ δύναται να πραγματοποιήσει στατικές και δυναμικές αναλύσεις.

Η διέριστη πλάκα που προσομοιώνεται έχει διαστάσεις (10m X 2m) και πάχος 0.15m. Το υλικό της είναι σκυρόδεμα με μέτρο ελαστικότητας $E=30\text{GPa}$ και αριθμός Poisson $\nu=0.2$. Η πλάκα είναι διέριστη ως προς τις μεγάλες τις πλευρές (αμφιέριστη, σε αυτές δεσμεύονται οι μετατοπίσεις $u_1=u_2=u_3=0$). Της επιβάλλεται επίπεδο κατανεμημένο φορτίο πίεσης $p=5\text{kN/m}^2$ σε όλη της την επιφάνεια. Η διατομή της θα είναι κέλυφος (shell) ομογενές όταν θα προσομοιώσει συμβατικά ή συνεχή κελύφη, όμως η διατομή θα είναι στερεή (solid) ομογενής όταν θα προσομοιώσει στοιχεία συνεχούς συμπαγούς κελύφους. Τέλος σε κάθε διατομή θα εφαρμοστούν 5 διαφορετικές διακριτοποιήσεις (0.5x0.5, 0.25x0.25, 0.15x0.15, 0.1x0.1, 0.05x0.05) με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διακριτοποίησης στο κάθε είδος κελύφους (μεγέθη διακριτοποιημένων στοιχείων σε m).

Δοκιμάζοντας και τις 5 διακριτοποιήσεις στα παρακάτω στοιχεία κελυφών παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτοποίηση τόσο περισσότερο συγκλίνουν τα αποτελέσματα, με κάποια μάλιστα να ταυτίζονται τελείως. Για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τις δυνατότητες του εκάστοτε κελύφους θα παρατεθούν οι όποιες αποκλίσεις έχει η διακριτοποίηση 0.05x0.05 από την διακριτοποίηση 0.1x0.1 στα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη, μετατοπίσεις και στροφές. Ενδεικτικά αναφέρονται (ο άξονας 1 είναι παράλληλος-αντιστοιχεί στον X, ο 2 στον Y και ο 3 στον Z):

SF1: Συνισταμένη δύναμη (αξονική) κατά την διεύθυνση 1 (διεύθυνση X)

SM2: Καμπτική ροπή στην διατομή περί τον άξονα 2 (άξονας Y)

SM3: Καμπτική ροπή στην διατομή περί τον άξονα 3 (άξονας Z)

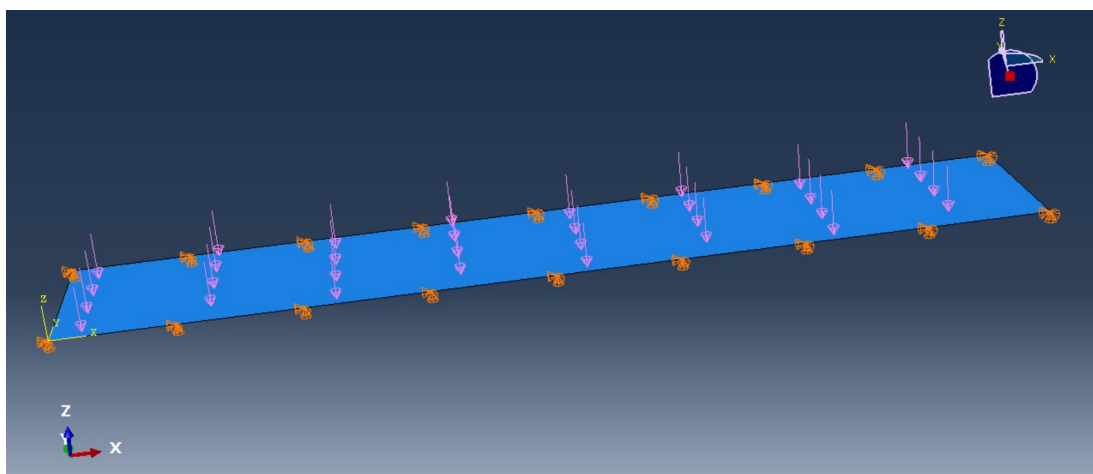
S11: Ορθές τάσεις στην διαμήκη διεύθυνση X

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι m, N, Nm και Pa.

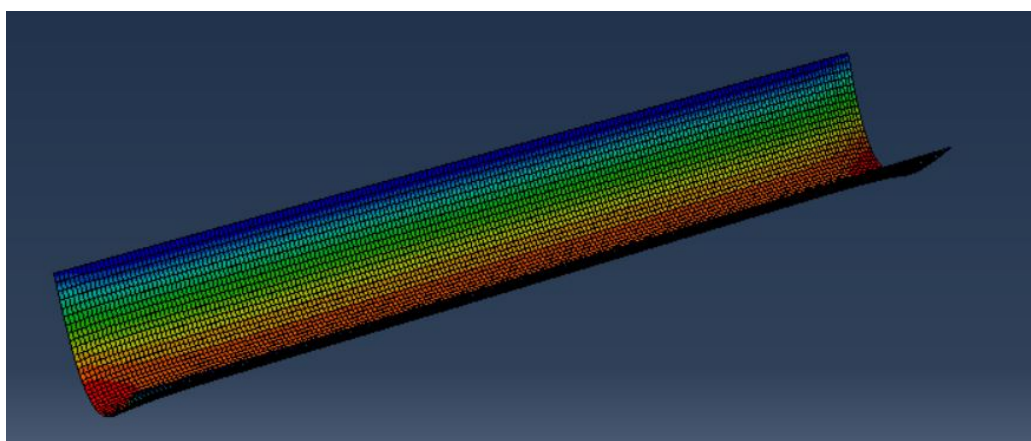
3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

Από το Σχ 3. 1 A) και B) παρατηρείται ότι η πλάκα που προσομοιώνεται με τη χρήση στοιχείων συμβατικών κελυφών (conventional shell) προσομοιώνεται σαν δισδιάστατη, κάτι που είναι σύμφωνο με την θεωρία των συμβατικών κελυφών σύμφωνα με την οποία η γεωμετρία ενός τμήματος ορίζεται σε μια επιφάνεια αναφοράς και το πάχος ορίζεται μέσω του ορισμού της ιδιότητας του τμήματος (ενότητα 2.6).

A)



B)



Σχ 3. 1 Α),Β) Προσομοίωση αμφιέριστης πλάκας με χρήση στοιχείων συμβατικών κελύφων

Η ανάλυση της αμφιέριστης πλάκας με χρήση συμβατικών κελύφων έχει 3 επιλογές κελυφών:

Α) S4R: Τετρακομβικό, τετραπλευρικό λεπτό ή παχύ κέλυφος τάσης/μετατόπισης με μειωμένης τάξης ολοκλήρωση και σύνθεση μεγάλης τάσης.

Β) S4: Τετρακομβικό, τετραπλευρικό γενικής χρήσης κέλυφος τάσης/μετατόπισης και σύνθεση μεγάλης τάσης.

Γ) S8R: Οκτακομβικό, τετραπλευρικό, παραβολικό, παχύ κέλυφος τάσης/μετατόπισης με μειωμένης τάξης ολοκλήρωση.

Συγκρίνοντας τη διακριτοποίηση 0.1x0.1 σε σχέση με την αντίστοιχη διακριτοποίηση 0.05x0.05 (η Απόκλιση υπολογίζεται:

$A(\%) = (EM_{0.05} - EM_{0.1}) / EM_{0.05} * 100(\%)$ όπου EM: Εντατικό Μέγεθος παρατηρείται:

A)S4R: (S33=SF6=0,SF1,SF2,SF3,U1,U2,UR3≈0)

| | | |
|-----------------|------------------|-----------------|
| S11→A(%)=0.377% | S22→A(%)=0.375% | S12→A(%)=0.92% |
| SF4→A(%)=1.845% | SF5→A(%)=-0.334% | SM2→A(%)=0.375% |
| SM1→A(%)=0.377% | SM3→A(%)=0.92% | U3→A(%)=0.295% |
| UR1→A(%)=0.136% | UR2→A(%)=0.617% | |

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

-Τα mesh 0.05x0.05 και 0.1x0.1 έχουν σχεδόν απόλυτη σύγκλιση

-S22 (+)και SM2 (-) δεν αλλάζουν πρόσημο ΟΥΤΕ για mesh 0.01x0.01

-Για mesh 0.2x0.2 δεν αλλάζει πρόσημο ούτε το S11

-Για mesh 0.2x0.1 (πρώτος αριθμός κατά x δεύτερος κατά γ) μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στο SF4 με A(%)=-12.4%, τα άλλα είναι κατά απόλυτη τιμή A<10%

Β) S4: (S33,SF6=0,SF1,SF2,SF3,U1,U2,UR3≈0)

| | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| S11→A(%)=0.377% | S22→A(%)=0.375% | S12→A(%)=0.729% |
| SF4→A(%)=1.837% | SF5→A(%)=-0.0004% | SM2→A(%)=0.375% |

SM1→A(%)=0.377% SM3→A(%)=0.729% U3→A(%)=0.295%

UR1→A(%)=0.136% UR2→A(%)=0.772%

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

-Τα mesh 0.05x0.05 και 0.1x0.1 έχουν σχεδόν απόλυτη σύγκλιση

-S22 (+)και SM2 (-) δεν αλλάζουν πρόσημο ΟΥΤΕ για mesh 0.01x0.01

-Για mesh 0.15x0.1 δεν αλλάζει πρόσημο ούτε το SM1 με

min=-0.43 Nm ≈0 ενώ δεν αλλάζει πρόσημο ούτε το S11

Γ)S8R: (S33=0,SF1,SF2,SF3,U1,U2,UR3≈0, δεν παρουσιάζεται SF6)

S11→A(%)=-0.125% S22→A(%)=-0.125% S12→A(%)=-0.179%

SF4→A(%)=0.031% SF5→A(%)=0% SM2→A(%)=-0.125%

SM1→A(%)=-0.125% SM3→A(%)=-0.179% U3→A(%)=-0.0008%

UR1→A(%)=0% UR2→A(%)=0%

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

-Τα mesh 0.05x0.05 και 0.1x0.1 έχουν σχεδόν απόλυτη σύγκλιση

-S22 και SM2 ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΠΡΟΣΗΜΟ στα mesh 0.05x0.05 και 0.1x0.1

-Για mesh 0.2x0.2 μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στο SM3 με

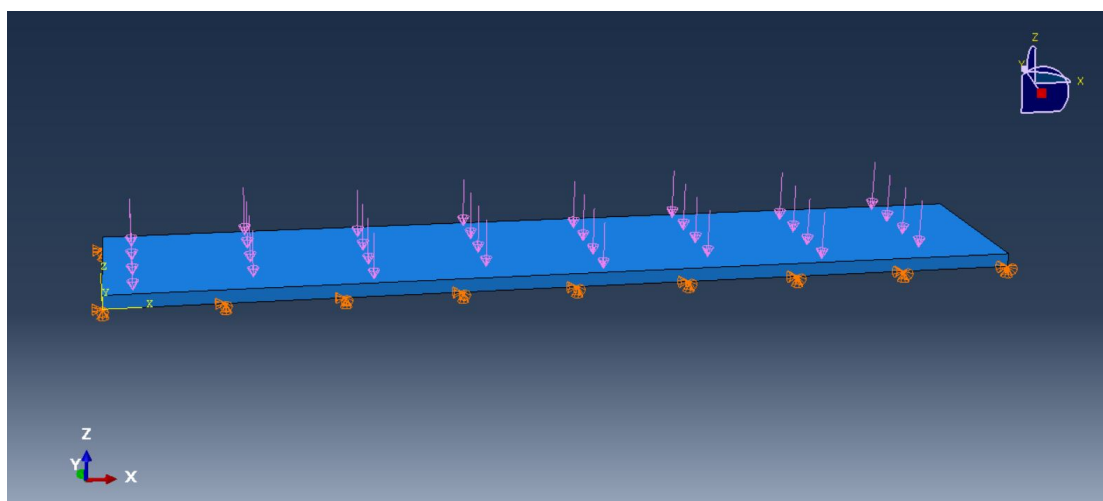
A(%)=-3.327%

Συμπέρασμα: Άρα από τις ανωτέρω παρατηρήσεις συμπεραίνεται ότι το καταλληλότερο conventional shell είναι το S8R.

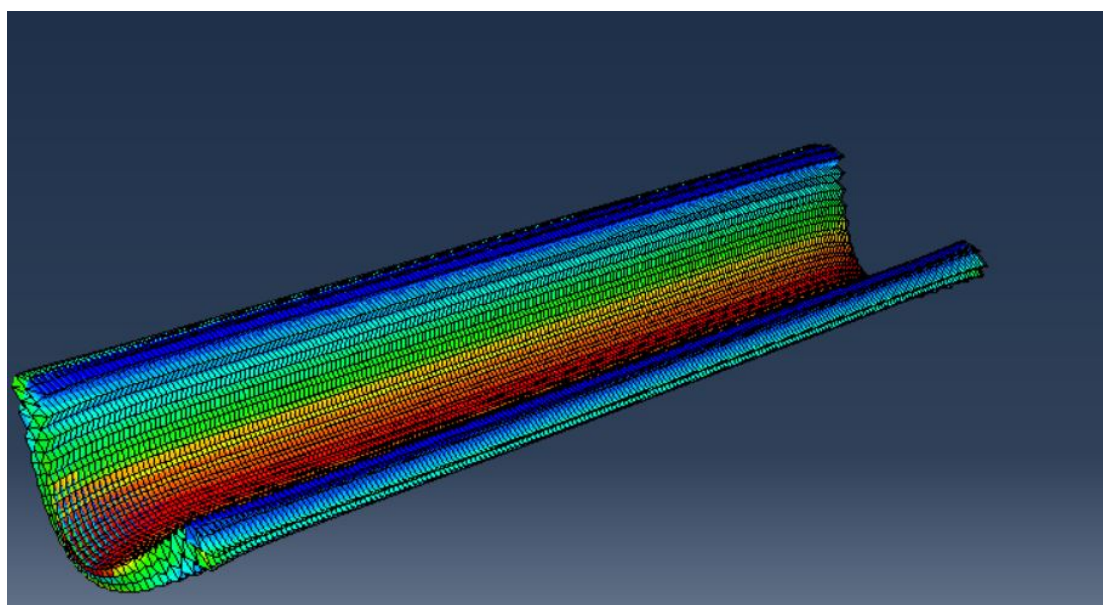
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΕΧΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

Από το Σχ 3. 2 Α) και Β) παρατηρείται ότι η πλάκα που προσομοιώνεται με τη χρήση στοιχείων συνεχών κελύφων (continuum shell) προσομοιώνεται σαν τρισδιάστατη, κάτι που είναι σύμφωνο με την θεωρία των συνεχών κελύφων τα οποία διακριτοποιούν ένα ολόκληρο τρισδιάστατο σώμα (σε αντίθεση με τα συμβατικά κελύφη που διακριτοποιούν μια επιφάνεια αναφοράς). Το πάχος καθορίζεται από την κομβική γεωμετρία του στοιχείου (ενότητα 2.6).

A)



B)



Σχ 3. 2 A),B) Προσομοίωση αμφιέριστης πλάκας με χρήση στοιχείων συνεχών κελύφων

Η επιλογή στοιχείου είναι SC8R: Οκτακομβικό, τετράπλευρο γενικής χρήσης κέλυφος τάσης/μετατόπισης, πρώτης τάξης, με μειωμένη ολοκλήρωση. Συγκρίνοντας τη διακριτοποίηση 0.1x0.1 σε σχέση με την αντίστοιχη διακριτοποίηση 0.05x0.05 παρατηρείται:

$$S_{11} \rightarrow A(\%) = 65.42\% \quad S_{33} = 0 \text{ και } U_1, U_2 \approx 0$$

$$S_{12} \rightarrow A(\%) = -32.824\% \quad SF_1 \rightarrow A(\%) = 30.84\%$$

$$SF_6 \rightarrow A(\%) = 32.015\% \quad SF_3 \rightarrow A(\%) = 165.6\%$$

$$SF4 \rightarrow -1.43N \text{ και } 0.44N \approx 0$$

$$SF5 \rightarrow A(\%) = 845.211\%$$

$$SM2 \rightarrow A(\%) = -4940.29\%$$

$$SM1 \rightarrow A(\%) = -1135.434\%$$

$$SM3 \approx 0$$

$$U3 \rightarrow A(\%) = -14001.735\%$$

UR δεν παρέχονται επειδή οι στροφές δεσμεύονται από τα συνεχή κελύφη

Για τα μεγέθη S22 ΚΑΙ SF2 παρατηρείται ότι για διακριτοποίηση 0.1×0.1 η ορθή τάση ως προς τον άξονα Y (όπως και η αντίστοιχη αξονική δύναμη) καταγράφεται παντού αρνητική, δεν αλλάζει πρόσημο. Αυτό οφείλεται επειδή το πάχος της πλάκας είναι 0.15m άρα αυτή η διακριτοποίηση δεν αναλύει το πάχος σε πεπερασμένα στοιχεία περισσότερα του ενός. Αντιθέτως στην διακριτοποίηση 0.05×0.05 το πάχος της πλάκας αναλύεται σε 3 πεπερασμένα στοιχεία ($0.15\text{m} = 3 \times 0.05\text{m}$) άρα παρέχεται πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της πλάκας καθ' ύψος και της πλάκας γενικότερα και παρατηρείται ότι η τέμνουσα αλλάζει πρόσημο τόσο στην επιφάνεια όσο και καθ' ύψος, όπως θα έπρεπε και να συμβαίνει. Έτσι εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος πρέπει να είναι 0.05×0.05 . Επειδή όμως όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτοποίηση τόσο μεγαλύτερος ο υπολογιστικός φόρτος και τόσο περισσότερη ώρα χρειάζεται για να γίνει η ανάλυση θα δοκιμαστούν μικρότερες διακριτοποιήσεις τόσο κατά μήκος όσο και κατά πλάτος του στοιχείου.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Τα mesh 0.05×0.05 και 0.1×0.1 παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, τα SF2, S22 δεν αλλάζουν πρόσημο στο 0.1×0.1 , ενώ SF4 $\rightarrow -1.43N$ και $0.44N$ (βέβαια αξίζει να αναφερθεί ότι στα SF4 είναι πολύ μικρές οι τιμές)

- Επιλέγεται mesh πάχους 0.05m γιατί $3 \times 0.05\text{m} = 0.15\text{m} \rightarrow$ πάχος ενώ

$0.1\text{m} \neq 0.15\text{m}$ δεν πραγματοποιεί καλή διακριτοποίηση

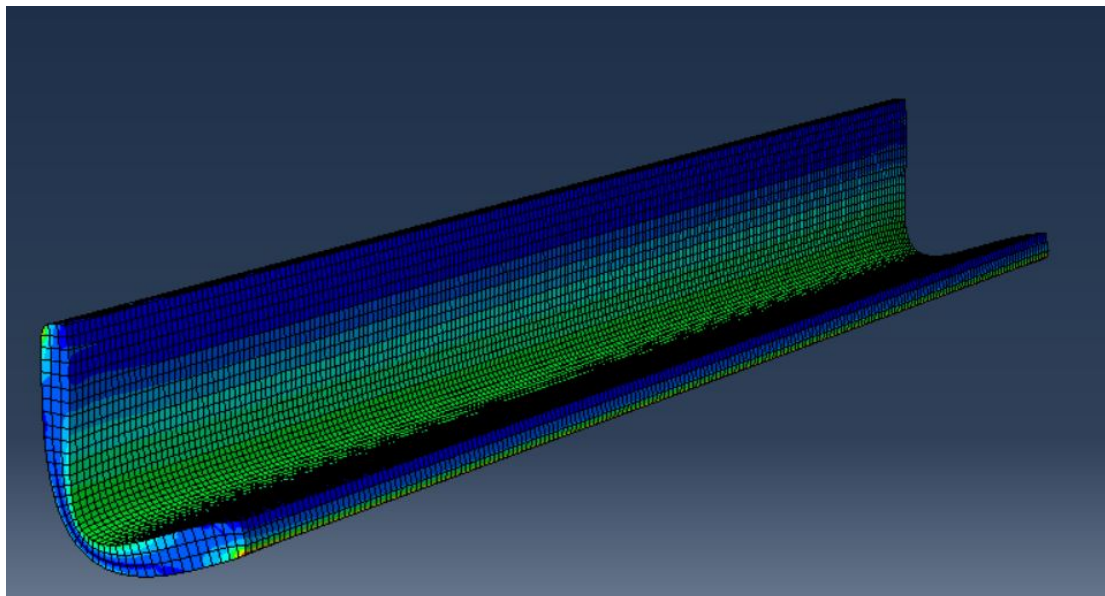
- Το mesh 0.05×0.06 (X,Y) καλύπτει με μεγαλύτερη απόκλιση στο

$$SF5 \rightarrow A(\%) = -17.288\%$$

3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΕΧΩΝ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

Η εικόνα της πλάκας που προσομοιώνεται με την χρήση στοιχείων συνεχών συμπαγών κελύφων είναι ίδια με το Σχ 3. 2 Α), δηλαδή η πλάκα

προσομοιώνεται σαν τρισδιάστατη. Μετά την πραγματοποίηση της ανάλυσης η εικόνα της πλάκας παρουσιάζεται στο Σχ 3. 3.



Σχ 3. 3 Προσομοίωση αμφιέρειστης πλάκας με χρήση στοιχείων συνεχών συμπαγών κελύφων

Η μοναδική επιλογή στοιχείου είναι CSS8: Οκταγωνικό στοιχείο πρώτης τάξης με επτά ασύμβατες λειτουργίες για τη βελτίωση της συμπεριφοράς κάμψης και μια υποτιθέμενη τάση για τον μετριάσμο του μπλοκαρίσματος. Επειδή είναι τρισδιάστατα στερεά (solid) στοιχεία ΔΕΝ υπάρχουν ως στοιχεία εξόδου οι δυνάμεις SF και ροπές SM. Άρα για τα εντατικά μεγέθη θα εξαχθούν οι τάσεις S. Συγκρίνοντας τη διακριτοποίηση 0.1x0.1 σε σχέση με την αντίστοιχη διακριτοποίηση 0.05x0.05 παρατηρείται:

$$S_{11} \rightarrow A(\%) = 3.088\% \quad S_{22} \rightarrow A(\%) = 2.928\% \quad S_{33} \rightarrow A(\%) = 41.31\%$$

$$S_{12} \rightarrow A(\%) = -4.692\% \quad S_{13} \rightarrow -0.6\text{Pa} \approx 0 \text{ και } 7\text{Pa}$$

$$S_{23} \rightarrow A(\%) = -28.568\% \quad U_3 \rightarrow A(\%) = 6.385\% \quad U_1, U_2 \approx 0$$

UR δεν παρέχονται επειδή οι στροφές δεσμεύονται από τα συνεχή συμπαγή κελύφη (όπως αντίστοιχα από τα συνεχή κελύφη, ενότητα 3.2)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

-Τα mesh 0.05x0.05 και 0.1x0.1 έχουν μικρή απόκλιση στα S₁₁, S₂₂, S₁₂ και U₃, έχουν μεγάλη απόκλιση στα S₂₃ και S₃₃ ενώ στο S₁₃

παρατηρούνται τιμές -0.6Pa και 7Pa οι οποίες όμως είναι μικρές.

-Για mesh πάχος 0.05m και x,y: 0.1x0.1 μεγαλύτερη απόκλιση βρίσκεται στο S33 με A(%)=6.445% όμως στο S13 παρατηρούνται τιμές -0.6Pa και 0.7Pa (βέβαια αποτελούν πολύ μικρές τιμές≈0)

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΩΝ

Τελικά, συμπεραίνεται ότι μόνο στα συμβατικά κελύφη υπάρχει σχετικά απόλυτη σύγκλιση στα εντατικά μεγέθη της εξεταζόμενης πλάκας. Και σε αυτά, όπως αποδείχθηκε, ο πιο κατάλληλος τύπος είναι το S8R μιας και μόνο σε αυτόν τα εντατικά μεγέθη S22 και SM2 ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΠΡΟΣΙΜΟ που είναι και το λογικό. Άρα το συμβατικό κέλυφος S8R φαίνεται το καταλληλότερο για την προσομοίωση της πλάκας. Σαν εναλλακτική επιλογή ακολουθούν τα συνεχή κελύφη SC8R γιατί είναι καλύτερα υπολογιστικά (λιγότερο υπολογιστικό φόρτο) καθώς επίσης θεωρούνται πιο πιστή προσομοίωση κελύφους (έχει ιδιότητες κελύφους, τάσεις, δυνάμεις, ροπές) σε αντίθεση με τα continuum solid shells που θεωρούνται πιο πιστή προσομοίωση στέρεου σώματος (solid, δίνοντας μόνο τάσεις αλλά σε όλες τις διευθύνσεις).

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΜΨΗΣ 3 ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ TRM ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

4.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Όλα τα δεδομένα για την κατασκευή του προσομοιώματος παρέχονται από το αντίστοιχο πραγματικό πείραμα κάμψης 3 σημείων του οποίου παρουσιάζεται η εικόνα του στο Σχ 4. 1 (Kariou et al., 2018).



Σχ 4. 1 Πραγματικό πείραμα κάμψης 3 σημείων (Kariou et al., 2018)

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετατοπίσεων. Χρησιμοποιήθηκε ένα έμβολο μέγιστης δύναμης 100kN το οποίο επέβαλλε μετατόπιση 1mm/min. Χρησιμοποιήθηκαν 2 ποτενσιόμετρα για την μέτρηση της εκτός επιπέδου μετατόπισης στη μέση της ελεύθερης παρειάς του τοιχώματος. Τα δεδομένα συλλέγονται σε συχνότητα 4Hz, συγχρονίζονται και καταγράφονται από ένα πλήρως ηλεκτρονικό σύστημα απόκτησης δεδομένων.

Όσο αναφορά το τοίχωμα, οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι: μήκος 1.34m, πλάτος 0.44m, πάχος 0.1025m. Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας είναι $f_c = 9.7 \text{ MPa}$.

Η εφελκυστική αντοχή της προκύπτει από τον τύπο

$$f_t = 0.33 \cdot \sqrt{f_c} = 1.0278 \text{ MPa. Το μέτρο ελαστικότητας δίνεται } E_c = 2.5 \text{ GPa.}$$

Η συγκεκριμένη ενίσχυση TRM έχει διαστάσεις: μήκος 1.34m, πλάτος 0.44m, πάχος 0.003m

Η τσιμεντοειδής μήτρα της ενίσχυσης TRM που χρησιμοποιείται έχει θλιπτική αντοχή $f_c = 39.7$ MPa, εφελκυστική αντοχή $f_t = 8.9$ MPa και το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τον τύπο

$$E_c = 22 * [(f_c) / 10]^{0.3} \quad (f_c \text{ σε MPa, } E_c \text{ σε GPa}) \rightarrow E_c = 33.2705 \text{ GPa}$$

Όσο αναφορά τις ίνες οπλισμού άνθρακα της ενίσχυσης TRM, πρόκειται για μια στρώση πλέγματος ινών (ίνες παράλληλες κατά μήκος και πλάτος της ενίσχυσης) η οποία βρίσκεται στην μέση στάθμη της ενίσχυσης. Οι ίνες απέχουν 10mm μεταξύ τους και στις δυο διευθύνσεις, έχουν ονομαστικό πάχος 0.097 mm, εφελκυστική αντοχή $f_t = 3800$ MPa και μέτρο ελαστικότητας $E = 225$ GPa. Η ισοδύναμη επιφάνεια ίνας υπολογίζεται από τον τύπο (όλα σε m):

$$(\text{ονομαστικό πάχος ίνας} * 1\text{m μήκους}) / (1\text{m μήκους} / \text{απόσταση μεταξύ των ινών}) = (0.000097 * 1) / (1 / 0.01) = 9.7 * 10^{-7} \text{ m}^2$$

Το ενισχυμένο δοκίμιο τοποθετείται πάνω σε 2 στηρίξεις οι οποίες απέχουν 107.5 mm από τις άκρες του δοκιμίου. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση πραγματοποιείται μέσω πολύ λεπτής μεταλλικής πλάκας (θεωρείται αμελητέο το πάχος της \rightarrow αμελητέα άσκηση πίεσης της μεταλλικής πλάκας στο δοκίμιο λόγω του ίδιου του βάρους της) διαστάσεων x, y :

0.1m X 0.44m η οποία τοποθετείται πάνω από την μέση του δοκιμίου.

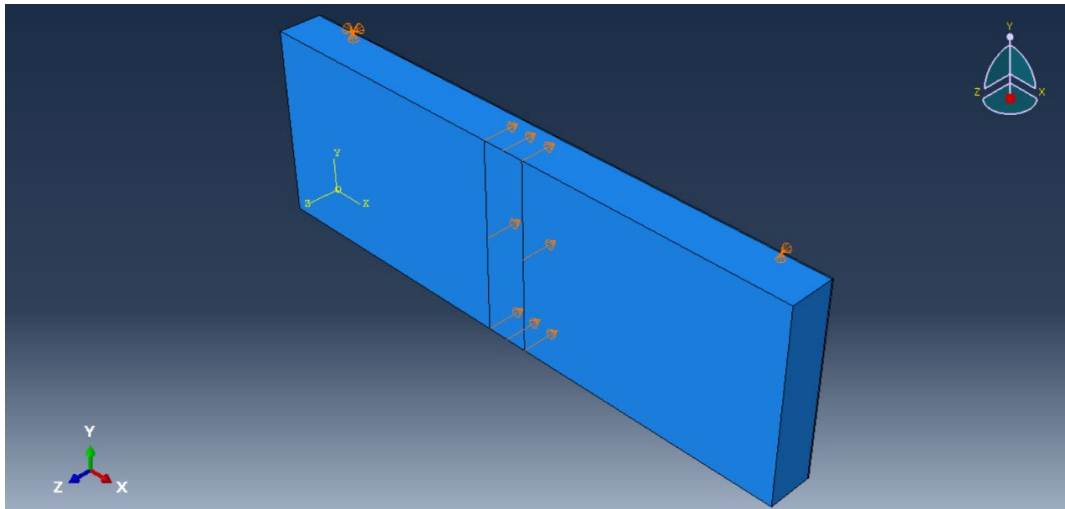
Το συγκεκριμένο δοκίμιο αστοχεί λόγω της ολίσθησης των ινών του. Χωρίς την ενίσχυση, ο μη ενισχυμένος τοίχος αστοχεί από το ίδιο το βάρος του, άρα δεν αναπτύσσει αντοχή.

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ ABAQUS

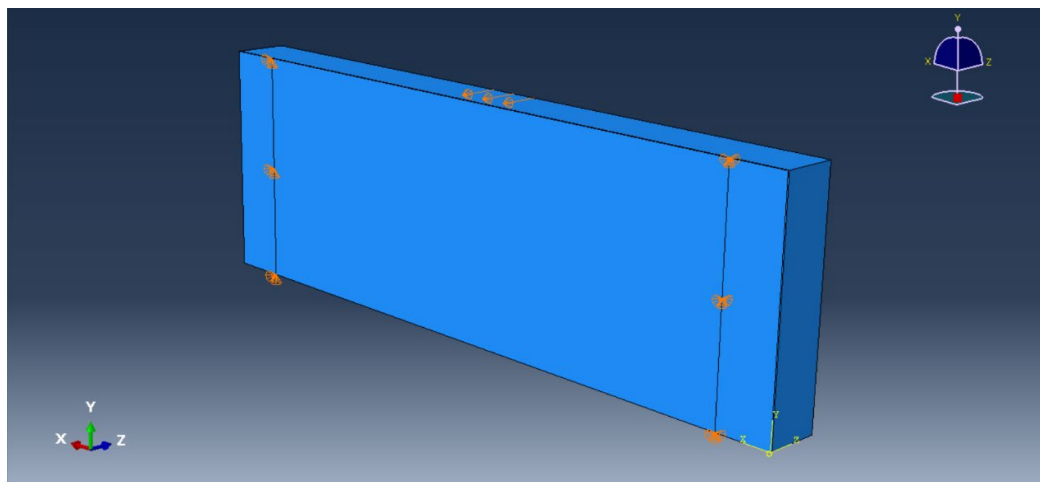
Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την ενότητα 4.1 προσομοιώνεται το εξεταζόμενο δοκίμιο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

(Σχ 4. 2 A) και B)).

A)



B)



Σχ 4. 2 A), B) Προσομοίωση του ελέγχου του ενισχυμένου δοκιμίου σε κάμψη 3 σημείων στο πρόγραμμα Abaqus

Από το Σχ 4. 2 παρατηρείται:

→Λόγω του πολύ λεπτού (αμελητέου) πάχους της πλάκας, προσομοιώνεται κατευθείαν η επίπεδη επιβαλλόμενη μετατόπιση πάνω στο τοίχωμα σε διαστάσεις $x,y \rightarrow 0.1\text{m} \times 0.44\text{m}$ κεντρικά του τοιχώματος. Εφόσον είναι γνωστό ότι θα αστοχήσει το δοκίμιο στην επιβαλλόμενη μετατόπιση 15.6mm (Kariou et al., 2018), για σιγουριά επιβάλλεται στο προσομοίωμα 20mm μετατόπιση ώστε το προσομοίωμα να προσεγγίσει σίγουρα την max φόρτιση του.

→Οι στηρίξεις προσομοιώνονται γραμμικές με μια γραμμική άρθρωση και μια γραμμική κύλιση σε αποστάσεις 107.5 mm από τις άκρες του δοκιμίου, ώστε κατά την διάρκεια του ελέγχου να πραγματοποιείται απελευθέρωση ενέργειας μέσω της γραμμικής κύλισης.

Η μέθοδος ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι μη γραμμική στατική ανάλυση με επίλυση Newton Raphson.

Για την προσομοίωση της αντοχής των υλικών των ινών θα χρησιμοποιηθεί στο Abaqus η επιλογή Plastic. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι οι ίνες από άνθρακα (αλλά και από γυαλί στην ενότητα 6) είναι ψαθυρές, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει σημαντικός μετελαστικός κλάδος ώστε να προσομοιωθούν τα υλικά άνθρακα και γυαλιού με την επιλογή plastic. Στις συγκεκριμένες αναλύσεις όμως, οι ίνες βρίσκονται πάντα υπό εφελκυσμό, ενώ αν και εφόσον οι ίνες γίνουν κρίσιμες (προσεγγίσουν την μέγιστη αντοχή τους) και κρατούν σταθερή την δύναμή τους, είναι βέβαιο ότι λίγο μετά ο τοίχος θα διαλυθεί. Για λόγους σύγκλισης χρησιμοποιήθηκαν αυτοί οι τύποι προσομοιωμάτων (υλικά ινών με την επιλογή plastic), που δεν είναι απόλυτα σωστοί αλλά αποτελούν μια καλή προσέγγιση. Επειδή το συγκεκριμένο δοκίμιο αστοχεί λόγω ολίσθησης ινών, οι ίνες εκείνη την στιγμή έχουν διαρρέυσει, άρα στο προσομοίωμα θα εισαχθεί ως δεδομένη η αντοχή ινών $\sigma_t = 1368 \text{MPa}$ η οποία είναι η ιδεατή τάση διαρροής ίνας, λαμβάνοντας υπόψιν και την ολίσθηση-απώλεια συνάφειας μεταξύ της ίνας και της τσιμεντοειδούς μήτρας (Raouf et al., 2017).

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την προσομοίωση της πλαστικότητας, της εφελκυστικής και της θλιπτικής συμπεριφοράς τόσο του υλικού της τοιχοποιίας όσο και του τσιμεντοειδούς της ενίσχυσης θα χρησιμοποιηθεί στο Abaqus η επιλογή Concrete Damaged Plasticity (Genikomsou et al., 2015).

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής συμπεριφοράς των υλικών της τοιχοποιίας και του τσιμεντοειδούς, χρησιμοποιούνται οι τύποι:

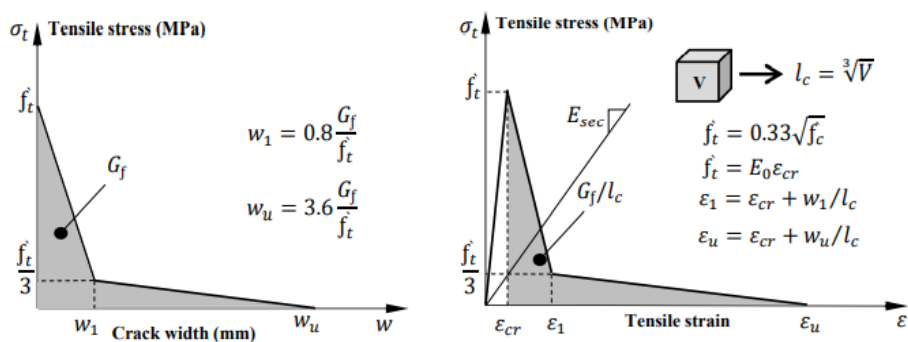
Ascending Branch
$$\sigma = \zeta f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_o} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_o} \right)^2 \right]$$

Descending Branch
$$\sigma = \zeta f'_c \left[1 - \left(\frac{\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_o} - 1}{\frac{2}{\zeta} - 1} \right)^2 \right]$$

Και μεταβάλλοντας την παραμόρφωση ε_c από $0 \rightarrow 0.004$ ανά 0.0001 υπολογίζονται, μέσω της χρήσης του προγράμματος Excel, οι στήλες για την θλιπτική τάση σ_c (Pa) και την πλαστική παραμόρφωση ε_c, in . Αυτές οι δύο στήλες θα εισαχθούν στο Abaqus για προσομοίωση της θλιπτικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας και του τσιμεντοειδούς αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής συμπεριφοράς των υλικών της τοιχοποιίας και του τσιμεντοειδούς, θα χρησιμοποιηθούν οι τύποι από το

Σχ 4. 3:



Σχ 4. 3 Τυπολόγιο και διαγράμματα για την εφελκυστική τάση της τοιχοποιίας και του τσιμεντοειδούς

Μεταβάλλοντας την παραμόρφωση ε_c από $0 \rightarrow \varepsilon_u$ ανά 0.00001 υπολογίζονται μέσω της χρήσης του Excel οι στήλες για την εφελκυστική τάση σ_t (Pa) και την παραμόρφωση θραύσης ε_t, ck . Αυτές προσομοιάζουν την εφελκυστική συμπεριφορά της τοιχοποιίας και του τσιμεντοειδούς αντίστοιχα και θα εισαχθούν κατά αντιστοιχία στο Abaqus.

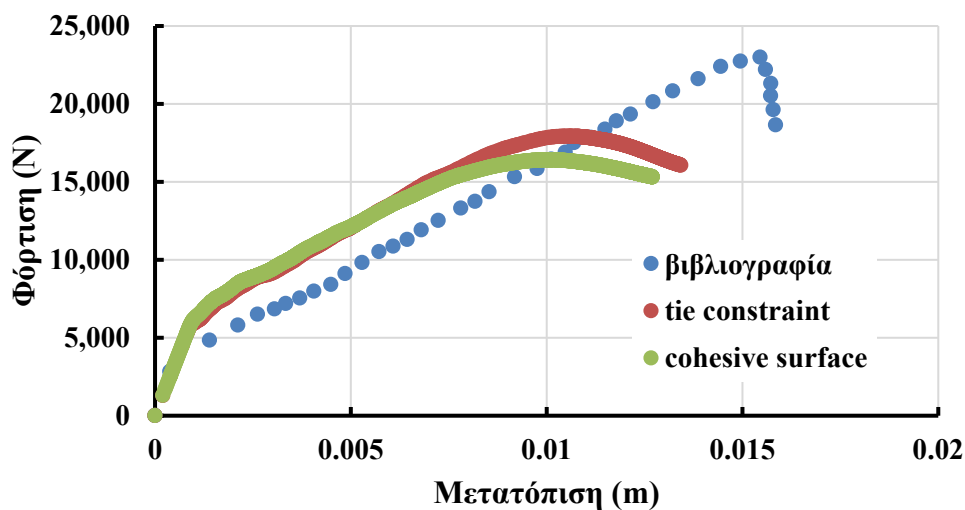
Όσο αναφορά τις γωνίες τριβής της τοιχοποιίας και του τσιμεντοειδούς, οι υπολογισμοί τους θα επεξηγηθούν αναλυτικά στα αντίστοιχα κεφάλαια 5.1 και 5.2.

Επειδή ο πραγματοποιηθέν έλεγχος είναι κάμψη 3 σημείων, θα καταπονηθούν μόνο οι διαμήκεις ίνες της ενίσχυσης (παράλληλες στην μεγάλη πλευρά- μήκος της ενίσχυσης). Άρα, για οικονομία και μεγαλύτερη ταχύτητα ανάλυσης, θα προσομοιωθούν μόνο οι διαμήκεις ίνες και για σιγουριά στην ενότητα διερεύνησης των ινών (ενότητα 5.6) θα προσομοιωθεί και το πλέγμα ινών για να εξακριβωθεί αν υπάρχει μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Η επιλογή της σύνδεσης- αλληλεπίδρασης μεταξύ ενίσχυσης και τοιχώματος, καθώς και του είδους των πεπερασμένων στοιχείων της ενίσχυσης και του τοιχώματος απαιτεί την διενέργεια δοκιμών που θα παρουσιαστούν στις ενότητες 4.3 και 4.4 αντίστοιχα.

4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

Δύο είναι οι πιθανές επιλογές, να είναι πακτωμένες οι επιφάνειες ενίσχυσης- τοίχου που έρχονται σε επαφή και αυτό γίνεται με την χρήση tie constraint ως αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειών ή προσομοιώνοντας την στατική τριβή μεταξύ των επιφανειών με την χρήση cohesive surface (Soroush et al., 2018), με κίνδυνο όμως να μην λαμβάνονται ορθά οι μοχλοβραχίονες μεταξύ των 2 σωμάτων κατά την διάρκεια του ελέγχου.



Σχ 4. 4 Διάγραμμα με μεταβλητή την σύνδεση-αλληλεπίδραση μεταξύ ενίσχυσης και τοιχώματος

Από το Σχ 4. 4 παρατηρείται ότι και οι δύο καμπύλες είναι χαμηλότερες από την καμπύλη του πειράματος. Επειδή το μέγιστο φορτίο στη καμπύλη tie constraint βρίσκεται 0.5mm δεξιότερα από το αντίστοιχο της cohesive surface (ελάχιστα πιο κοντά στο πραγματικό) και η διαφορά των μεγίστων είναι:

$17919.8\text{N}-16403.9\text{N}=1515.9\text{N}\rightarrow(1515.9\text{N}/22999.62\text{N})\cdot 100\%$ (22999.62N το μέγιστο φορτίο στο πείραμα)=6.591% θα επιλεχθεί η σύνδεση με tie constraint.

Αξιζει να επισημανθεί επίσης ότι στο πείραμα δεν υπήρχε ολίσθηση μεταξύ της ενίσχυσης TRM και του τοίχου (η αστοχία είναι ολίσθηση των ινών). Επομένως το tie constraint είναι ΚΑΙ η λογική επιλογή.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί και το πλεονέκτημα ότι με σύνδεση tie constraint μπορεί να υπάρξει και διαφορετική διακριτοποίηση στην ενίσχυση από το τοίχωμα. Αυτό χρησιμεύει στην περίπτωση που επιλεγεί για την προσομοίωση της ενίσχυσης το συμβατικό κέλυφος S8R. Τότε, σύμφωνα με την ενότητα 3.4, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερη σχετικά διακριτοποίηση σε σχέση με το τοίχωμα, το οποίο θα είναι σίγουρα τρισδιάστατο και θα χρειαστεί μεγάλη διακριτοποίηση για την αξιόπιστη προσομοίωση του πάχους της τοιχοποιίας. Να σημειωθεί ότι μεγαλύτερη διακριτοποίηση οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο ανάλυσης και μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο.

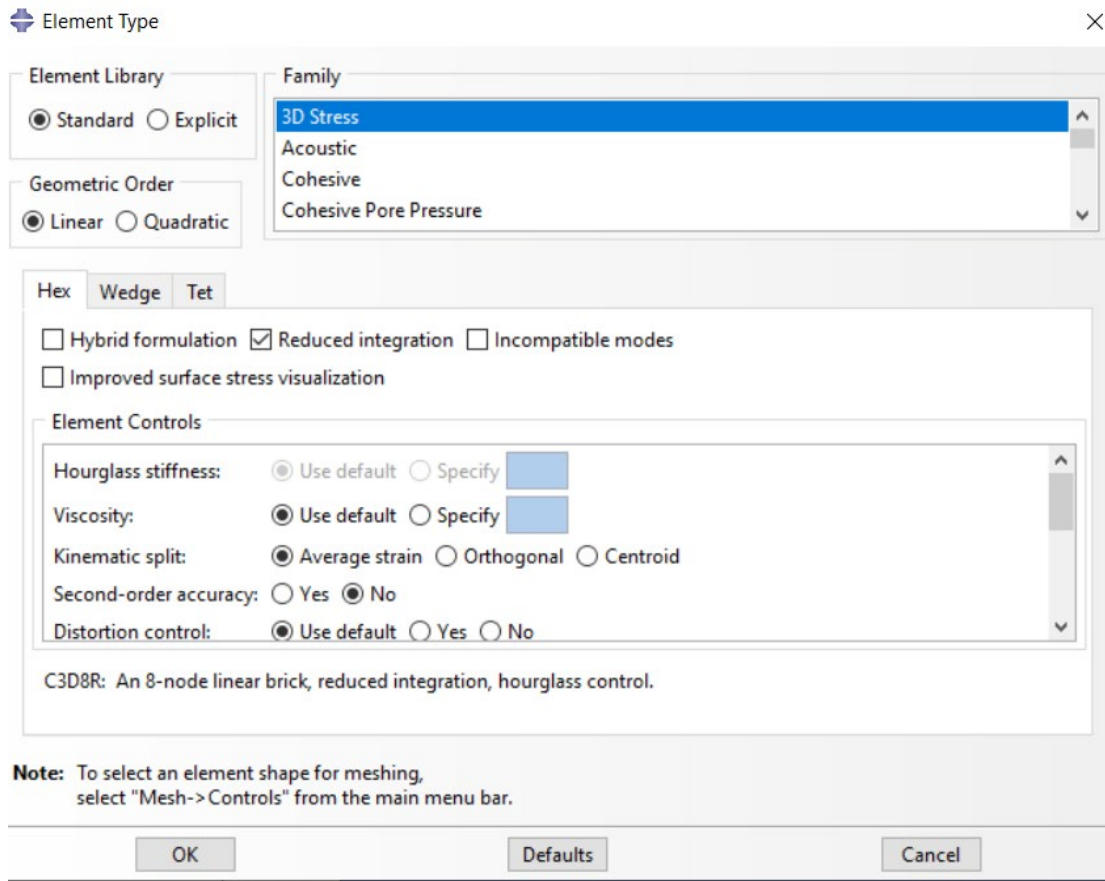
4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΙΔΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑ

Όσο αναφορά την ενίσχυση, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.4, οι διαστάσεις της παραπέμπουν σε στοιχείο κελύφους (μήκος 1.34m και πλάτος 0.44m πολύ μεγαλύτερα από πάχος 0.003m). Από την ενότητα 3.4 εξήχθη το συμπέρασμα ότι καταλληλότερο στοιχείο κελύφους είναι το συμβατικό κέλυφος S8R και έπεται το συνεχές κέλυφος SC8R. Επίσης, στο Abaqus οι οπλισμοί (εδώ οι ίνες) για να εισαχθούν χρειάζεται είδος διατομής κελύφους, όχι στερεό, άρα το στερεό συνεχές κέλυφος CSS8 απορρίπτεται.

Όσο αναφορά το τοίχωμα, το πάχος του (0.1025m) δεν είναι σημαντικά μικρότερο της μικρής πλευράς- πλάτος (0.44m) άρα απαιτείται

τρισδιάστατη αναπαράσταση του τοίχου για να προσομοιωθεί ορθά το πάχος του, άρα το συμβατικό κέλυφος που δεν λαμβάνει υπόψη το πάχος στους υπολογισμούς απορρίπτεται. Πέρα από το συνεχές κέλυφος SC8R και το στερεό συνεχές κέλυφος CSS8, το τοίχιο γίνεται να προσομοιωθεί και ως στερεό. Το Abaqus έχει την επιλογή για στερεό 3D Stress, το οποίο είναι στοιχείο τρισδιάστατης ελαστικότητας (Σχ 4. 5). Από αυτήν την επιλογή προκύπτουν 2 υποεπιλογές για το είδος πεπερασμένου στοιχείου: C3D8R και C3D8. Η διαφορά τους είναι ότι το πρώτο έχει μειωμένη ενσωμάτωση (reduced integration) ενώ το δεύτερο όχι.

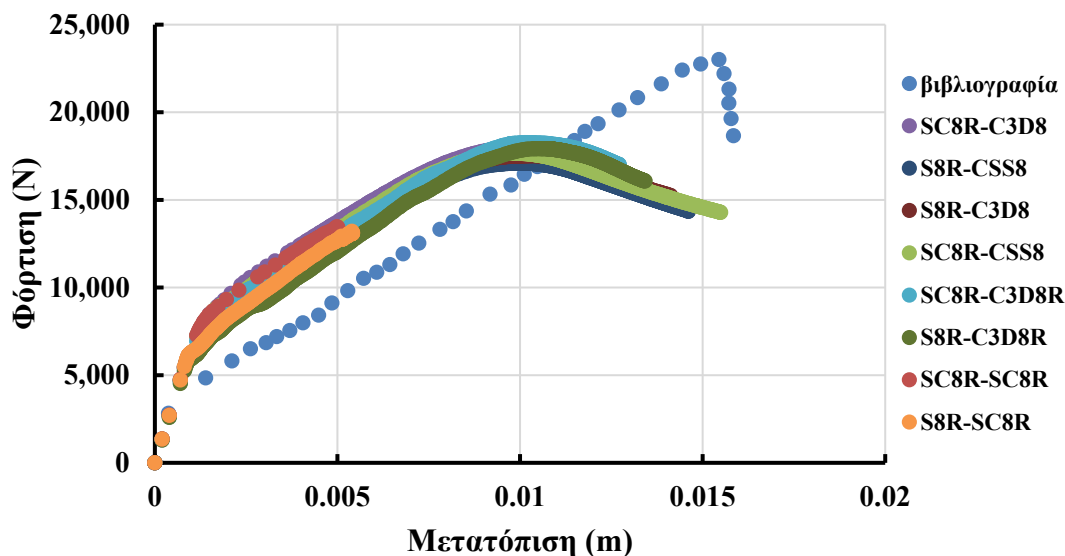
Από τις παραπάνω επιλογές ειδών πεπερασμένων στοιχείων θα συγκριθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί ενίσχυσης- τοιχώματος (Σχ 4. 6), για να βρεθεί αυτός που προσομοιάζει καλύτερα την πειραματική καμπύλη (Kariou et al., 2018), και άρα το πραγματικό δοκίμιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω στοιχεία είναι οκτακωμβικά και τετραπλευρικά (S8R, SC8R, CSS8, C3D8R και C3D8) οπότε η επαφή και η σύνδεση μεταξύ τους δεν παρουσιάζει πρόβλημα. Επίσης, όσο αναφορά τα μεγέθη των πεπερασμένων στοιχείων, για το τοίχωμα το μέγεθος της πλευράς του πεπερασμένου στοιχείου (mesh size) θα είναι 0.025m, ενώ, όσο αναφορά την ενίσχυση, για συμβατικό κέλυφος θα είναι 0.05m, ενώ για συνεχές κέλυφος θα είναι 0.01m (για να γίνει αναλυτική προσομοίωση του πολύ λεπτού πάχους του τρισδιάστατου τμήματος). Υπενθυμίζεται από την ενότητα 4.3 ότι με την χρήση tie constraint πραγματοποιείται επιτυχώς η σύνδεση τμημάτων με διαφορετικό μέγεθος διακριτοποίησης.



Σχ 4. 5 Στοιχείο 3D Stress για την προσομοίωση στοιχείου τρισδιάστατης ελαστικότητας

| Τύπος Στοιχείου | | |
|-----------------|----------|---------|
| Προσομοίωμα | Ενίσχυση | Τοίχωμα |
| 1 | S8R | SC8R |
| 2 | S8R | CSS8 |
| 3 | S8R | C3D8R |
| 4 | S8R | C3D8 |
| 5 | SC8R | SC8R |
| 6 | SC8R | CSS8 |
| 7 | SC8R | C3D8R |
| 8 | SC8R | C3D8 |

Σχ 4. 6 Συνδυασμοί ειδών πεπερασμένων στοιχείων στον συνδυασμό ενίσχυση-τοίχωμα

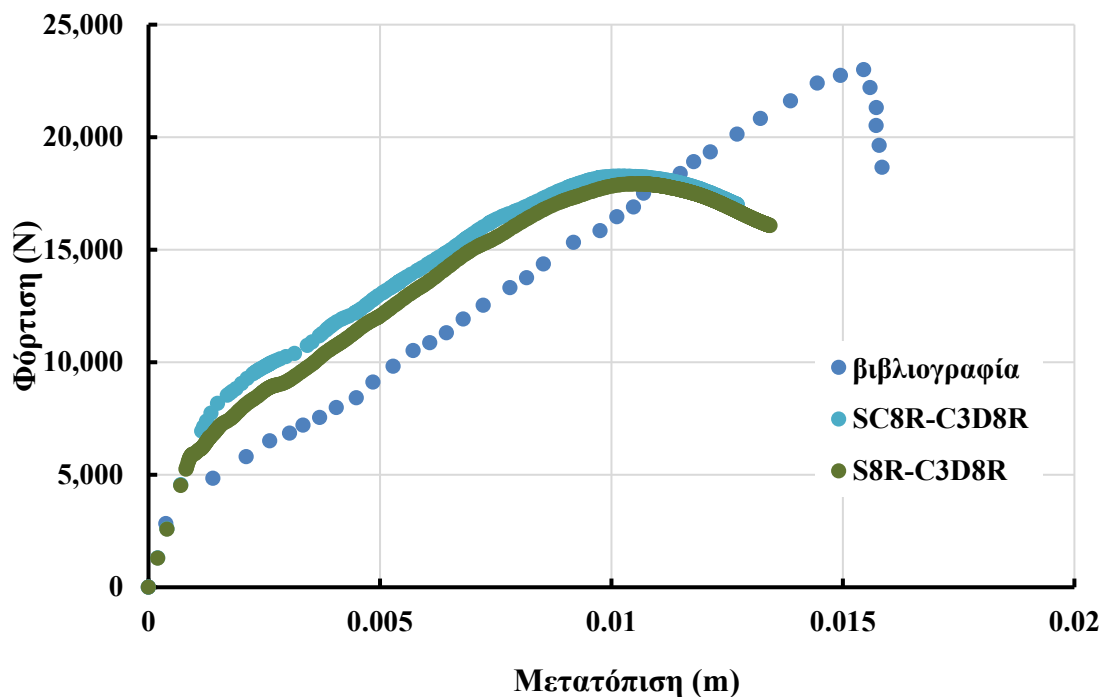


Σχ 4. 7 Διάγραμμα με τις καμπύλες για συνδυασμούς ειδών πεπερασμένων στοιχείων στον συνδυασμό ενίσχυση-τοίχωμα

Μελετώντας τις καμπύλες του Σχ 4. 7 ως προς την εικόνα, τη μέγιστη φόρτιση και την μετατόπιση που την παρουσιάζουν συμπεραίνεται ότι καλύτερη προσομοίωση για το τοίχωμα είναι το στοιχείο C3D8R, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι για τοίχωμα με στοιχεία SC8R η ανάλυση εμφανίζει σφάλμα (error) οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι τα στοιχεία SC8R αδυνατούν να προσομοιώσουν με επιτυχία το τοίχωμα.

Από το Σχ 4. 8 διακρίνεται ότι μπορεί ο συνδυασμός SC8R-C3D8R να παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερο max φορτίο ($18259.6N-17919.8N= 339.8N$), όμως ο συνδυασμός S8R-C3D8R παρουσιάζει το max φορτίο σε μεγαλύτερη μετατόπιση, ενώ και η συνολική εικόνα της καμπύλης

S8R-C3D8R προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική καμπύλη. Επομένως, το τελικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η ρεαλιστικότερη προσομοίωση του δοκιμίου επιτυγχάνεται με ενίσχυση από συμβατικό κέλυφος S8R και τοίχωμα από στοιχείο τρισδιάστατης ελαστικότητας με μειωμένη ενσωμάτωση C3D8R.

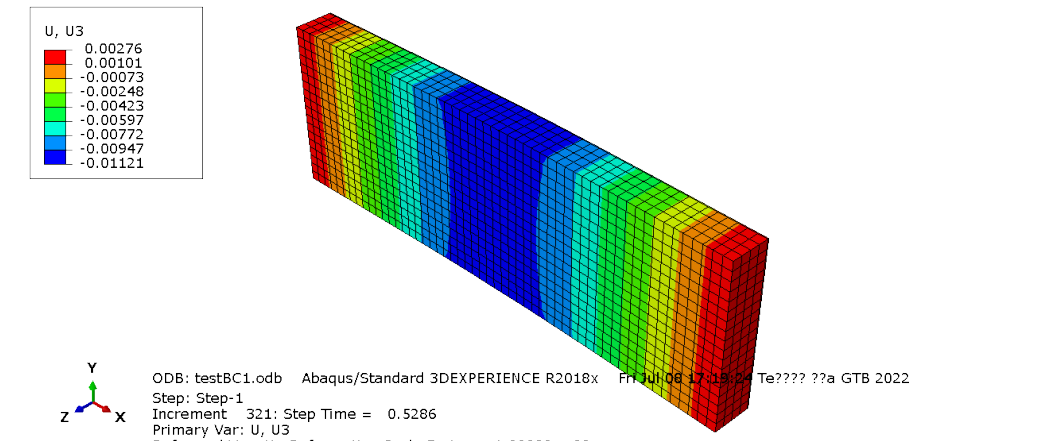


Σχ 4. 8 Διάγραμμα καμπυλών για τους 2 συνδυασμούς SC8R-C3D8R και S8R-C3D8R

Παρακάτω θα παρουσιαστούν διαγράμματα στο Abaqus με τα εντατικά μεγέθη για συνδυασμούς ειδών πεπερασμένων στοιχείων την στιγμή που το ενισχυμένο δοκίμιο καταπονείται με την μέγιστη φόρτιση. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι N, m και Pa. Για παράδειγμα, όσο αναφορά το προσομοίωμα με Ενίσχυση S8R - Τοίχωμα C3D8R, στο Σχ 4. 9 θα παρουσιαστούν οι μετακινήσεις U3 παράλληλες στον άξονα 3 (άξονα z) για όλο το προσομοίωμα. Στα Σχ 4. 10, Σχ 4. 11 και Σχ 4. 12 θα παρουσιαστούν οι μέσες πλαστικές παραμορφώσεις PEEQ, οι τάσεις στην διαμήκη διεύθυνση $X \rightarrow S11$ και οι ορθές εφελκυστικές δυνάμεις στις διαμήκεις ίνες RBFOR στην όψη X-Y στην εφελκυσόμενη παρειά της ενίσχυσης. Παρουσιάζεται μόνο η S11 επειδή η καταπόνηση κατά την διάρκεια του ελέγχου είναι στην διαμήκη διεύθυνση (για αυτό άλλωστε λειτουργούν σχετικά μόνο οι διαμήκεις ίνες), όχι στην εγκάρσια Y, άρα οι κρίσιμες τάσεις είναι οι διαμήκεις ορθές S11, ενώ λόγω του πολύ λεπτού πάχους συγκριτικά με τις άλλες διαστάσεις της ενίσχυσης, οι τιμές των τάσεων στην διεύθυνση Z αλλά και οι διατμητικές τάσεις είναι πολύ μικρές και δεν επιδρούν στην αστοχία του δοκιμίου. Αυτός ο συλλογισμός επαληθεύεται από την μορφή αστοχίας του δοκιμίου (ολίσθηση ινών της ενίσχυσης). Τέλος, όσο αναφορά το τοίχωμα, επειδή έχει πολύ μικρό αλλά

υπολογίσιμο πάχος και προσομοιάζεται με τρισδιάστατα στοιχεία, έχει σημασία να παρουσιαστούν στα προαναφερόμενα διαγράμματα S11 και PEEQ πέρα από την όψη X-Y και οι όψεις X-Z, Y-Z, στις οποίες παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη ως προς το πάχος του τοιχώματος.

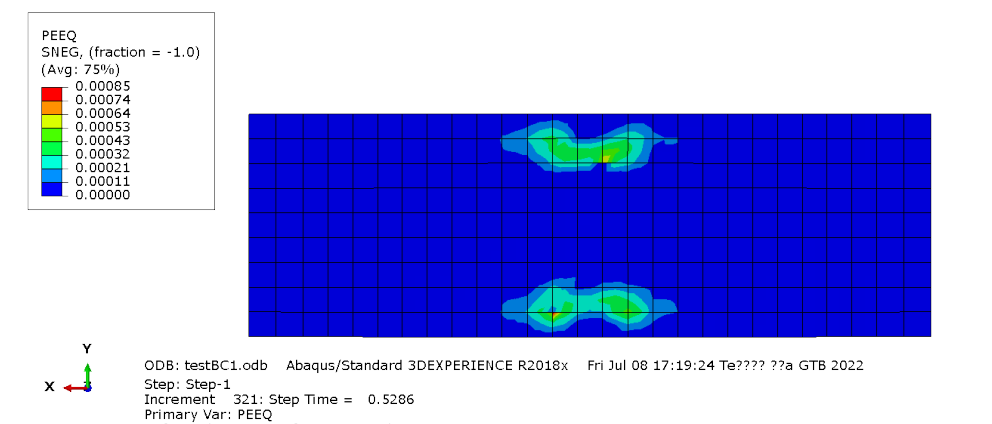
Ενίσχυση S8R - Τοίχωμα C3D8R



Σχ 4. 9 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 για όλο το προσομοίωμα (ενισχυμένο τοίχωμα)

Στο Σχ 4. 9 η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση είναι

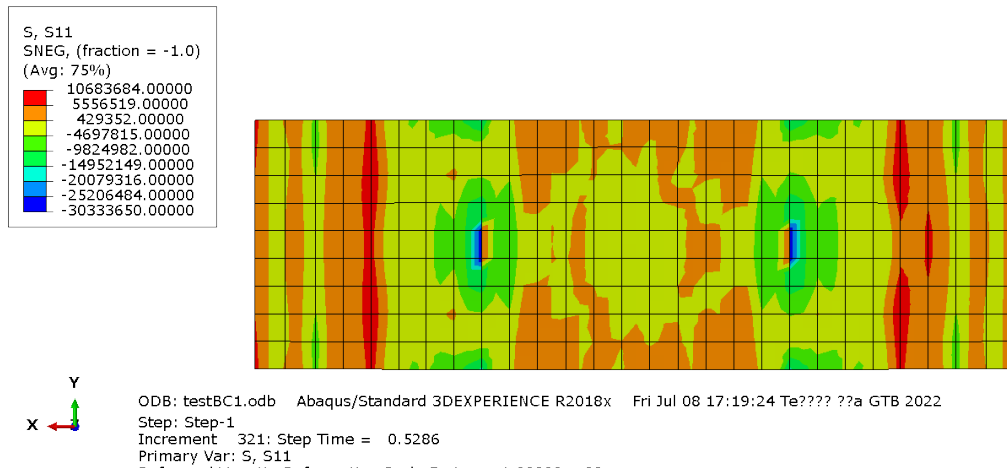
-0.0105515m ενώ την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 0.00101m και 0.00276m.



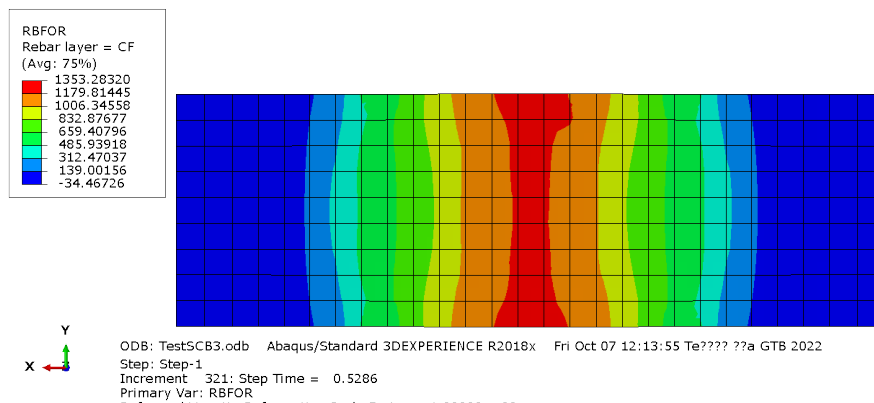
Σχ 4. 10 Διάγραμμα μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Στο Σχ 4. 10 παρατηρούνται οι πλαστικές περιοχές να αναπτύσσονται διαμήκως της ενίσχυσης, στις περιοχές των ακραίων διαμήκων ινών, ακολουθώντας την διεύθυνση των κρίσιμων τάσεων S11. Επίσης, εμφανίζονται κεντρικά της ενίσχυσης, κάτι λογικό, εφόσον η επιβαλλόμενη

μετατόπιση ασκείται στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου οπότε και αυτή μετατοπίζεται (Σχ 4. 9) και παραμορφώνεται περισσότερο. Η μορφή αυτή των πλαστικών παραμορφώσεων επιβεβαιώνει και τον τρόπο αστοχίας (ολίσθηση των ινών), μιας και για να ολισθήσουν οι ίνες χρειάζεται τμήματα των περιοχών όπου βρίσκονται να έχουν πλαστικοποιηθεί.



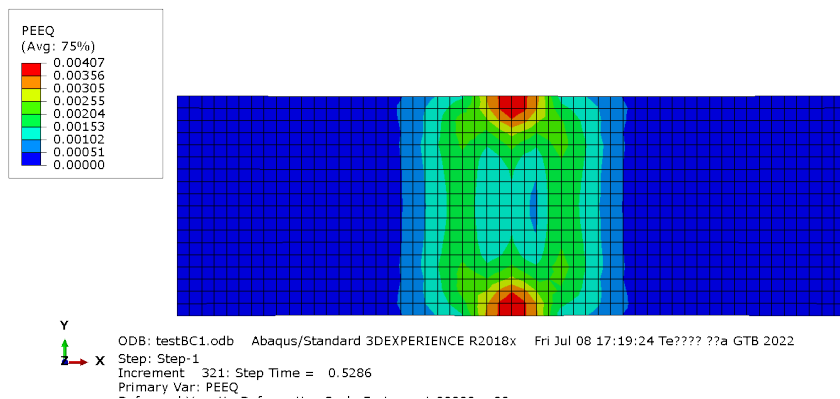
Σχ 4. 11 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης
 Στο Σχ 4. 11 καταγράφεται η μέγιστη εφελκυστική τάση που εμφανίζει η ενίσχυση να κυμαίνεται μεταξύ 5.6 MPa και 10.7 MPa, η οποία καταγράφεται στις περιοχές των στηρίξεων, κάτι λογικό, αφού αυτές ασκούν τα φορτία των αντιδράσεων, το άθροισμα των οποίων είναι ίσο και αντίθετο στα φορτία της επιβαλλόμενης μετατόπισης που επιβάλλονται στο τοίχωμα που υποστηρίζει η ενίσχυση. Σημαντικές εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται επίσης σε περιοχές μεταξύ των περιοχών των στηρίξεων και των άκρων της ενίσχυσης καθώς επίσης και σε περιοχές κεντρικά της ενίσχυσης (τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 5.6MPa και 429kPa).



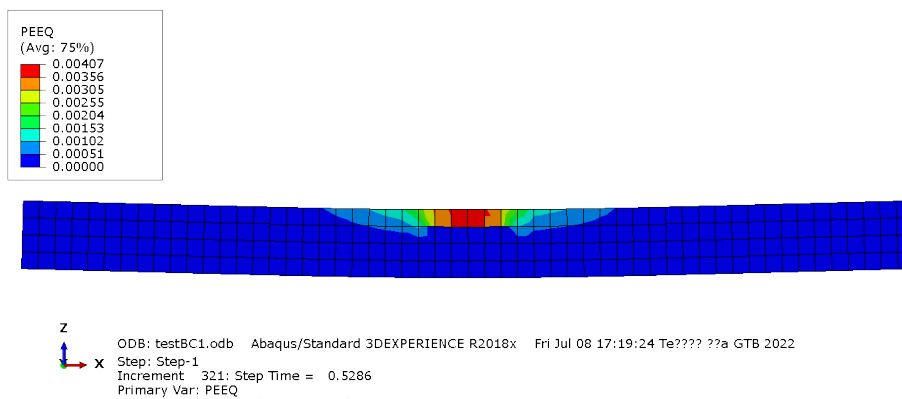
Σχ 4. 12 Διάγραμμα ορθών εφελκυστικών δυνάμεων ινών RBFOR στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Από το Σχ 4. 12 σημειώνεται ότι η μέγιστη ορθή εφελκυστική δύναμη των ινών κυμαίνεται μεταξύ 1179.8N και 1353.3N και βρίσκεται κεντρικά της ενίσχυσης, κάτι λογικό αφού εκεί η ενίσχυση εφελκύεται περισσότερο, άρα και οι ίνες εφελκύνονται περισσότερο αντίστοιχα. Οι μέγιστες πιθανές ορθές εφελκυστικές τάσεις των ινών προκύπτουν από τις αντίστοιχες δυνάμεις διά την ισοδύναμη επιφάνεια της ίνας: $\frac{1353.3 N}{9.7 \cdot 10^{-7} m^2} = 1395.2 MPa > 1368 MPa$ (ιδεατή τάση διαρροής ίνας, λαμβάνοντας υπόψιν και την ολίσθηση-απώλεια συνάφειας μεταξύ της ίνας και της τσιμεντοειδούς μήτρας). Άρα ολισθαίνουν οι ίνες και το προσομοίωμα αστοχεί λόγω ολίσθησης ινών.

A)



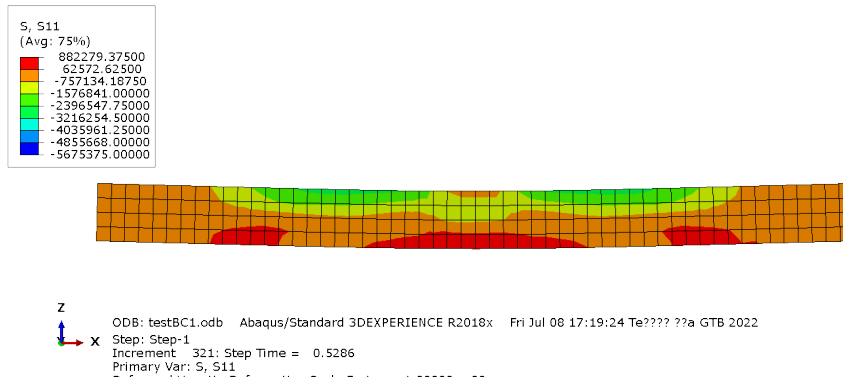
B)



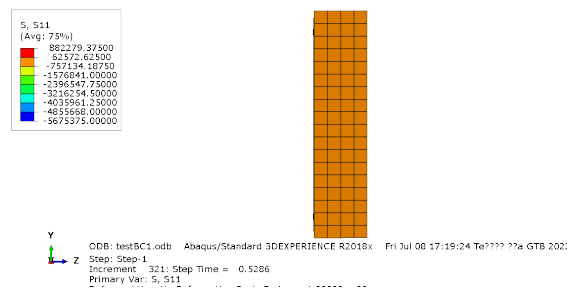
Σχ 4. 13 A), B) Διάγραμμα πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα
Από τα Σχ 4. 13 A) και B) παρατηρείται ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις στο τοίχωμα αναπτύσσονται στην επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης, κάτι λογικό μιας και εκεί ασκούνται άμεσα τα φορτία της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Δεν παρατηρούνται πλαστικές παραμορφώσεις στις διεπιφάνειες του τοιχώματος που απέχουν από την επιφάνεια επιβολής της

μετατόπισης, κάτι που καταδεικνύει και την επιτυχή λειτουργία της ενίσχυσης να υποστηρίξει το τοίχωμα από το να πλαστικοποιηθεί σε σημείο αστοχίας.

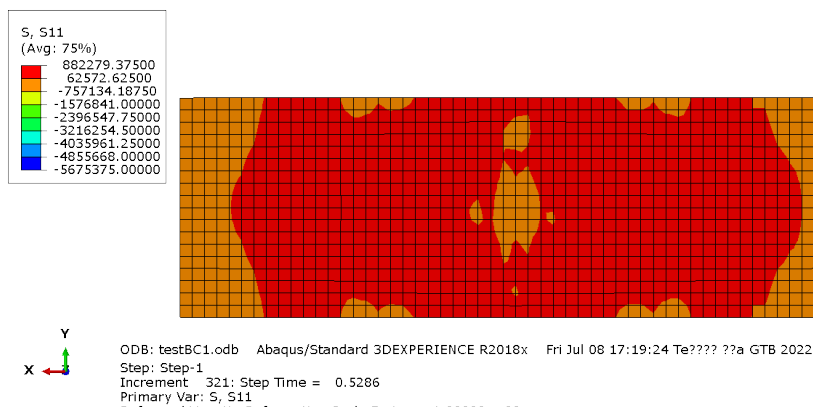
A)



B)



Γ)

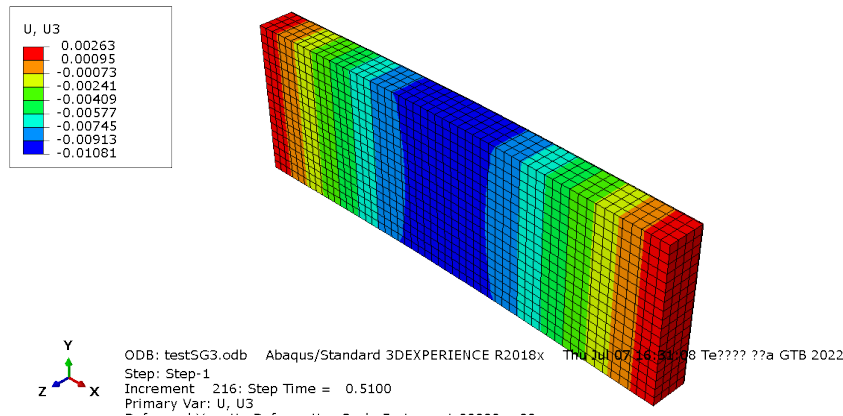


Σχ 4. 14 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Από τα Σχ 4. 14 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι η επιφάνεια του τοιχώματος που συνορεύει με την ενίσχυση (εφελκυσόμενη παρειά τοιχώματος) λαμβάνει σχεδόν σε όλη την επιφάνεια της max εφελκυστική τάση μεταξύ 62kPa και 882kPa. Αυτές οι τιμές είναι όμως μικρότερες από τις

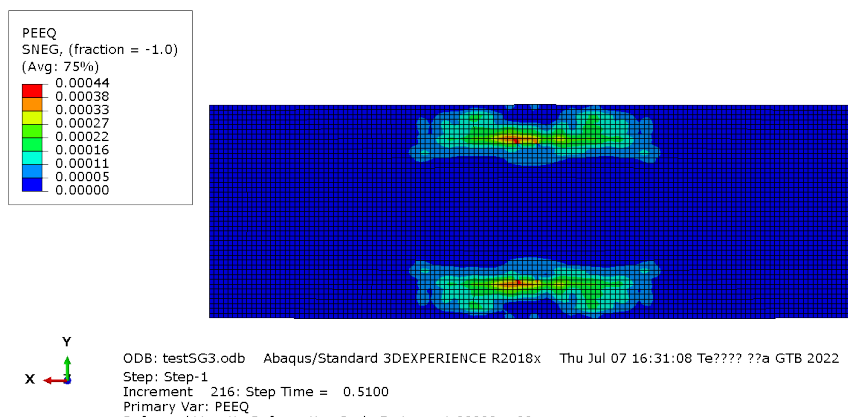
εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στην ενίσχυση (Σχ 4. 11), κάτι λογικό μιας και η χρησιμότητα της ενίσχυσης είναι να υποστηρίξει και να λαμβάνει αυτή τις μέγιστες καταπονήσεις που δέχεται η τοιχοποιία.

Ενίσχυση SC8R-τοιχώμα C3D8R



Σχ 4. 15 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 για όλο το προσομοίωμα του ενισχυμένου τοιχώματος

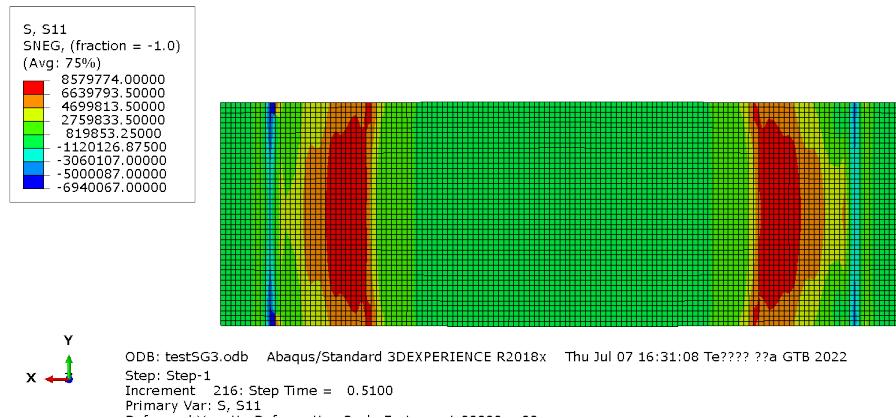
Στο Σχ 4. 15 η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση είναι -0.0101608m , ενώ την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετακίνηση κυμαίνεται μεταξύ 0.00095m και 0.00263m . Οι τιμές είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες του Σχ 4. 9.



Σχ 4. 16 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκυόμενη παρειά της ενίσχυσης

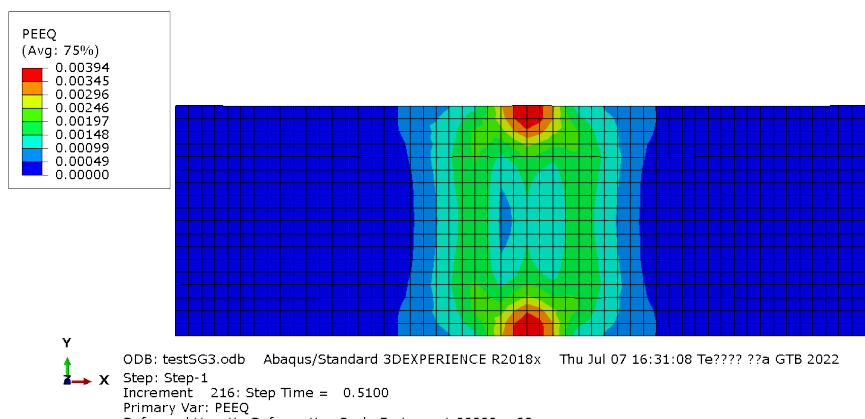
Στο Σχ 4. 16 σημειώνεται παρόμοια μορφή (στις περιοχές των ακραίων διαμήκων ινών, στην διεύθυνση των διαμήκων ινών και κεντρικά της ενίσχυσης, επιβεβαίωση ολίσθησης ινών) και τιμές των μέσων πλαστικών παραμορφώσεων με το Σχ 4. 10. Όμως, τα μεγέθη των δύο πλαστικών

περιοχών αυτής της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερα από της ενίσχυσης -S8R, που σημαίνει ότι η ενίσχυση -SC8R πλαστικοποιείται περισσότερο.

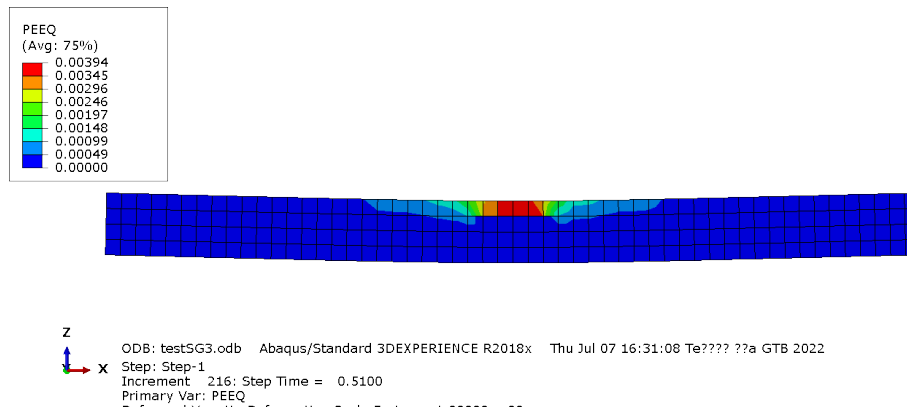


Σχ 4. 17 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης
Στο Σχ 4. 17 σημειώνεται η μέγιστη εφελκυστική τάση στις περιοχές των στηρίξεων να κυμαίνεται μεταξύ 6.6MPa και 8.6MPa < των αντίστοιχων τάσεων για την ενίσχυση S8R (μεταξύ 5.6MPa και 10.7 MPa, Σχ 4. 11). Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των δυο ενισχύσεων όμως παρατηρείται ότι η ενίσχυση -SC8R καταπονείται σε μεγαλύτερες περιοχές από τις μέγιστες τάσεις, οι περιοχές των οποίων σχηματίζουν ελλειπτικά τόξα προς τα άκρα της ενίσχυσης με κατακόρυφη διάμετρο τις στηρίξεις.

A)



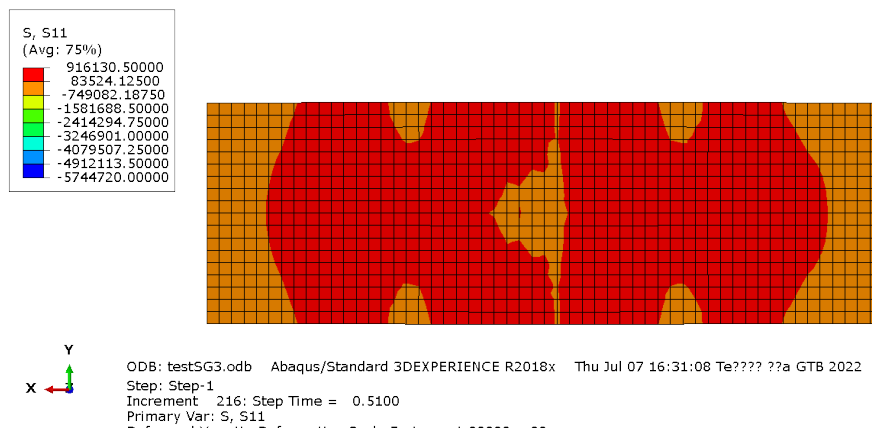
B)



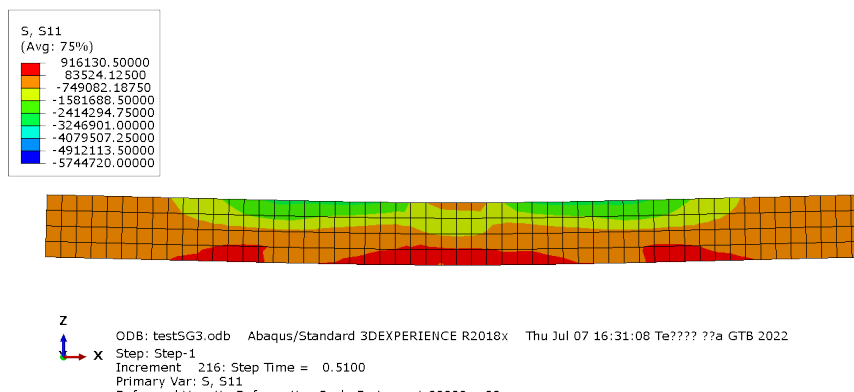
Σχ 4. 18 A), B) Διαγράμματα μέσωσ πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Επειδή και τα δύο τοιχώματα είναι C3D8R, τα Σχ 4. 18 A) και B) με τα Σχ 4. 13 A) και B) είναι παρόμοια, με την διαφορά των μέγιστων πιθανών PEEQ να είναι αμελητέα ($0.00407-0.00394=0.00013m \rightarrow 0.13mm$).

A)



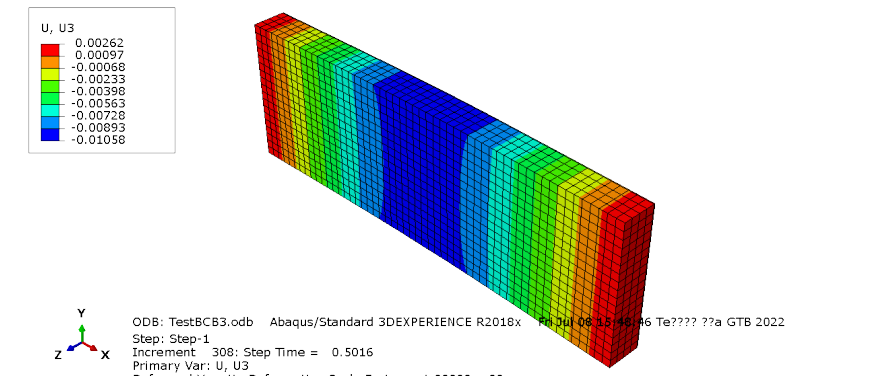
B)



Σχ 4. 19 A), B) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

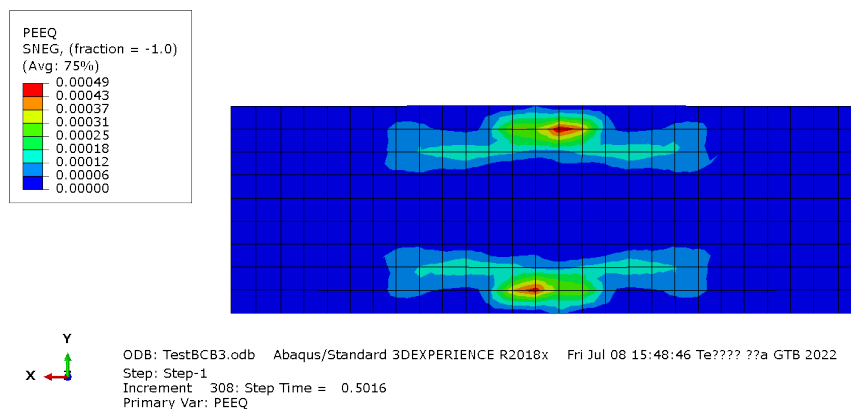
Για τον ίδιο λόγο με τα διαγράμματα PEEQ, τα Σχ 4. 19 A) και B) με τα Σχ 4. 14 A) και B) είναι παρόμοια (η επιφάνεια του τοιχώματος που συνορεύει με την ενίσχυση λαμβάνει σχεδόν σε όλη την επιφάνεια της τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 84kPa και 916kPa > των αντίστοιχων τάσεων στο Σχ 4. 14 (62kPa και 882kPa). Αυτό εξηγείται επειδή όπως αποδείχτηκε από τα διαγράμματα τάσεων S11 στην ενίσχυση (Σχ 4. 17 και Σχ 4. 11) η ενίσχυση S8R λαμβάνει μεγαλύτερη σε μέγιστη τάση S11 καταπόνηση από την ενίσχυση SC8R, άρα υποστηρίζει περισσότερο το τοίχωμα, άρα, όπως είναι λογικό, το τοίχωμα της ενίσχυσης SC8R (Σχ 4. 19) καταπονείται περισσότερο από το αντίστοιχο για ενίσχυση S8R (Σχ 4. 14).

Ενίσχυση S8R-τοιχώμα CSS8



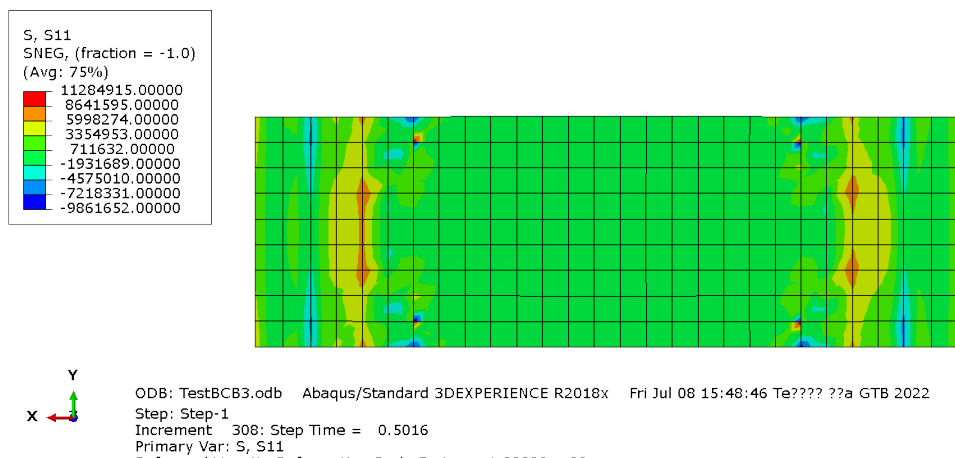
Σχ 4. 20 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο όλο προσομοίωμα του ενισχυμένου τοιχώματος

Στο Σχ 4. 20 η κρίσιμη μετατόπιση στην max φόρτιση είναι -0.0100144m ενώ την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος κυμαίνεται μεταξύ 0.00097m και 0.00262m. Οι τιμές είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες προηγούμενες.



Σχ 4. 21 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

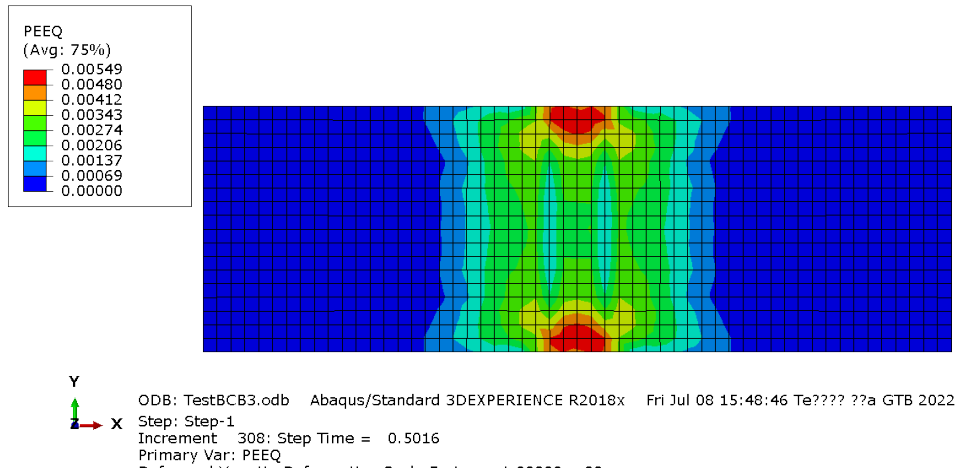
Η μορφή του Σχ 4. 21 είναι παρόμοια με τις αντίστοιχες προηγούμενες (Σχ 4. 10 και Σχ 4. 16, ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων στις περιοχές των ακραίων διαμήκων ινών, στην διεύθυνση των διαμήκων ινών και κεντρικά της ενίσχυσης, επιβεβαίωση ολίσθησης ινών). Τα αξιοσημείωτα στο Σχ 4. 21 είναι ότι υπάρχουν μικρότερες σε τιμή μέσες πλαστικές παραμορφώσεις συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις (Σχ 4. 10 και Σχ 4. 16) και ότι παρόλο που είναι ενίσχυση S8R όπως στο Σχ 4. 10, εδώ έχουν αρχίσει και πλαστικοποιούνται περισσότερα στοιχεία στην διαμήκη διεύθυνση, με την πλαστικοποίηση να φθίνει όσο τα στοιχεία απομακρύνονται στις άκρες της ενίσχυσης. Μια εύλογη υπόθεση που θα αποδειχτεί στην συνέχεια είναι ότι στο συνδυασμό Ενίσχυση S8R-τοιχώμα CSS8 η ενίσχυση πλαστικοποιείται ευκολότερα, γρηγορότερα και για μικρότερα φορτία λόγω του τοιχώματος -CSS8.



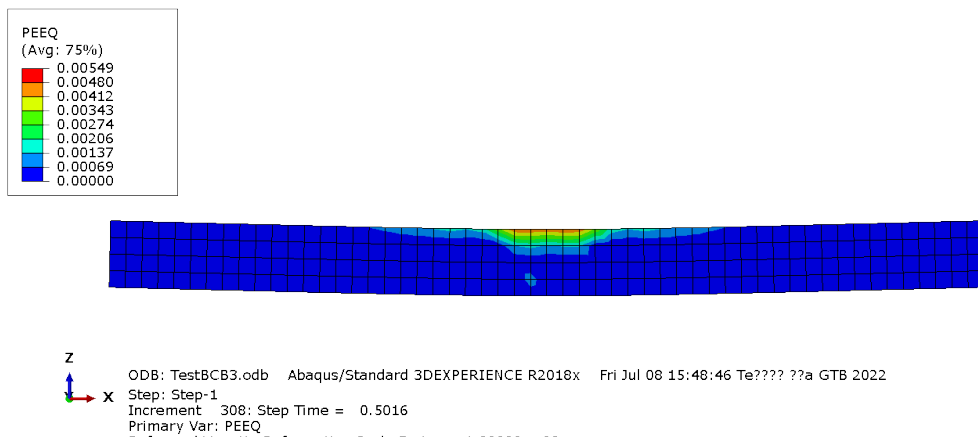
Σχ 4. 22 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης
Στο Σχ 4. 22 παρατηρείται ότι η μέγιστη εφελκυστική τάση που προσεγγίζει η ενίσχυση είναι μεταξύ 8.6MPa και 11.3MPa που καταγράφεται όμως σε ορισμένα στοιχεία. Στην πράξη, η μέγιστη εφελκυστική τάση που θα απασχολήσει εντοπίζεται στις στηρίξεις και κυμαίνεται μεταξύ 6MPa και 8.6 MPa < των αντίστοιχων για ίδιο είδος ενίσχυσης S8R (μεταξύ 5.6MPa και 10.7MPa, Σχ 4. 11). Επίσης, συγκρίνοντας τα διαγράμματα Σχ 4. 11 και Σχ 4. 22 παρατηρείται ότι η

ενίσχυση του συνδυασμού S8R-D3C8R αναλαμβάνει μεγαλύτερες σε τιμή τάσεις S11 από την ενίσχυση του συνδυασμού S8R-CSS8.

A)



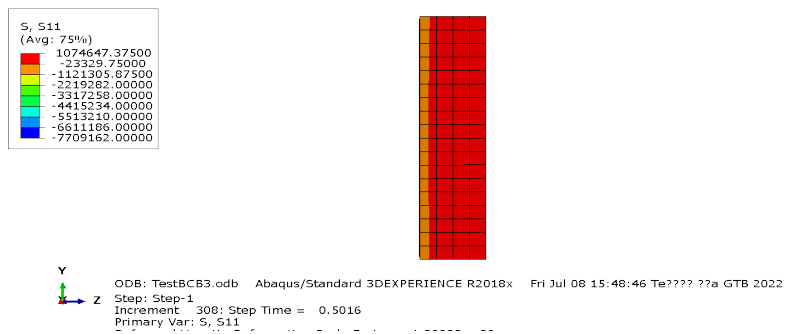
B)



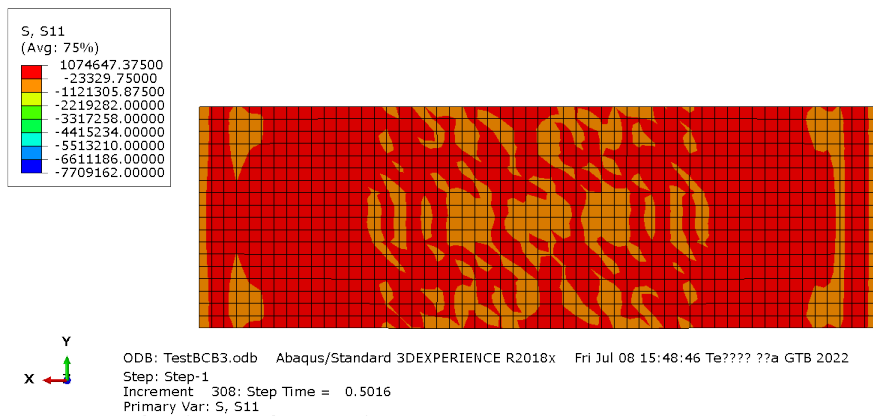
Σχ 4. 23 A), B) Διαγράμματα μέσω πλαστικών παραμορφώσεων στο τοίχωμα

Συγκρίνοντας τα Σχ 4. 23, Σχ 4. 13 και Σχ 4. 18 (A) και B) αντίστοιχα), εξαγεται το συμπέρασμα ότι είναι παρόμοια στην μορφή, αλλά το Σχ 4. 23 του τοιχώματος -CSS8 έχει την μεγαλύτερη πιθανή μέση πλαστική παραμόρφωση (άρα το τοίχωμα -CSS8 πλαστικοποιείται περισσότερο από τα αντίστοιχα C3D8R) διαφέροντας από την αμέσως μεγαλύτερη πιθανή μέση πλαστική παραμόρφωση $0.00549-0.00407=0.00142m \rightarrow 1.42mm$.

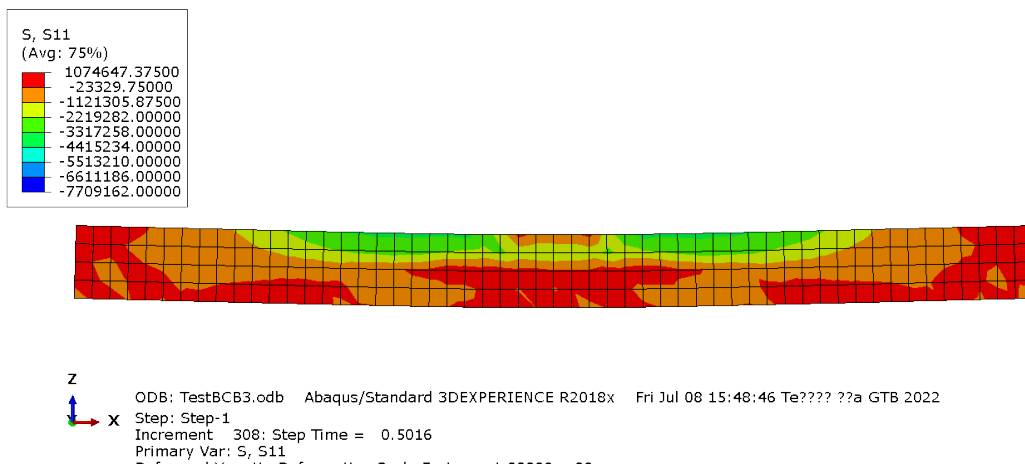
A)



B)



Γ)

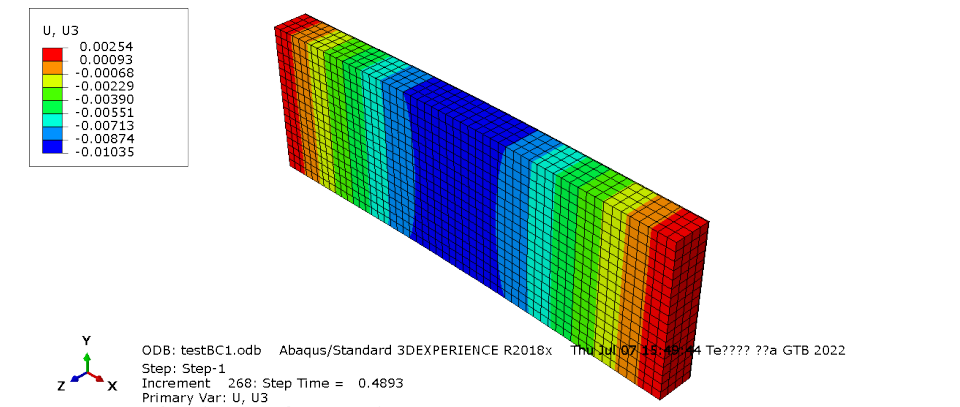


Σχ 4. 24 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Από τα Σχ 4. 24 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της τοιχοποιίας SCC8 καταπονείται σε εφελκυσμό, με max πιθανή τιμή εφελκυστικής τάσης 1.1 MPa. Επειδή η max πιθανή S11 των Σχ 4. 24 είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με των Σχ 4. 19 (916kPa) και των Σχ 4. 14 (882kPa) εκτιμάται ότι δεν είναι ο πιο αποδοτικός ο συνδυασμός

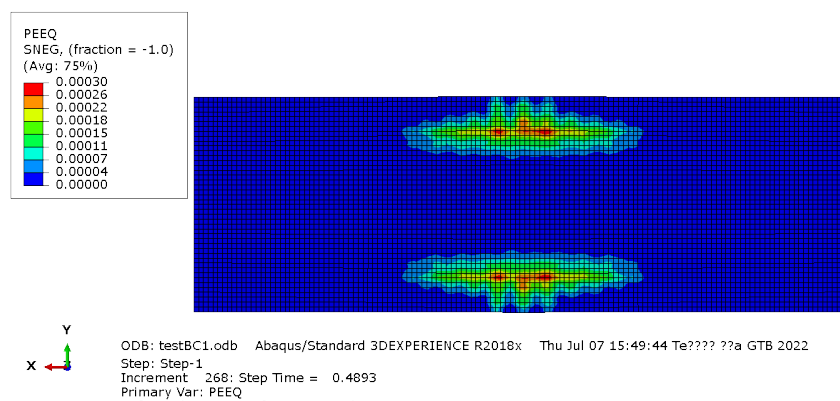
συμβατικού κελύφους με συνεχούς στερεού κελύφους μιας και η ενίσχυση δεν συνεισφέρει το ίδιο σημαντικά στην υποστήριξη του τοιχώματος.

Ενίσχυση SC8R-τοιχώμα CSS8



Σχ 4. 25 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 σε όλο το προσομοίωμα

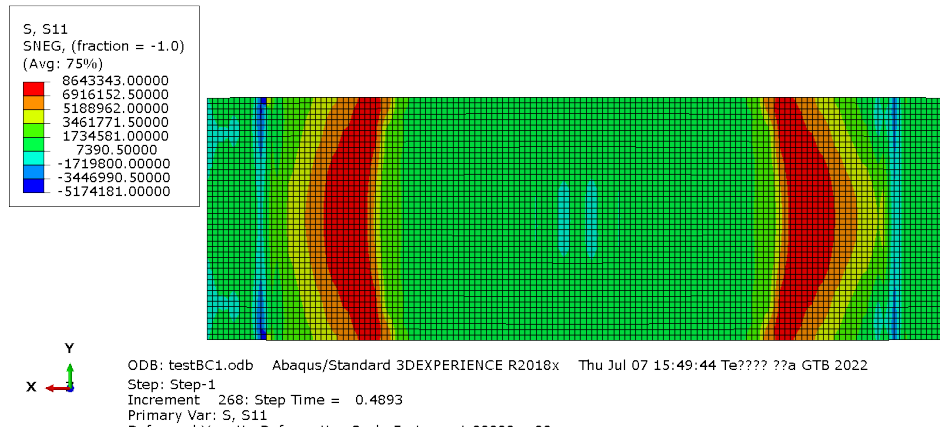
Στο Σχ 4. 25 η κρίσιμη μετατόπιση στην max φόρτιση καταγράφεται -0.00976968m, ενώ την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος κυμαίνεται μεταξύ 0.00093m και 0.00254m. Οι τιμές είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες των προηγούμενων προσομοιωμάτων. Την μεγαλύτερη μετατόπιση σε μέτρο παρουσιάζει πάντως το προσομοίωμα S8R-D3C8R με μετατόπιση -0.0105515m (Σχ 4. 9).



Σχ 4. 26 Διάγραμμα μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκυστική παρειά της ενίσχυσης

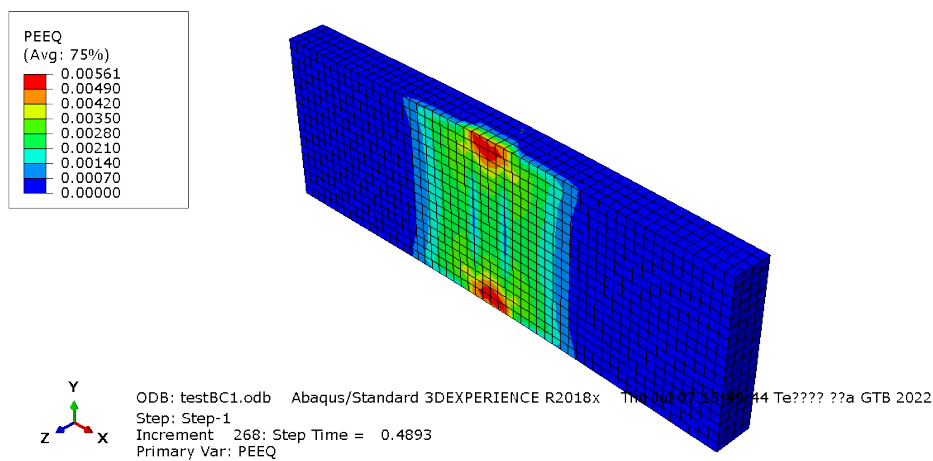
Το Σχ 4. 26 είναι παρόμοιο με το Σχ 4. 16, κάτι λογικό αφού πρόκειται για ίδιο είδος ενίσχυσης -SC8R. Όμως αξίζει να σημειωθεί ότι σε τιμή παρουσιάζει την μικρότερη πιθανή max PEEQ αλλά και τις μικρότερες σε

τιμή γενικά πλαστικές παραμορφώσεις συγκριτικά με τους προηγούμενους συνδυασμούς (Σχ 4. 10,Σχ 4. 16 και Σχ 4. 21).

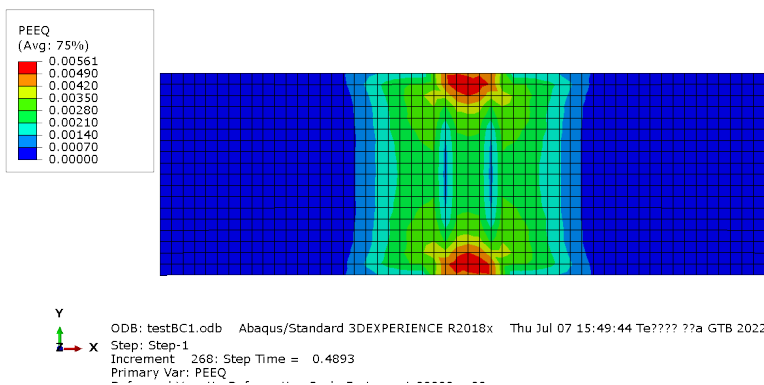


Σχ 4. 27 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης
 Στο Σχ 4. 27 παρατηρείται το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο να κυμαίνεται μεταξύ 6.9MPa και 8.6MPa και να αναπτύσσεται στις στηρίξεις αλλά και με ελλειπτική μορφή προς τα άκρα της ενίσχυσης. Τόσο στην μορφή όσο και στις τιμές των τάσεων S11, συμπεριλαμβανομένων των μεγίστων, παρατηρείται ότι τα Σχ 4. 27 και Σχ 4. 17 είναι παρόμοια. Η ενίσχυση πάντως με την μεγαλύτερη καταπόνηση με τάσεις S11, που σημαίνει ότι ενισχύει σημαντικότερα το τοίχωμα, συγκρίνοντας τα Σχ 4. 11,Σχ 4. 17 ,Σχ 4. 22 και Σχ 4. 27, συμπεραίνεται ότι είναι η S8R για τον συνδυασμό S8R-D3C8R.

A)



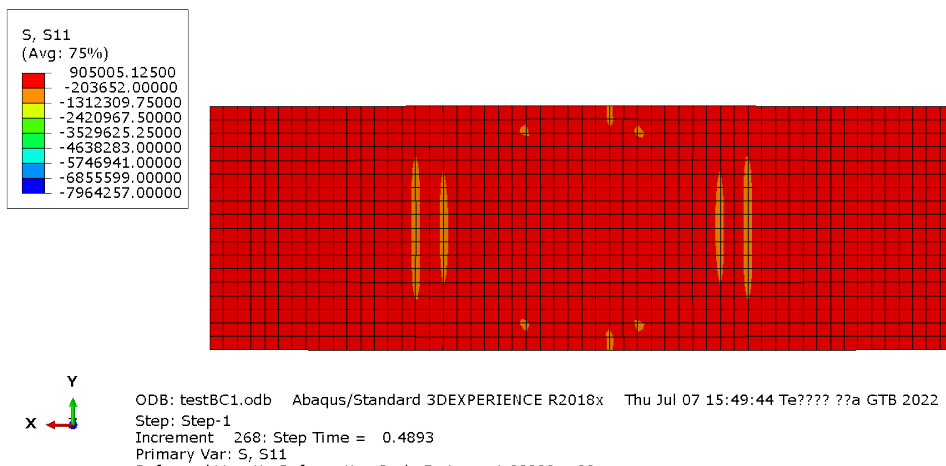
B)



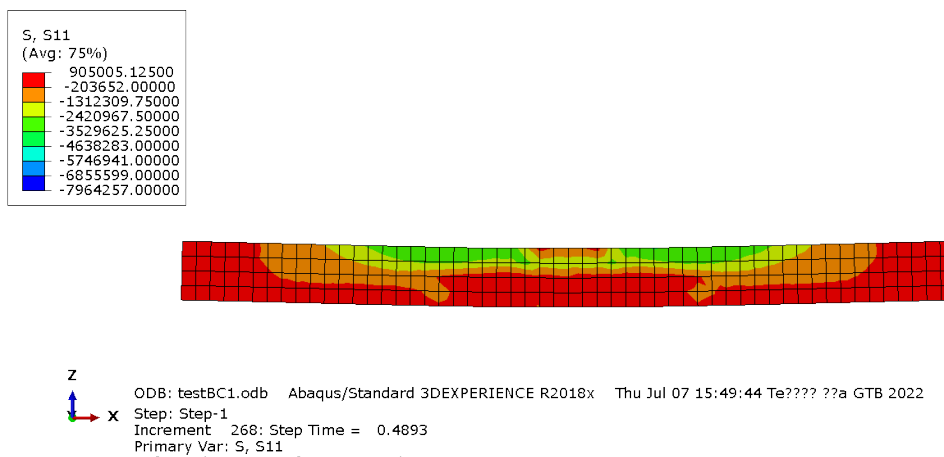
Σχ 4. 28 A), B) Διαγράμματα μέσωσν πλαστικώσν παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Τα Σχ 4. 28 A),B) παρουσιάζουσν παρόμοια κατάσταση τόσο στην μορφή όσο και στις τιμές PEEQ με τα Σχ 4. 23, κάτι λογικό, αφού πρόκειται για το ίδιο είδος τοιχώματος -CSS8.

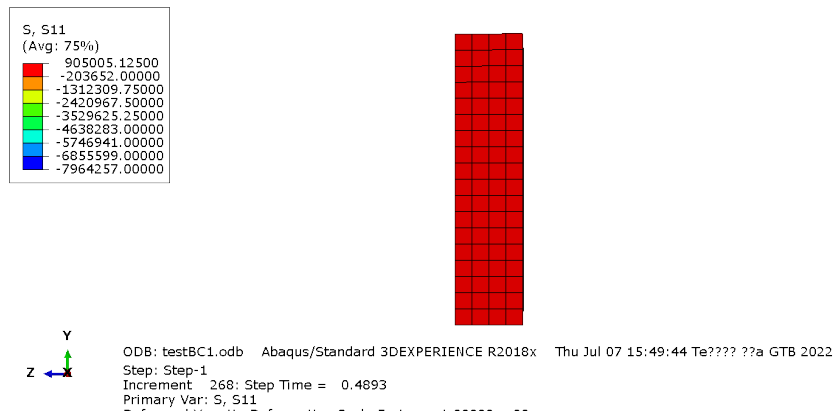
A)



B)



Γ)



Σχ 4. 29 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Στα Σχ 4. 29 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι η περισσότερη τοιχοποιία καταπονείται σε εφελκυσμό, με μέγιστη πιθανή τάση 905kPa. Ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει από την τελευταία αυτή σύγκριση των συνδυασμών (Σχ 4. 14, Σχ 4. 19, Σχ 4. 24 και Σχ 4. 29) είναι ότι οι μικρότερες μέγιστες πιθανές, αλλά και γενικά τις μικρότερες εφελκυστικές τάσεις στο τοίχωμα πραγματοποιούνται για τον συνδυασμό S8R-C3D8R, αποδεικνύοντας για άλλη μια φορά ότι ο συγκεκριμένος συνδυασμός προσεγγίζει την ουσιαστικότερη υποστήριξη του τοιχώματος από την ενίσχυση, και άρα την ρεαλιστικότερη προσομοίωση του ενισχυμένου δοκιμίου.

5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΜΨΗΣ 3 ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ TRM ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

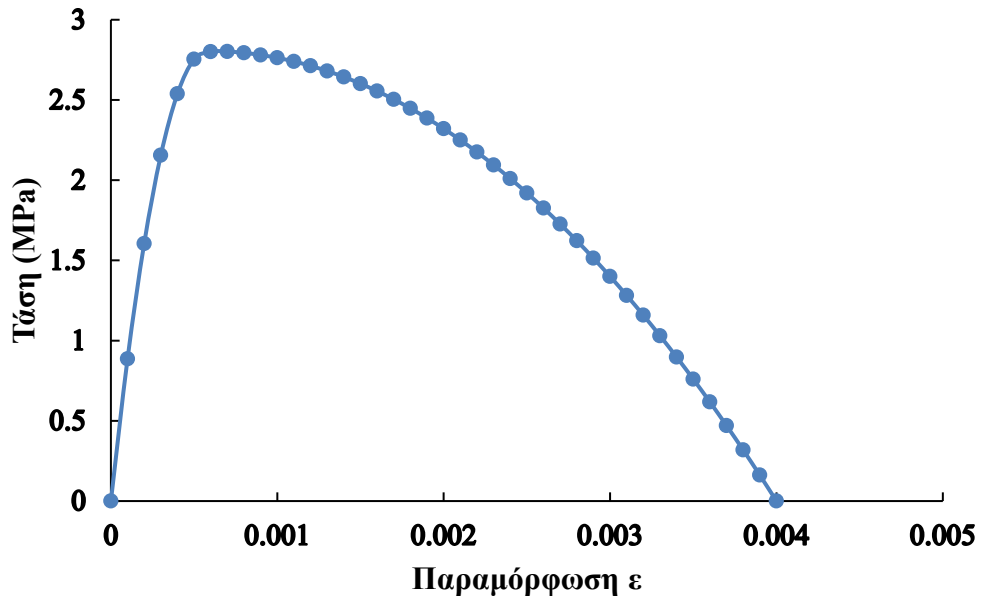
Με το πέρας την ενότητας 4 επιτεύχθηκε μια πρώτη ορθολογική προσομοίωση του συγκεκριμένου δοκιμίου και του αντίστοιχου ελέγχου. Όμως, ενώ η καμπύλη του προσομοιώματος S8R-C3D8R προσεγγίζει ικανοποιητικά την πειραματική καμπύλη, η max φόρτιση του προσομοιώματος προσεγγίζεται για μικρότερη μετατόπιση και απέχει από την αντίστοιχη πραγματική max φόρτιση:

$(22999.62-17919.8)/ 22999.62*100\%= 22.0865\%$ η οποία πρόκειται για σημαντική απόκλιση

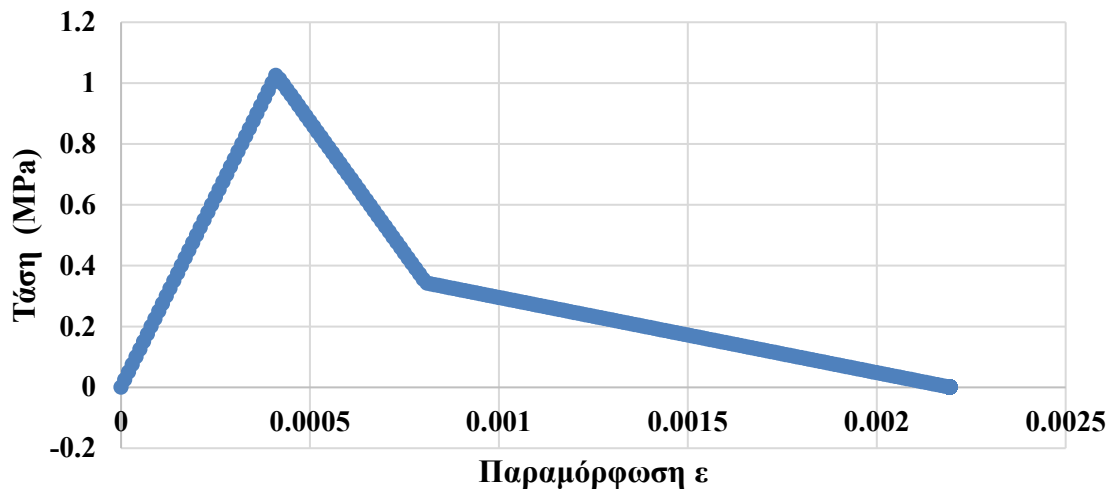
Αυτή η απόκλιση μπορεί να συμβαίνει επειδή α) μπορεί τα δεδομένα των αντοχών των υλικών (ενότητα 4.1) να είναι μικρότερα από τις πραγματικές αντοχές που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια του ελέγχου (μπορεί να αναπτύσσονται και υπεραντοχές των υλικών) ή β) μπορεί το Abaqus να λαμβάνει υπόψιν κάποιους παράγοντες του δοκιμίου περισσότερο ή λιγότερο σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες. Για την διερεύνηση των α) και β) και την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων για το προσομοίωμα θα πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση του προσομοιώματος με εξεταζόμενες μεταβλητές: γωνία τριβής τοιχοποιίας, γωνία τριβής τσιμεντοειδούς, θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας, θλιπτική αντοχή τσιμεντοειδούς, εφελκυστική αντοχή τσιμεντοειδούς, προσομοίωση ινών άνθρακα και στρώσεις ινών άνθρακα.

5.1 ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Η γωνία τριβής της τοιχοποιίας θα υπολογιστεί αναλυτικά, για χάρη και της ενότητας 4.2. Για τον υπολογισμό χρειάζεται Α) η τάση διαρροής στην θλίψη της τοιχοποιίας, η οποία λαμβάνεται από το Σχ 5. 1 $\sigma_0 = 2.7626\text{MPa}$ και Β) η τάση θραύσης στον εφελκυσμό της τοιχοποιίας η οποία λαμβάνεται από το Σχ 5. 2 $\sigma_t = 1.025\text{MPa}$. Τα Σχ 5. 1 και Σχ 5. 2 προκύπτουν από τις αντίστοιχες στήλες από το excel που διαμορφώθηκε στην ενότητα 4.2 για την επιτυχή προσομοίωση της εφελκυστικής και θλιπτικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας.



Σχ 5. 1 θλιπτική τάση (MPa) – παραμόρφωση ε



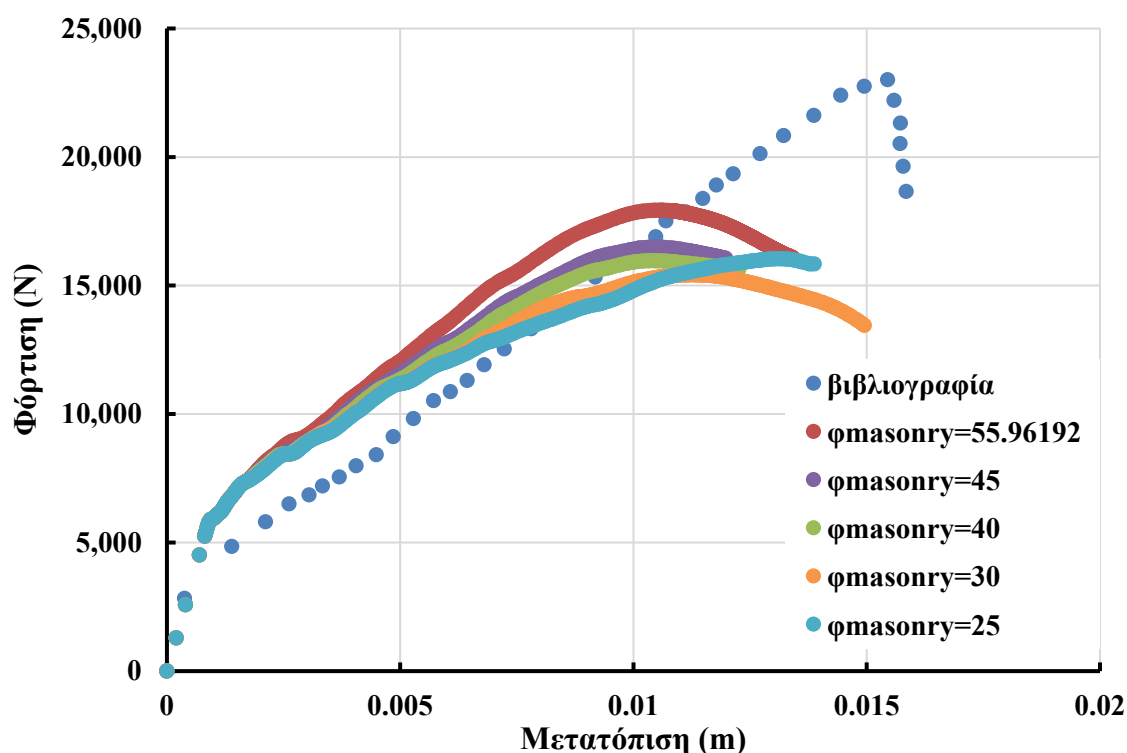
Σχ 5. 2 εφελκυστική τάση (MPa) – παραμόρφωση ε

Μετά χρησιμοποιώντας τον τύπο

$B = (\sigma_t - \sigma_c) / (\sigma_t + \sigma_c) / \sqrt{3} = -0.264864181$ και λαμβάνοντας και τις τρεις περιπτώσεις των πιθανών τύπων:

$$B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad B = \frac{\sin \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}}$$

Υπολογίζονται οι πιθανές γωνίες τριβής (για αρνητικό $\sin\phi$ ισχύει $\phi=90+\text{αποτέλεσμα}$): $\phi=26.7518006^\circ$ (πολύ μικρό), $\phi=55.96191869^\circ$, $\phi=63.40900947^\circ$ (πολύ μεγάλο και απορρίπτεται). Άρα η τελική γωνία τριβής τοιχοποιίας είναι $\phi=55.96191869^\circ$. Για να εκτιμηθεί πώς επηρεάζει η γωνία τριβής τοιχοποιίας τις αναλύσεις του προσομοιώματος θα δοκιμαστούν επίσης και οι γωνίες $\phi=45^\circ, 40^\circ, 30^\circ, 25^\circ \approx 26.7518006^\circ$. Από το Σχ 5. 3 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:



- Σχ 5. 3 Διάγραμμα καμπύλων με μεταβλητή την γωνία τριβής τοιχοποιίας
- A) Σε όλα τα ϕ σχεδόν ταυτίζονται οι καμπύλες στην ελαστική περιοχή μέχρι την έναρξη της πλαστικοποίησης (μέχρι το πρώτο σπάσιμο της καμπύλης όπου τότε ρηγματώνεται το τσιμεντοειδές).
- B) Για $\phi=55.96191869^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 30^\circ$ οι καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης, όπου: μεγαλύτερο $\phi \rightarrow$ μεγαλύτερες φορτίσεις και μεγαλύτερη max φόρτιση.
- Γ) Για $\phi=25^\circ \approx 26.7518006^\circ$ η καμπύλη μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης διαφέρει σημαντικά σε μορφή από τις άλλες. Συγκεκριμένα, την max φόρτιση την προσεγγίζει στην μεγαλύτερη μετατόπιση σε σχέση με τα άλλα ϕ , της οποίας max φόρτιση είναι

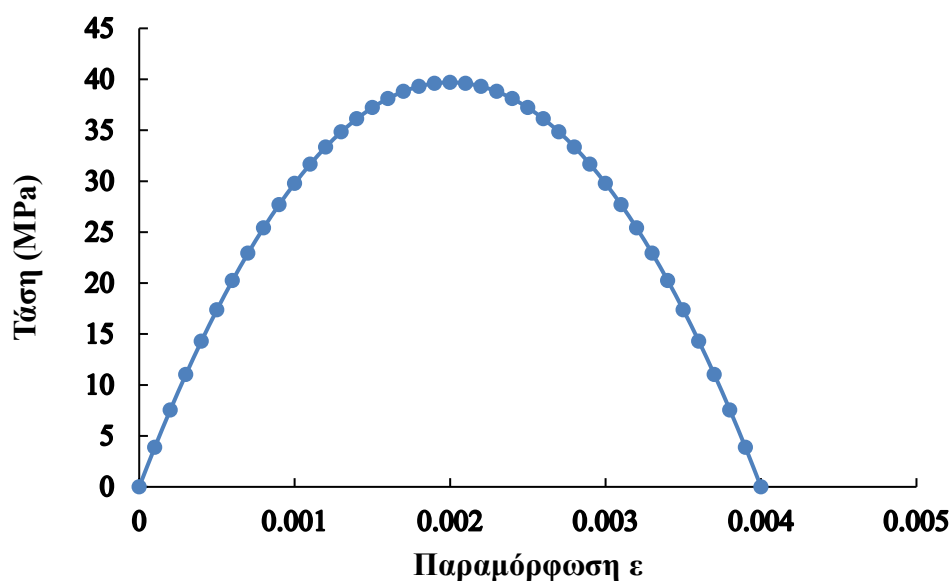
μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες για $\varphi = 40^\circ$, 30° και περίπου ίση με $\varphi = 45^\circ$. Όμως η μορφή της προσεγγίζει λιγότερο την αντίστοιχη μορφή της πειραματικής καμπύλης.

Δ) Σε σχέση με την πειραματική καμπύλη η $\varphi = 55.96191869^\circ$ είναι σχετικά παράλληλη της μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης και γενικά φαίνεται ότι την προσεγγίζει στον ικανοποιητικότερο βαθμό συγκριτικά με τις άλλες καμπύλες.

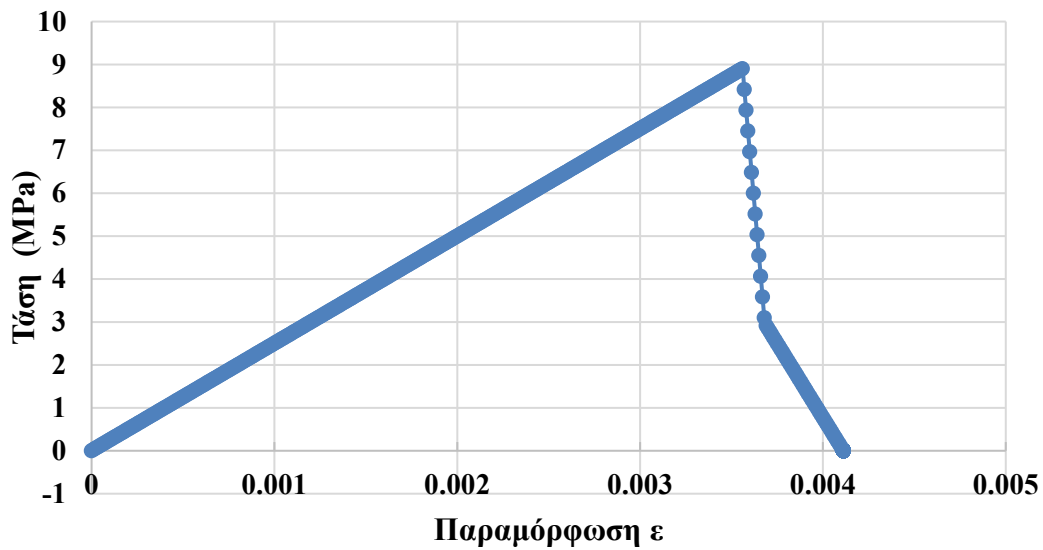
Από τα ανώτερο συμπεράσματα επεξηγείται επαρκώς η εξαρχής επιλογή της γωνίας τριβής της τοιχοποιίας $\varphi = 55.96191869^\circ$.

5.2 ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΟΥΣ

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία υπολογισμών με την ενότητα 5.1, για χάρη και της ενότητας 4.2. Τάση διαρροής στην θλίψη του τσιμεντοειδούς, η οποία λαμβάνεται από το Σχ 5. 4 $\sigma_0 = 20.2469997 \text{MPa}$ και τάση θραύσης στον εφελκυσμό του τσιμεντοειδούς η οποία λαμβάνεται από το Σχ 5. 5 $\sigma_t = 8.650340062 \text{MPa}$, με τα Σχ 5. 4 και Σχ 5. 5 να προκύπτουν από τις αντίστοιχες στήλες από το excel που διαμορφώθηκε στην ενότητα 4.2 για την επιτυχή προσομοίωση της εφελκυστικής και θλιπτικής συμπεριφοράς του τσιμεντοειδούς $\rightarrow B = -0.231693804 \rightarrow \varphi = 41.14367076^\circ \approx 40^\circ$, 59.91004226° (πολύ μεγάλο και απορρίπτεται) και 49.36456271° το οποίο και επιλέγεται.

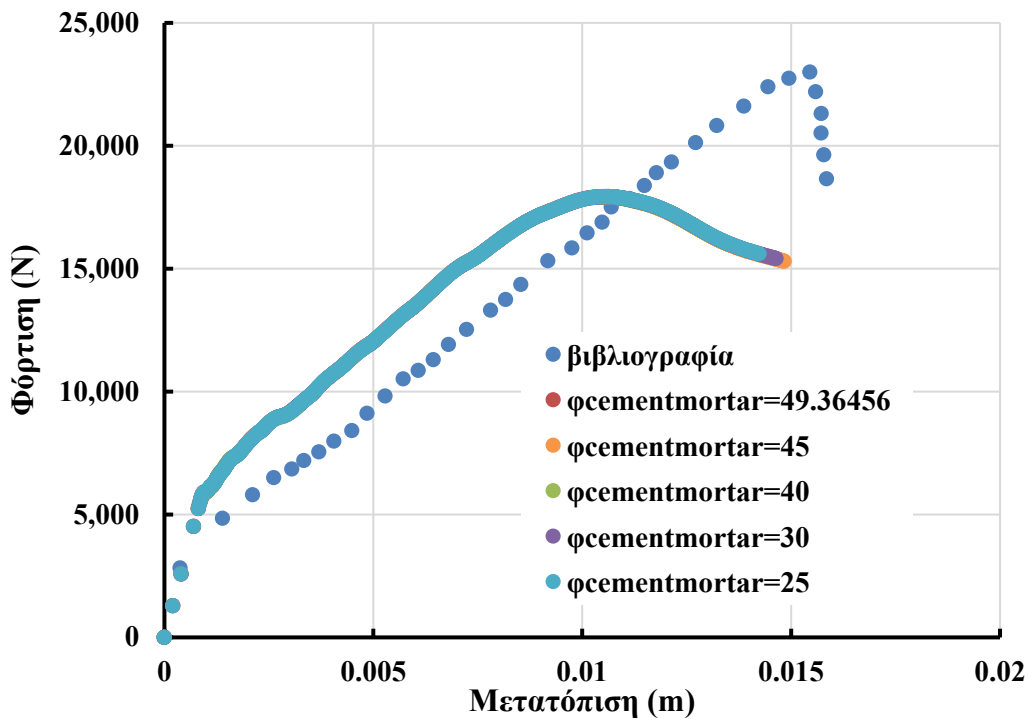


Σχ 5. 4 Διάγραμμα θλιπτική τάση (MPa) – παραμόρφωση ε



Σχ 5. 5 Διάγραμμα εφελκυστική τάση (MPa) – παραμόρφωση ϵ

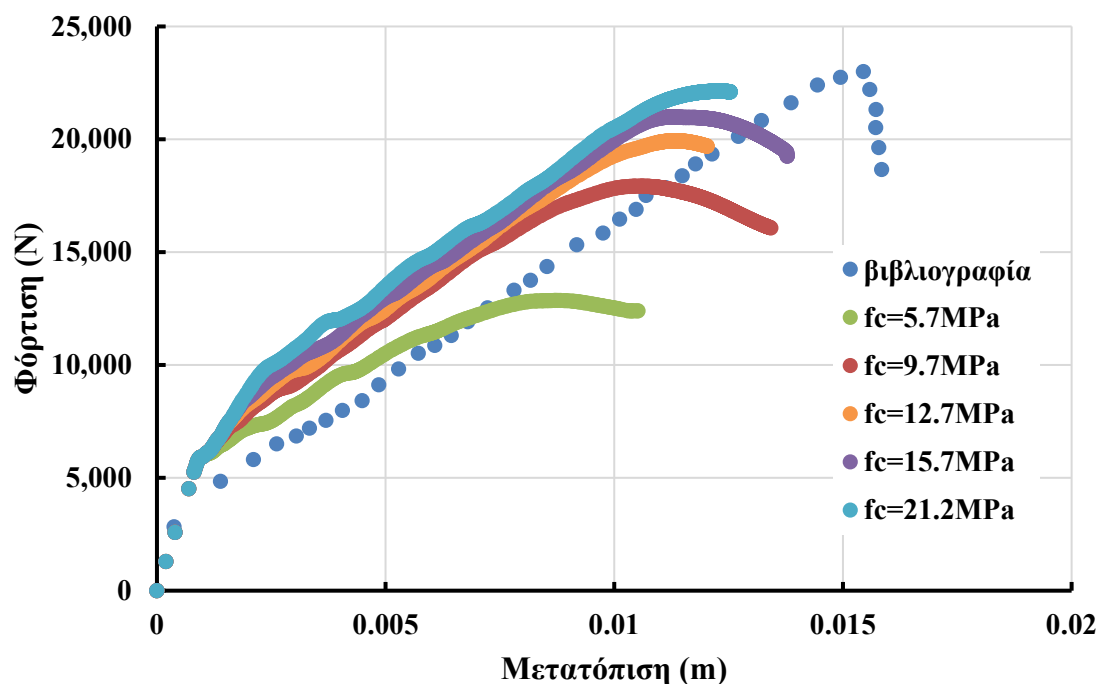
Από το Σχ 5. 6 παρατηρείται ότι οι καμπύλες για διαφορετικές γωνίες τριβής τσιμεντοειδούς ουσιαστικά συμπίπτουν. Άρα στην προσομοίωση του συγκεκριμένου πειράματος η γωνία τριβής τσιμεντοειδούς δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα.



Σχ 5. 6 Διάγραμμα καμπύλων με μεταβλητή την γωνία τριβής τσιμεντοειδούς

5.3 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Αξίζει να επισημανθεί ότι αλλάζοντας την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας αλλάζει επίσης η γωνία τριβής της τοιχοποιίας (όπως αποδείχθηκε στον αναλυτικό υπολογισμό της στην ενότητα 5.1) καθώς επίσης και η εφελκυστική αντοχή αφού προκύπτει από τον τύπο $f_t = 0.33 \cdot \sqrt{f_c}$ (αν και στην παρεία της τοιχοποιίας που δρουν εφελκυστικές τάσεις συνεισφέρει η ενίσχυση στην αντοχή του δοκιμίου).



Σχ 5. 7 Διάγραμμα καμπύλων με μεταβλητή την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Από το Σχ 5. 7 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

A) Όλες οι καμπύλες ταυτίζονται στην ελαστική περιοχή, μέχρι την έναρξη της πλαστικοποίησης (μέχρι το πρώτο σπάσιμο της εκάστοτε καμπύλης όπου τότε ρηγματώνεται το τσιμεντοειδές).

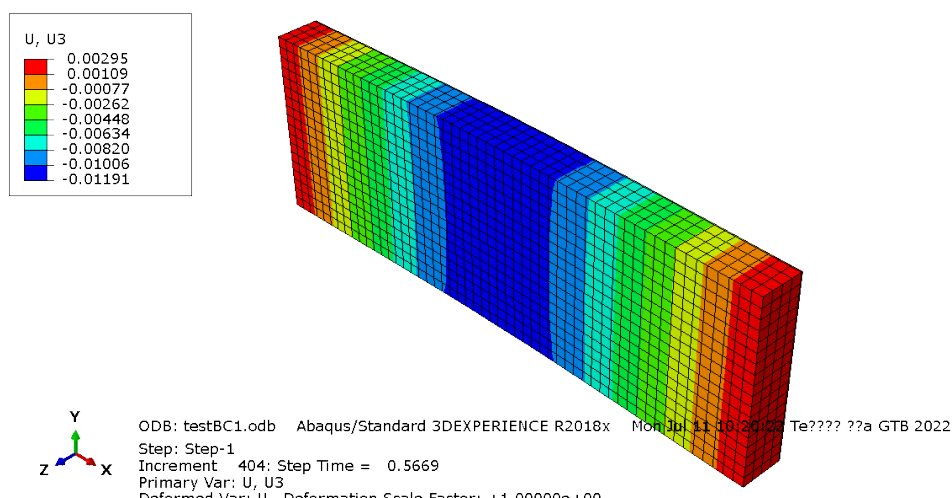
B) Μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης παρατηρούνται διαφορές στην κλίση, στις φορτίσεις, στην max φόρτιση και στην μετατόπιση που την προσεγγίζει η κάθε καμπύλη. Αναλυτικότερα, όταν αυξάνεται η θλιπτική αντοχή, αυξάνονται οι κλίσεις, οι φορτίσεις, οι max φορτίσεις και οι μετατοπίσεις που τις προσεγγίζουν οι αντίστοιχες καμπύλες. Όμως, σημαντική παρατήρηση αποτελεί ότι οι προαναφερθείσες διαφορές μεταξύ

των καμπυλών μικραίνουν, δηλαδή οι καμπύλες αρχίζουν να συγκλίνουν μεταξύ τους, όσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

Γ) Παρατηρείται ότι για θλιπτική αντοχή 9.7MPa (Kariou et al., 2018), 12.7MPa και 15.7MPa οι καμπύλες προσομοιώνουν σε σημαντικό βαθμό την πειραματική καμπύλη (μάλιστα όσο αναφορά το max φορτίο όσο μεγαλύτερο από τα 3 f_c τόσο πιο κοντά στην τιμή της πειραματικής καμπύλης). Άρα προς το παρόν θα κρατηθούν υπόψιν για μελλοντική διερεύνηση και οι τρεις τιμές f_c .

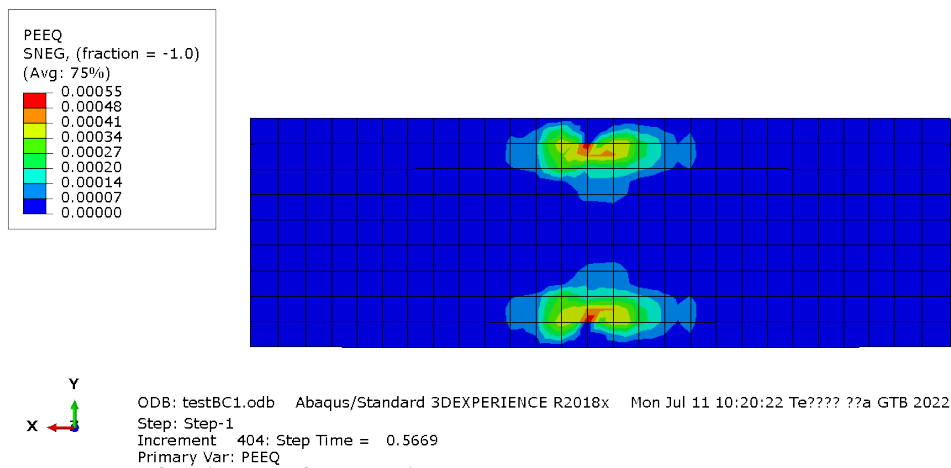
Μάλιστα, επειδή για $f_c=9.7\text{MPa}$ τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων είναι τα S8R-C3D8R του κεφαλαίου 4.4, παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων για $f_c=12.7\text{MPa}$ και $f_c=15.7\text{MPa}$ ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ τους και εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Για $f_c=12.7\text{MPa}$:



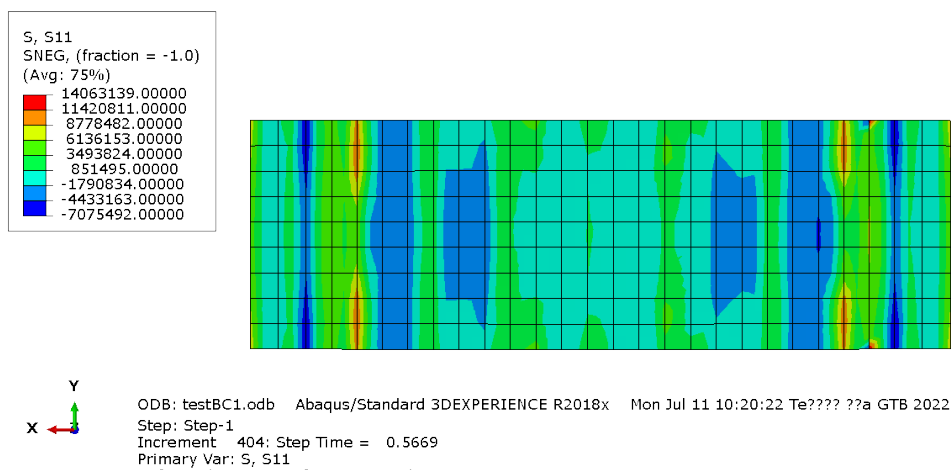
Σχ 5. 8 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο προσομοίωμα ενισχυμένου τοιχώματος

Στο Σχ 5. 8 καταγράφεται η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση $-0.011328\text{ m} \rightarrow$ κατά μέτρο $11.33\text{mm} > 10.55\text{mm}$ αντίστοιχα του Σχ 4. 9 για $f_c=9.7\text{MPa}$, κάτι λογικό αφού αυξήθηκε η αντοχή της τοιχοποιίας άρα και όλου του δοκιμίου. Την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 0.00109m και 0.00295m .



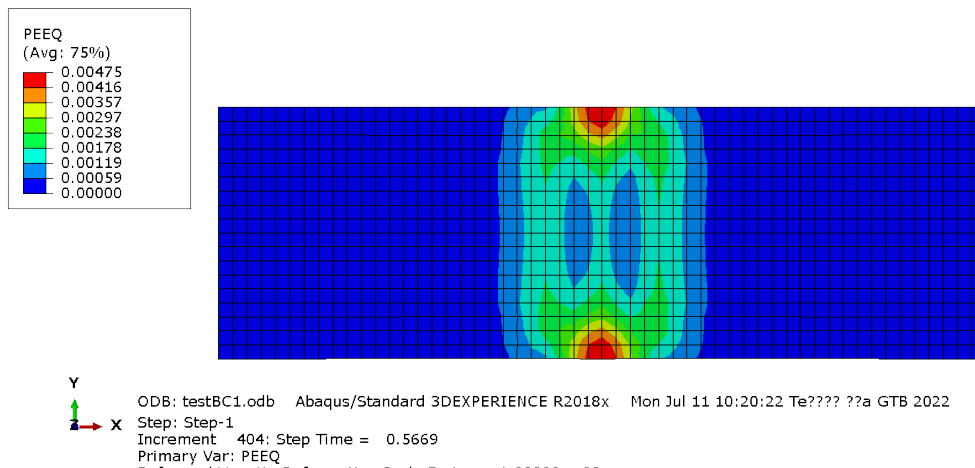
Σχ 5. 9 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκυστική παρειά της ενίσχυσης

Το Σχ 5. 9 είναι παρόμοιας μορφής με το Σχ 4. 10 (οι πλαστικές περιοχές αναπτύσσονται διαμήκως της ενίσχυσης, στις περιοχές των ακραίων διαμήκων ινών, ακολουθώντας την διεύθυνση των κρίσιμων τάσεων S11, καθώς επίσης και κεντρικά της ενίσχυσης). Όμως στο Σχ 5. 9 περισσότερα στοιχεία και από τις δύο μεριές έχουν πλαστικοποιηθεί σε σχέση με το Σχ 4. 10, κάτι λογικό, αφού η ενίσχυση καταπονείται από μεγαλύτερες φορτίσεις και για μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

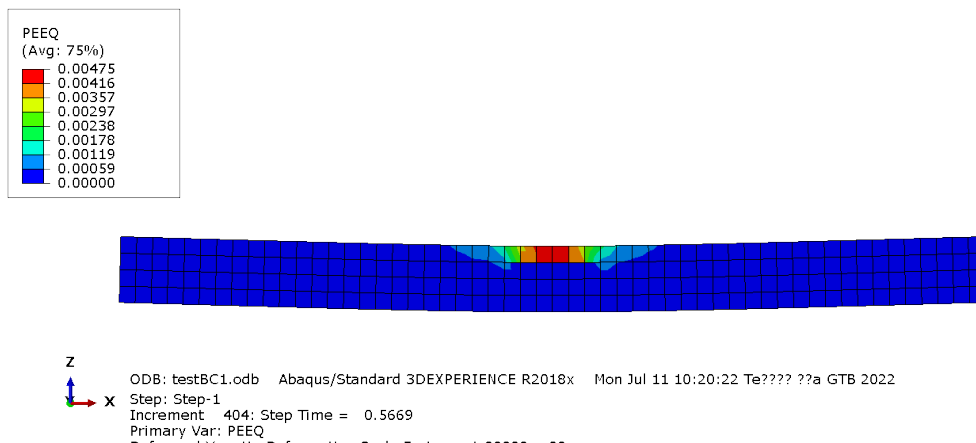


Σχ 5. 10 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκυστική παρειά της ενίσχυσης
 Από το Σχ 5. 10 καταγράφεται η μέγιστη εφελκυστική τάση που ασκείται σε περιοχές των στηρίξεων να κυμαίνεται μεταξύ 8.8MPa και 11.4MPa (< των αντίστοιχων για $f_c=9.7\text{MPa}$, Σχ 4. 11). Όμως, η ενίσχυση για $f_c=12.7\text{MPa}$ καταπονείται σε λιγότερα στοιχεία από τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις S11 συγκριτικά με την ενίσχυση για $f_c=9.7\text{MPa}$, αλλά κυρίως καταπονείται από εφελκυστικές τάσεις μεταξύ 851kPa και 3.5MPa.

A)



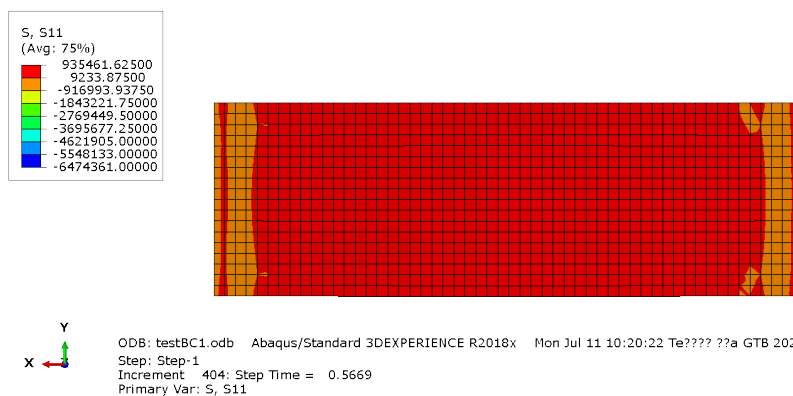
B)



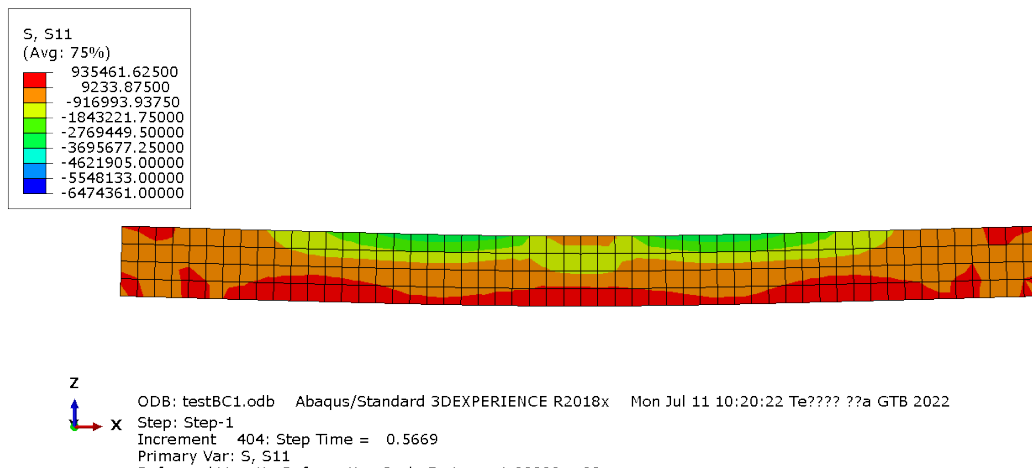
Σχ 5. 11 A), B) Διαγράμματα μέσωσν πλαστικώσν παραμορφώσων PEEQ στο τοίχωμα

Τα Σχ 4. 13 A), B) και Σχ 5. 11 A), B) είναι ίδιασ μορφής, με μέγιστο πιθανό PEEQ τωσν Σχ 5. 11 να είναι λίγο μεγαλύτερο από το αντίστοιχο τωσν Σχ 4. 11 ($4.75\text{mm} > 4.07\text{mm}$).

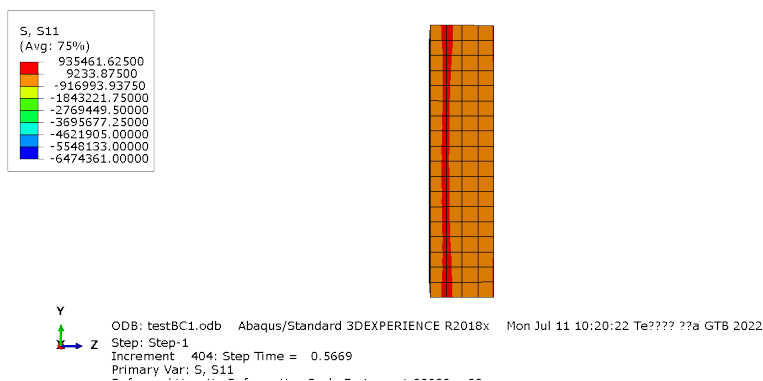
A)



B)



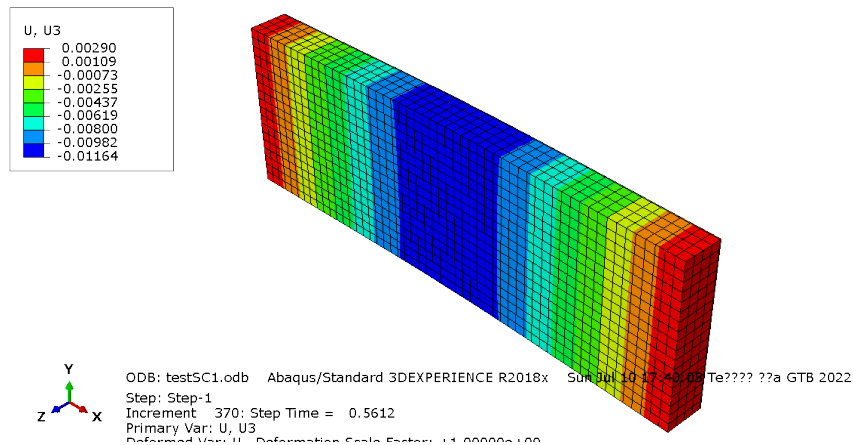
Γ)



Σχ 5. 12 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

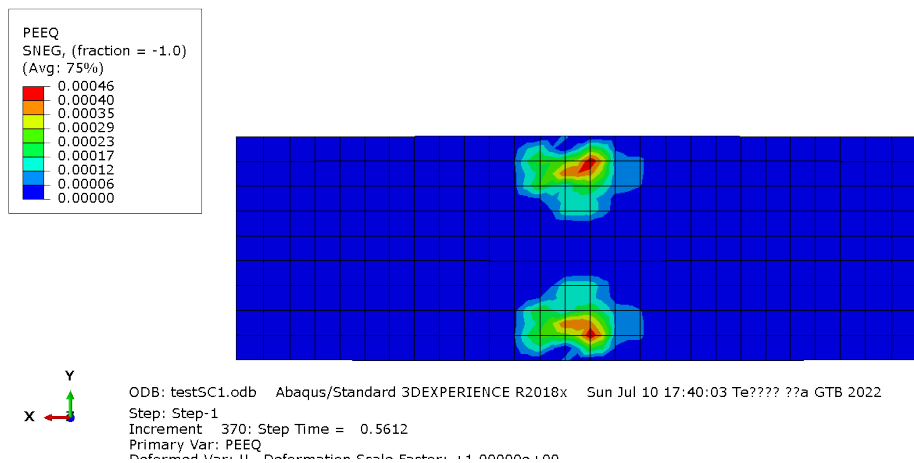
Συγκρίνοντας τα Σχ 5. 12 A),B) και Γ) με τα αντίστοιχα Σχ 4. 14 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι για $f_c=12.7\text{MPa}$ το τοίχωμα καταπονείται σε περισσότερα στοιχεία από τις μέγιστες τάσεις S11, οι οποίες είναι και μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για $f_c=9.7\text{MPa}$. Αυτό επεξηγείται από την στιγμή που για $f_c=12.7\text{MPa}$ το προσομοίωμα καταπονείται από μεγαλύτερη μέγιστη φόρτιση άρα αναπτύσσει και συνολικά μεγαλύτερες τάσεις S11 στο τοίχωμα του οποίου άλλωστε αυξήθηκε και η θλιπτική αντοχή του.

Για $f_c=15.7\text{MPa}$:



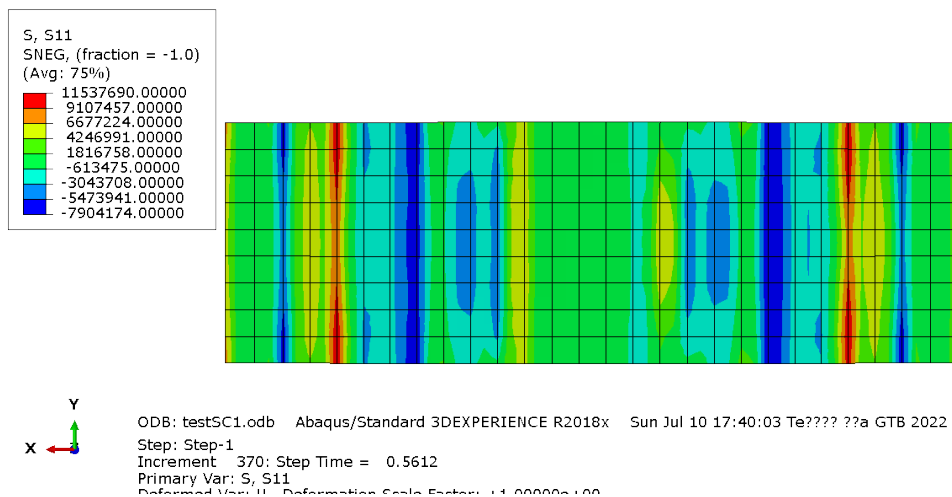
Σχ 5. 13 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο προσομοίωμα ενισχυμένου τοιχώματος

Στο Σχ 5. 13 η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση καταγράφεται $-0.0112162\text{m} \rightarrow$ κατά μέτρο $11.22\text{mm} < 11.33\text{mm}$ (Σχ 5. 8) για $f_c=12.7\text{MPa}$ και $11.22\text{mm} > 10.55\text{mm}$ (Σχ 4. 9) για $f_c=9.7\text{MPa}$. Αυτό σημαίνει ότι για $f_c=15.7\text{MPa}$ το δοκίμιο έγινε πιο δύσκαμπτο σε σχέση με το αντίστοιχο για $f_c=12.7\text{MPa}$. Την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 0.00109m και 0.0029m .



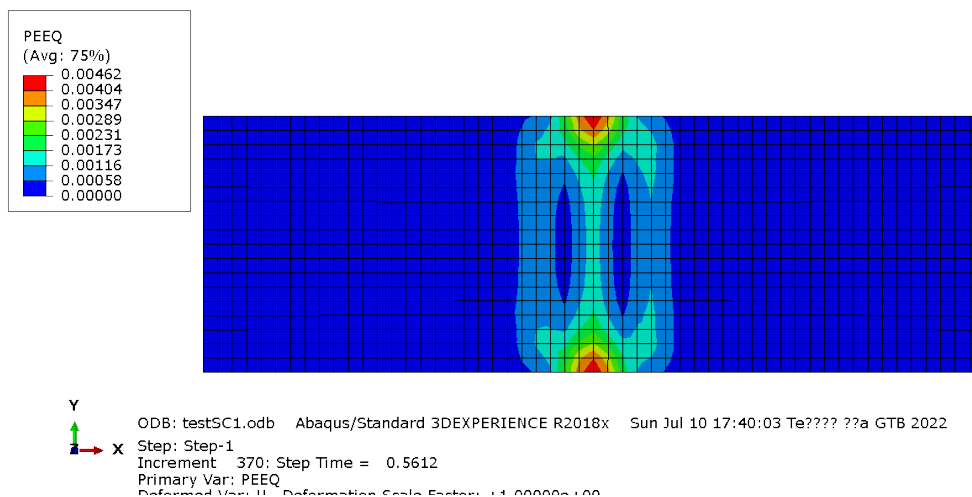
Σχ 5. 14 Διάγραμμα μέσω πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Το Σχ 5. 14 είναι παρόμοιας μορφής με τα Σχ 5. 9 και Σχ 4. 10 (οι πλαστικές περιοχές αναπτύσσονται διαμήκους της ενίσχυσης, στις περιοχές των ακραίων διαμήκων ινών, ακολουθώντας την διεύθυνση των κρίσιμων τάσεων S11, καθώς επίσης και κεντρικά της ενίσχυσης).



Σχ 5. 15 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκυσμένη παρειά της ενίσχυσης

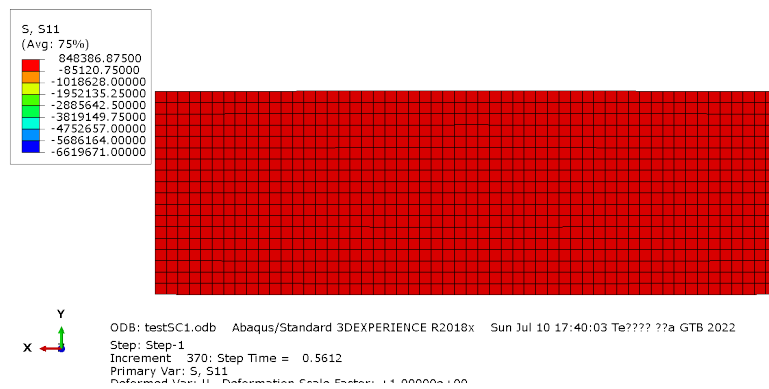
Από το Σχ 5. 15 καταγράφεται η μέγιστη εφελκυστική τάση που ασκείται στις περιοχές των στηρίξεων να κυμαίνεται μεταξύ 9.1MPa και 11.5MPa, τάσεις κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσονται για $f_c=12.7\text{MPa}$ (Σχ 5. 10) και για $f_c=9.7\text{MPa}$ (Σχ 4. 11). Αυτή η παρατήρηση είναι λογική, μιας και σημαίνει ότι αυξάνοντας την αντοχή του τοιχώματος → αυξάνεται η μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση στο δοκίμιο → αυξάνεται η μέγιστη εφελκυστική τάση S11 στην ενίσχυση.



Σχ 5. 16 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Το Σχ 5. 16 είναι παρόμοιας μορφής με τα αντίστοιχα των Σχ 5. 11 A) και Σχ 4. 13 A), με την μέγιστη πιθανή μέση πλαστική παραμόρφωση να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα (4.62mm).

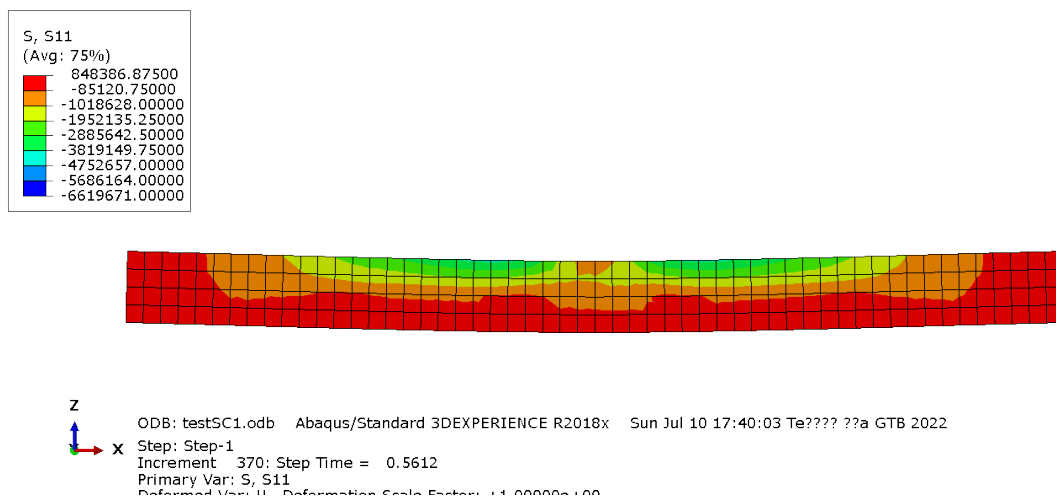
A)



B)



Γ)



Σχ 5. 17 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

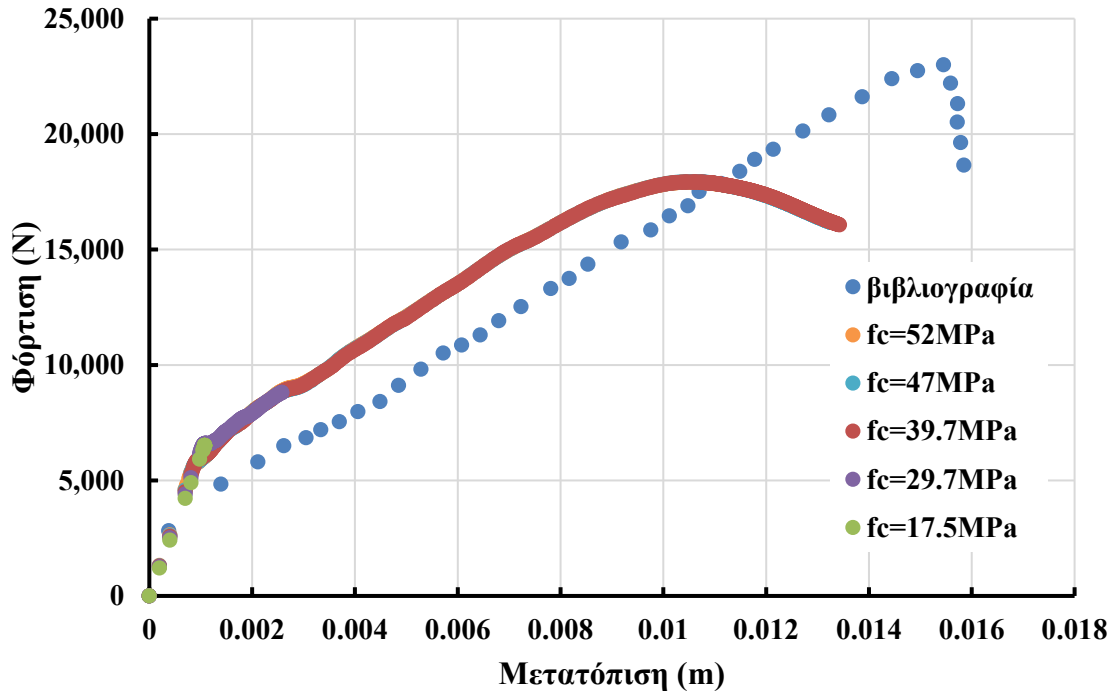
Από τα Σχ 5. 17 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι το τοίχωμα καταπονείται στα περισσότερα στοιχεία από εφελκυσμό με μέγιστη πιθανή εφελκυστική τάση

848kPa. Συγκρίνοντας τις μέγιστες πιθανές εφελκυστικές τάσεις (Σχ 5. 17, Σχ 5. 12, Σχ 4. 14) παρατηρείται ότι:

848kPa ($f_c=15.7\text{MPa}$) < 882kPa ($f_c=9.7\text{MPa}$) < 935kPa ($f_c=12.7\text{MPa}$).

5.4 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΟΥΣ

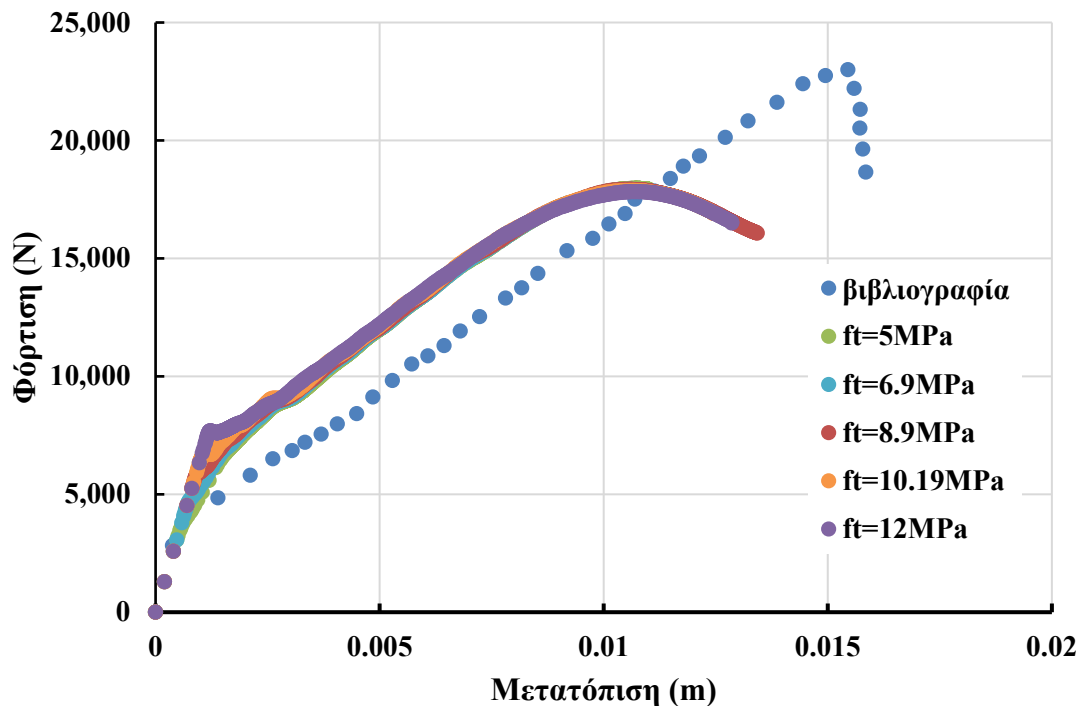
Η θλιπτική αντοχή του τσιμεντοειδούς επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας E του τσιμεντοειδούς ($E_c = 22 * [(f_c)/10]^{0,3}$ (f_c σε MPa, E_c σε GPa), ενότητα 4.1), την γωνία τριβής τσιμεντοειδούς (αν και από την ενότητα 5.2 εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο) καθώς επίσης επηρεάζει και την εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοειδούς. Από το Σχ 5. 18 παρατηρείται ότι για μικρές τιμές θλιπτικής αντοχής τσιμεντοειδούς (17.5 MPa, 29.7 MPa) το δοκίμιο αστοχεί πολύ νωρίτερα σε σχέση με μεγαλύτερες τιμές θλιπτικής αντοχής τσιμεντοειδούς (39.7MPa, 47MPa, 52MPa) για τις οποίες οι καμπύλες ουσιαστικά ταυτίζονται προσεγγίζοντας την ίδια μέγιστη φόρτιση. Συγκεκριμένα καταγράφεται ότι για 17.5 MPa η αστοχία πραγματοποιείται με την έναρξη της πλαστικοποίησης (σχεδόν αμέσως μετά την ελαστική περιοχή όπου τότε ρηγματώνεται το τσιμεντοειδές) ενώ για 29.7 MPa η αστοχία πραγματοποιείται όταν η καμπύλη βρεθεί στην πλαστική περιοχή αλλά για μικρές μετατοπίσεις και μικρές φορτίσεις. Εξάγεται οπότε το συμπέρασμα ότι για 17.5 MPa και 29.7 MPa αστοχεί το τσιμεντοειδές, ενώ για 39.7MPa, 47MPa και 52MPa αστοχούν οι ίνες. Έτσι αποδεικνύεται ότι το τσιμεντοειδές χρειάζεται να αναπτύξει μια ορισμένη θλιπτική αντοχή ώστε να λειτουργήσει πλήρως η ενίσχυση. Επειδή η ενίσχυση και άρα το τσιμεντοειδές καταπονείται κυρίως υπό εφελκυσμό σημειώνεται ότι αυξάνοντας την θλιπτική αντοχή του τσιμεντοειδούς αυξάνεται και η εφελκυστική αντοχή του. Συμπεραίνεται επίσης ότι υπάρχει ένα όριο για την θλιπτική αντοχή του τσιμεντοειδούς (άρα και για την εφελκυστική αντοχή του) πέρα από το οποίο οι ίνες προσεγγίζουν την μέγιστη αντοχή τους πολύ πριν αστοχήσει το τσιμεντοειδές, οπότε και πραγματοποιείται ο αναμενόμενος μηχανισμός αστοχίας, η αστοχία της ολίσθησης των ινών της ενίσχυσης.



Σχ 5. 18 Διάγραμμα καμπύλων με μεταβλητή την θλιπτική αντοχή του τσιμεντοειδούς

5.5 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΟΥΣ

Η εφελκυστική αντοχή τσιμεντοειδούς επηρεάζει επίσης και την γωνία τριβής του που όμως έχει παρατηρηθεί ότι δεν επηρεάζει ουσιαστικά την απόκριση του προσομοιώματος (ενότητα 5.2).



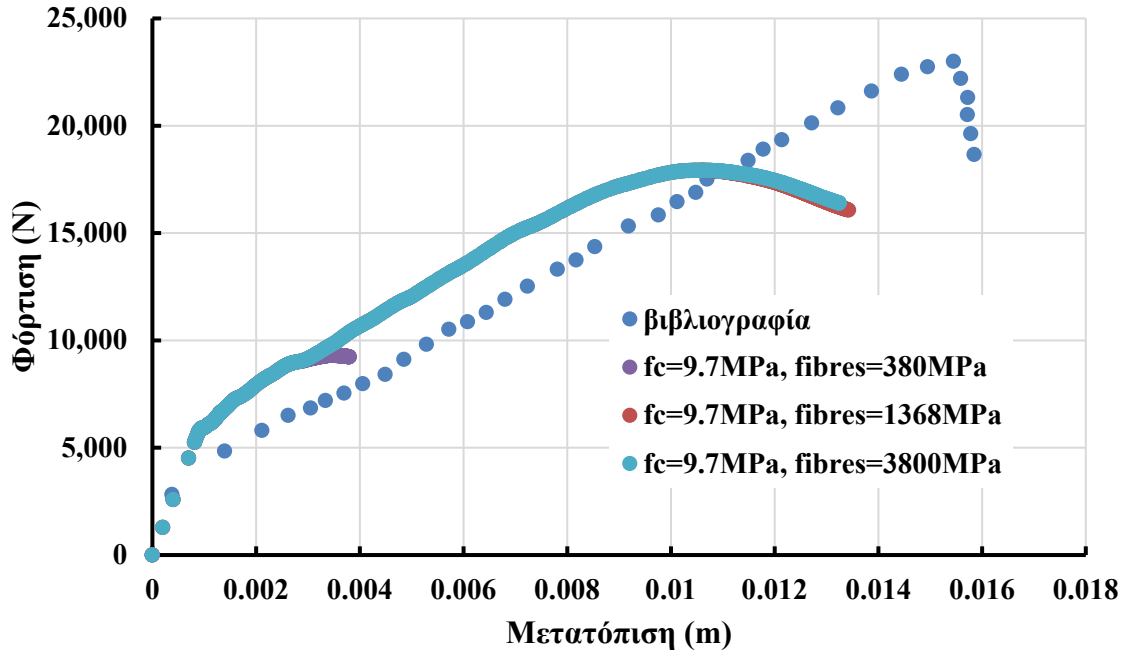
Σχ 5. 19 Διάγραμμα καμπύλων με μεταβλητή την εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοειδούς

Από το Σχ 5. 19 παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές στις κλίσεις των καμπύλων στις ελαστικές περιοχές με μεγαλύτερη κλίση να έχει η καμπύλη με μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή αντίστοιχα. Κατά τα άλλα οι καμπύλες σχετικά συμπίπτουν, αν και για την ακρίβεια μικρότερη σχετικά max φόρτιση προσεγγίζουν οι καμπύλες για μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή. Συμπεραίνεται ότι για τις συγκεκριμένες τιμές εφελκυστικής αντοχής τσιμεντοειδούς η τσιμεντοειδής μήτρα εξασφαλίζει ότι θα παραλάβουν αρκετή δύναμη οι ίνες για να λειτουργήσουν μέσω της συνάφειας μεταξύ της μήτρας και των ινών, χωρίς να αστοχήσει πρώτα η τσιμεντοειδής μήτρα.

5.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

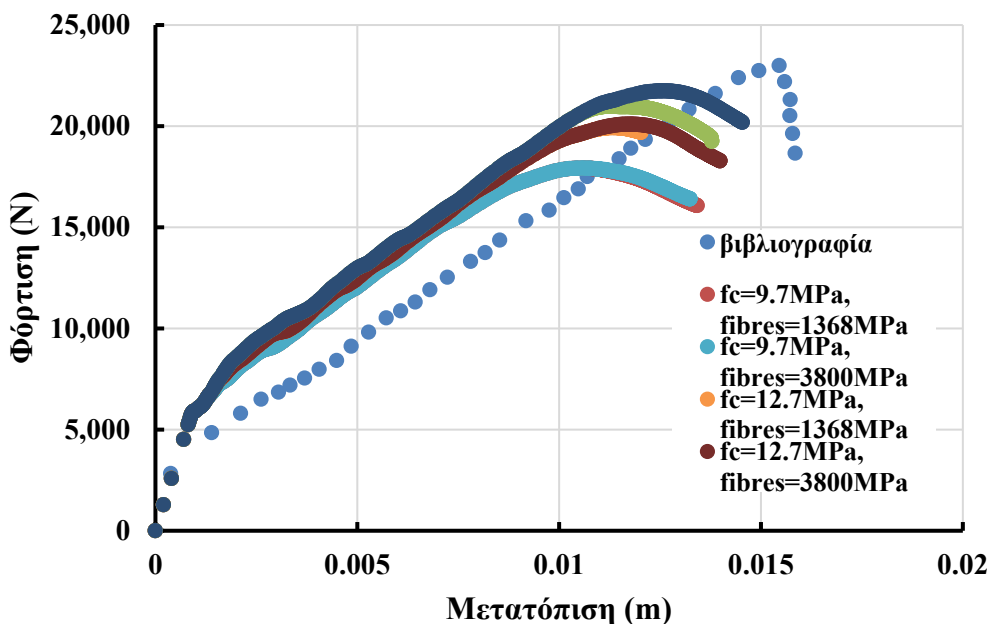
Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση σχετικά με τις ίνες άνθρακα που προσομοιώνονται. Αυτή είναι η τελική διερεύνηση για να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα του συγκεκριμένου δοκιμίου. Άρα θα ληφθούν υπόψη και οι προηγούμενες ενότητες διερευνήσεων του κεφαλαίου 5. Από τις προηγούμενες ενότητες εξήχθη το συμπέρασμα ότι μόνο αυξάνοντας την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας βελτιώνεται η καμπύλη (στην ενότητα 5.3 κρατήθηκαν υπόψη για μελλοντική διερεύνηση τις τιμές $f_c = 9.7\text{MPa}, 12.7\text{MPa}, 15.7\text{MPa}$). Στις άλλες διερευνήσεις ή δεν επηρεάζει η μεταβολή της αντίστοιχης παραμέτρου την καμπύλη ή η βέλτιστη λύση είναι τα δεδομένα του πειράματος (ενότητα 4.1). Αναλυτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται:

A) Από το Σχ 5. 20, αυξάνοντας την αντοχή ινών από 380MPa → 1368MPa παρατηρείται μεγάλη βελτίωση στην καμπύλη, όμως αυξάνοντας την από 1368MPa → 3800MPa οι καμπύλες σχετικά συμπίπτουν με την διαφορά της max φόρτισης να είναι 1.2N.



Σχ 5. 20 Διάγραμμα καμπυλών με μεταβλητή την αντοχή των ινών

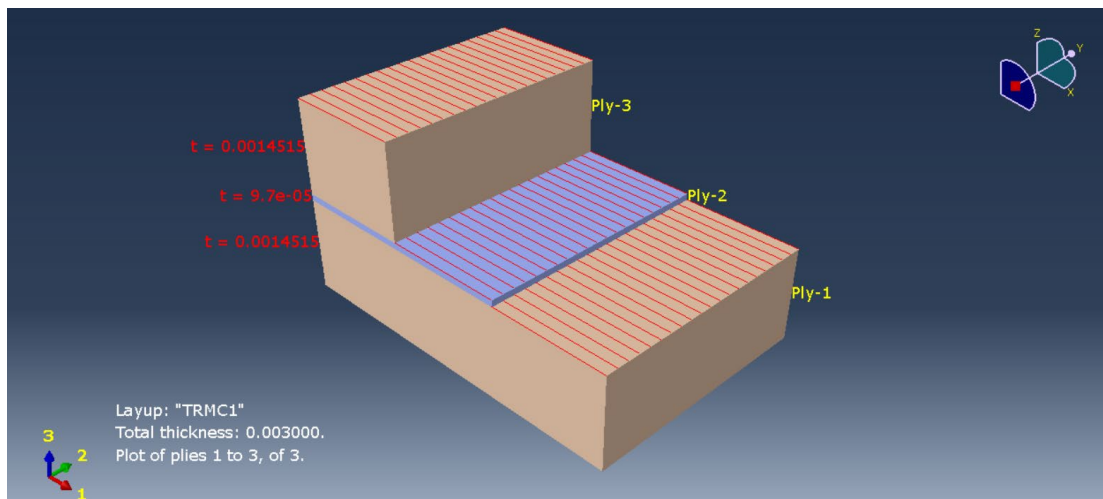
B) Από το Σχ 5. 21, για τις 3 θλιπτικές αντοχές τοιχοποιίας, συγκρίνοντας τις μεταβολές των καμπυλών για αντοχή ινών 1368MPa → 3800MPa παρατηρείται ότι μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή του τοίχου → μεγαλύτερη μεταβολή των καμπυλών για αντοχή ινών 1368MPa → 3800MPa. Συγκεκριμένα, για τις max φορτίσεις, η μεταβολή όπως καταγράφηκε για θλιπτική αντοχή τοίχου 9.7MPa είναι 1.2N, για 12.7MPa είναι 165N, για 15.7MPa είναι 760.6N.



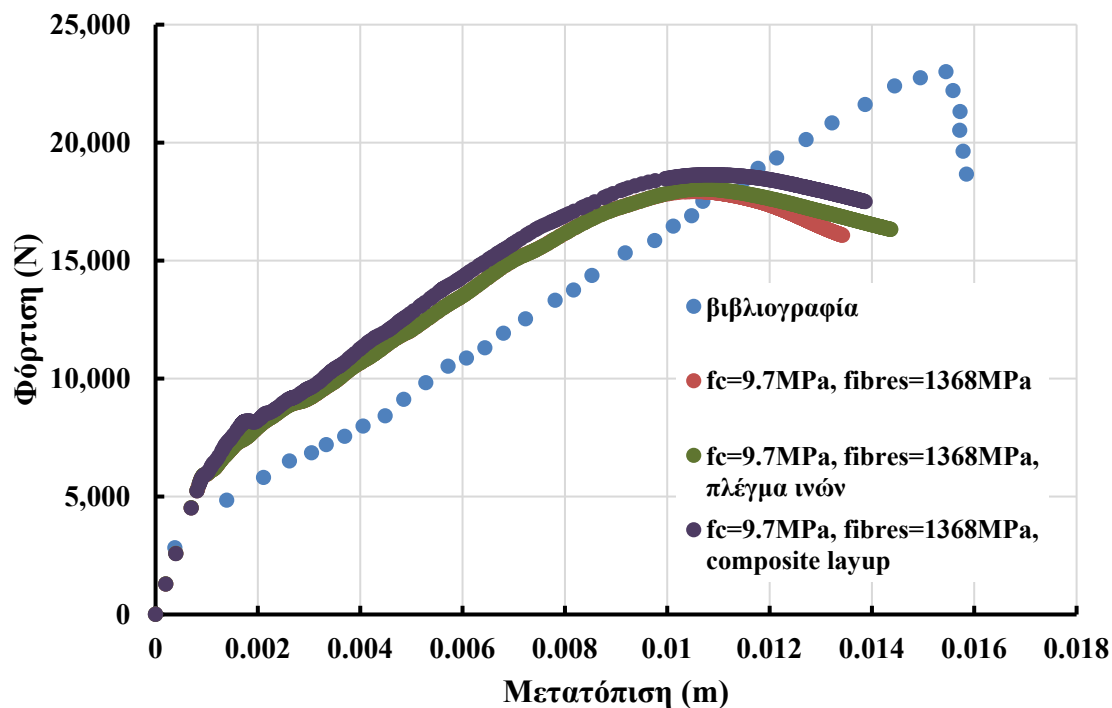
Σχ 5. 21 Διάγραμμα καμπυλών με μεταβλητές την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας και την αντοχή των ινών

Γ) Στην ενότητα 4.2 προσομοιώθηκαν μόνο οι διαμήκεις ίνες (παράλληλες στην μεγάλη πλευρά- μήκος της ενίσχυσης) λόγω ότι αυτές λειτουργούν στον συγκεκριμένο έλεγχο και για οικονομία και ταχύτητα της ανάλυσης. Εδώ θα προσομοιωθούν το πλέγμα ινών κανονικά (ίνες στην διαμήκη και στην εγκάρσια διεύθυνση) καθώς επίσης θα δοκιμαστεί και η δυνατότητα του Abaqus για προσομοίωση της διατομής της ενίσχυσης με στρώσεις υλικού όπως στο Σχ 5. 22 (τσιμεντοειδές- άνθρακας- τσιμεντοειδές→ επιλογή διατομής composite layup). Το πάχος της στρώσης άνθρακα είναι το ονομαστικό πάχος της ίνας άνθρακα (ενότητα 4.1 $9.7 \cdot 10^{-5} \text{m}$) ενώ το πάχος των στρώσεων τσιμεντοειδούς προκύπτει:

$$t = (0.003 - 9.7 \cdot 10^{-5}) / 2 = 0.0014515 \text{m}$$



Σχ 5. 22 Προσομοίωση διατομής ενίσχυσης με στρώσεις υλικών



Σχ 5. 23 Διάγραμμα καμπύλων για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης των ινών άνθρακα

Από το Σχ 5. 23 επαληθεύεται η εκτίμηση ότι οι εγκάρσιες ίνες δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στην αντοχή σε αυτόν τον έλεγχο αφού οι καμπύλες για πλέγμα ινών και για μόνο διαμήκεις ίνες σχετικά συμπίπτουν με την διαφορά στη max φόρτιση να είναι:

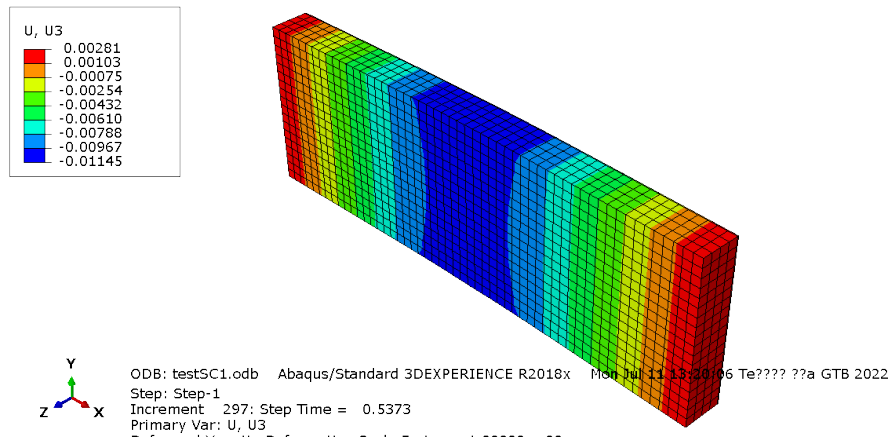
$18031-17919.8=111.2\text{N}\rightarrow 111.2/17919.8*100\%=0.621\%$ ουσιαστικά αμελητέα

Όσο αναφορά το προσομοίωμα με στρώσεις υλικού όντως υπάρχει βελτίωση ως προς τις φορτίσεις με την βελτίωση στην max φόρτιση να είναι: $18634.3-17919.8= 714.5\text{N}\rightarrow 714.5/17919.8*100\%=3.987\%$ μικρή αύξηση. Όμως αυτή η προσομοίωση δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αφού αντί για πλέγμα ινών (ή στο προσομοίωμα διαμήκεις ίνες) υπάρχει ολόκληρη στρώση υλικού. Επειδή υπάρχει περισσότερο υλικό από το πραγματικό πραγματοποιείται αύξηση των εντατικών μεγεθών του προσομοιώματος.

Άρα, και εφόσον οι αυξήσεις είναι μικρές, θα προτιμηθεί το προσομοίωμα με τις διαμήκεις ίνες άνθρακα που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και επιφέρει μικρότερο φόρτο και χρόνο ανάλυσης.

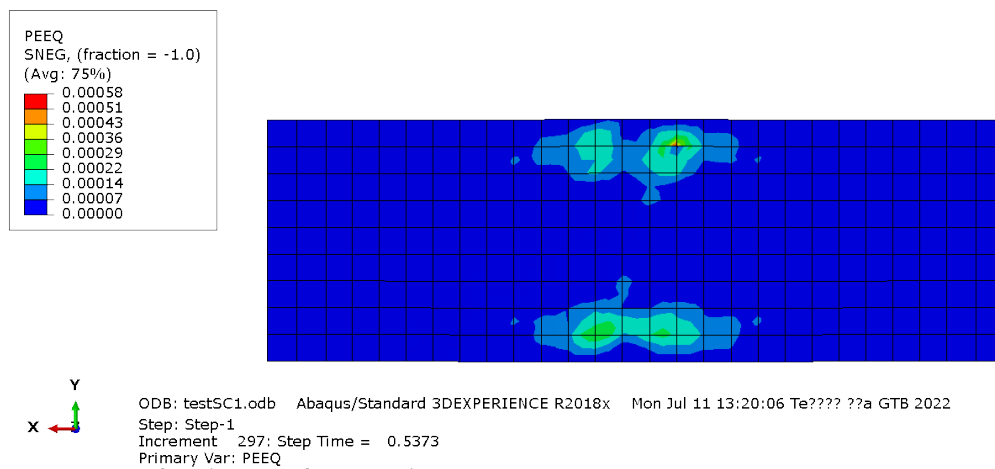
Για ασφαλέστερα συμπεράσματα, θα συγκριθούν τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων για πλέγμα ινών και composite layup με τα αντίστοιχα για διαμήκεις ίνες (είναι τα διαγράμματα για S8R-D3C8R στην ενότητα 4.4).

Για πλέγμα ινών:



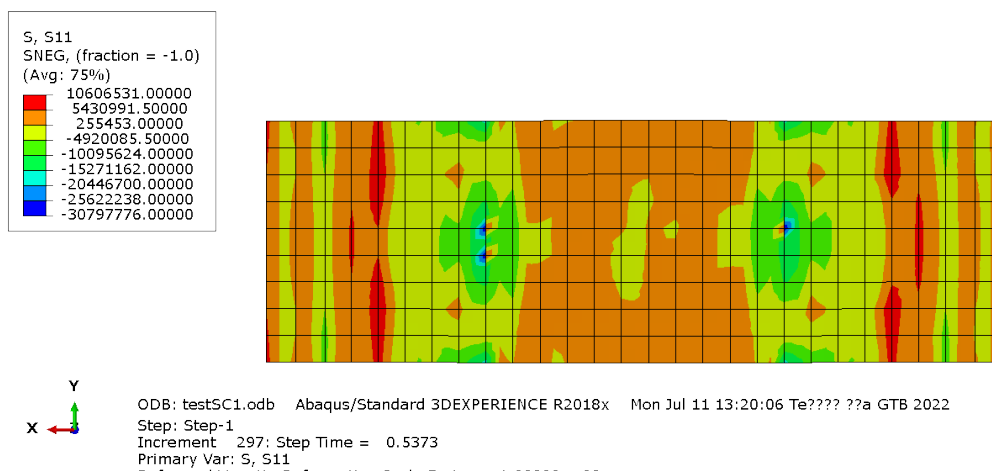
Σχ 5. 24 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο προσομοίωμα του ενισχυμένου τοιχώματος

Στο Σχ 5. 24 η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση είναι -0.0107004m , η οποία είναι ελάχιστα μεγαλύτερη κατά μέτρο από την αντίστοιχη για διαμήκεις ίνες (-0.0105515m , Σχ 4. 9). Την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 0.00103m και 0.00281m .



Σχ 5. 25 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκυστική παρειά της ενίσχυσης

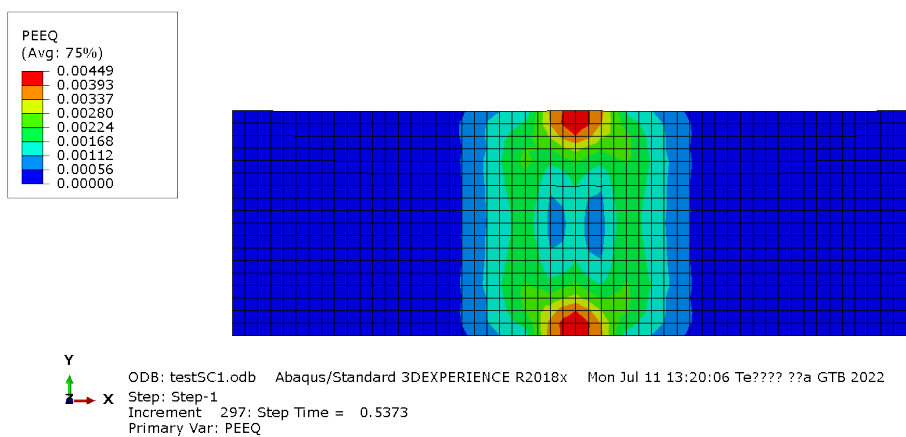
Τα Σχ 5. 25 και Σχ 4. 10 είναι παρόμοια, εξάγοντας έτσι τα ίδια συμπεράσματα (οι πλαστικές περιοχές αναπτύσσονται διαμήκους της ενίσχυσης, στις περιοχές των ακραίων διαμήκων ινών, ακολουθώντας την διεύθυνση των κρίσιμων τάσεων S11, καθώς επίσης και κεντρικά της ενίσχυσης). Αυτό αποδεικνύει επίσης ότι ολισθαίνουν οι διαμήκεις ίνες, ΟΧΙ οι εγκάρσιες, επιβεβαιώνοντας έτσι την υπόθεση ότι οι διαμήκεις ίνες καταπονούνται ουσιαστικά κατά τον έλεγχο και άρα συνεισφέρουν στην αντοχή του δοκιμίου, όχι οι εγκάρσιες.



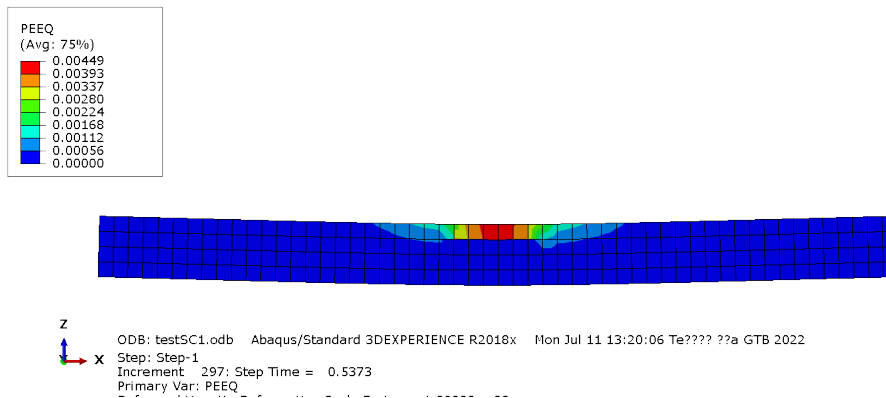
Σχ 5. 26 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρεία της ενίσχυσης

Τα Σχ 5. 26 και Σχ 4. 11 είναι παρόμοια, με την διαφορά των μέγιστων πιθανών εφελκυστικών τάσεων να είναι σχετικά μικρή και μάλιστα ελαφρώς μεγαλύτερες να είναι οι μέγιστες πιθανές εφελκυστικές τάσεις για διαμήκεις ίνες (για διαμήκεις ίνες κυμαίνονται μεταξύ 5.6MPa και 10.7MPa, για πλέγμα ινών κυμαίνονται μεταξύ 5.4MPa και 10.6MPa).

A)



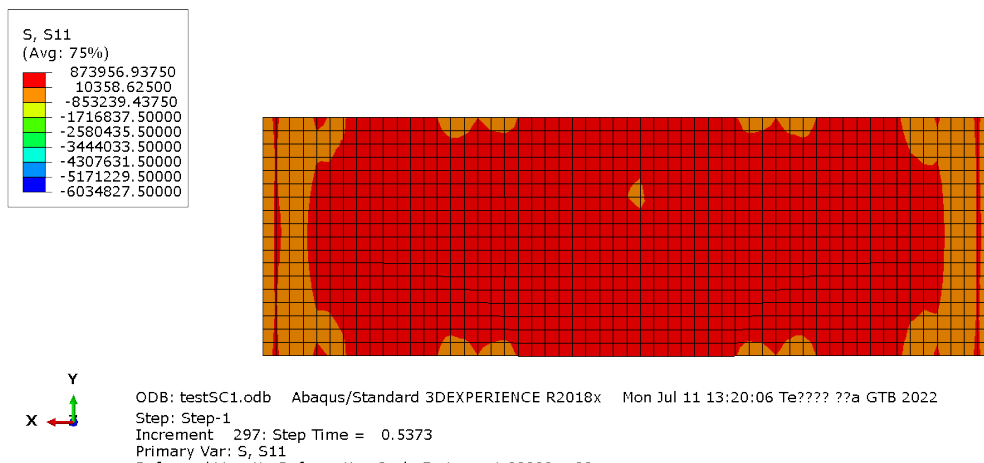
B)



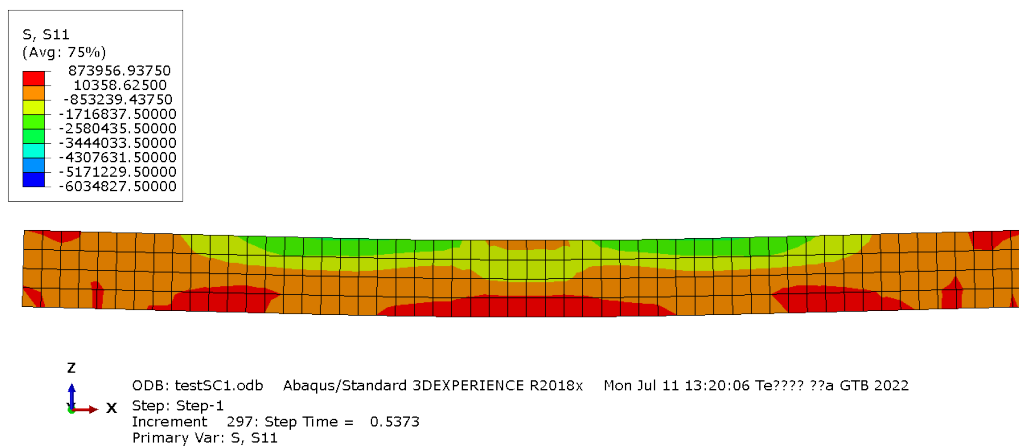
Σχ 5. 27 A), B) Διαγράμματα μέσωσν πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Τα Σχ 5. 27 A), B) και τα Σχ 4. 13 A), B) είναι παρόμοιας μορφής, με ελαφρώς μεγαλύτερη μέγιστη πιθανή τιμή μέσης πλαστικής παραμόρφωσης να εμφανίζει το τοίχωμα για πλέγμα ινών (4.49mm-4.07mm= 0.42mm).

A)



B)

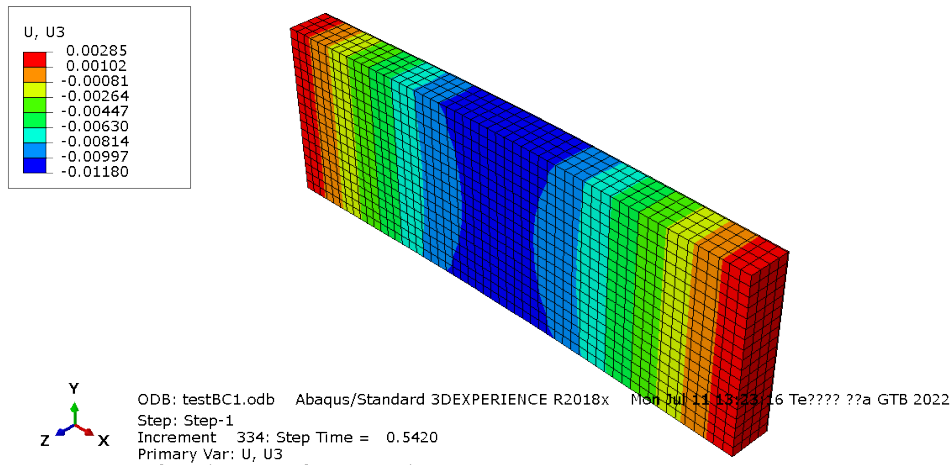


Σχ 5. 28 A), B) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Τα Σχ 4. 14 A), B) και Σχ 5. 28 A), B) είναι παρόμοιας μορφής και τιμών.

Εφόσον λοιπόν τα διαγράμματα των προσομοιωμάτων διαμήκων ινών και πλέγματος ινών είναι ίδιας μορφής και με μικρές διαφορές στις τιμές τους, η εκτίμηση να προσομοιωθεί το δοκίμιο με διαμήκεις ίνες κρίνεται ορθή.

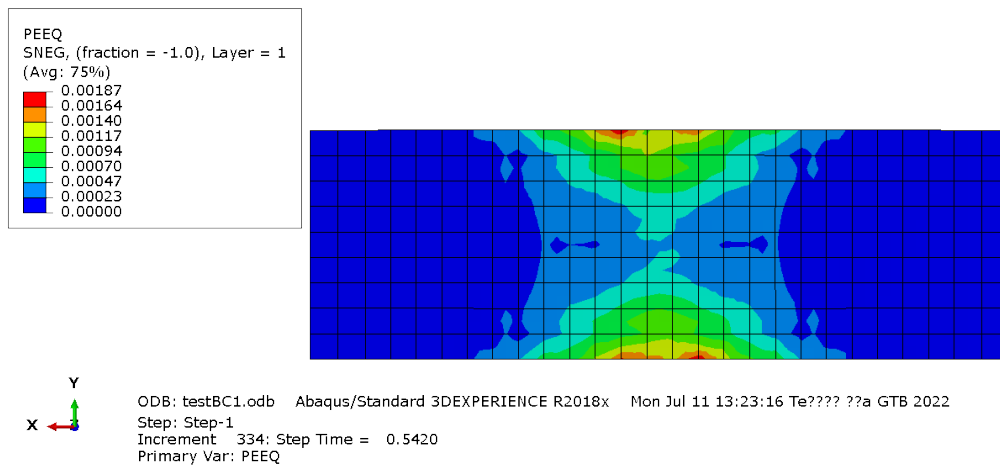
Για composite layup:



Σχ 5. 29 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο προσομοίωμα ενισχυμένου τοιχώματος

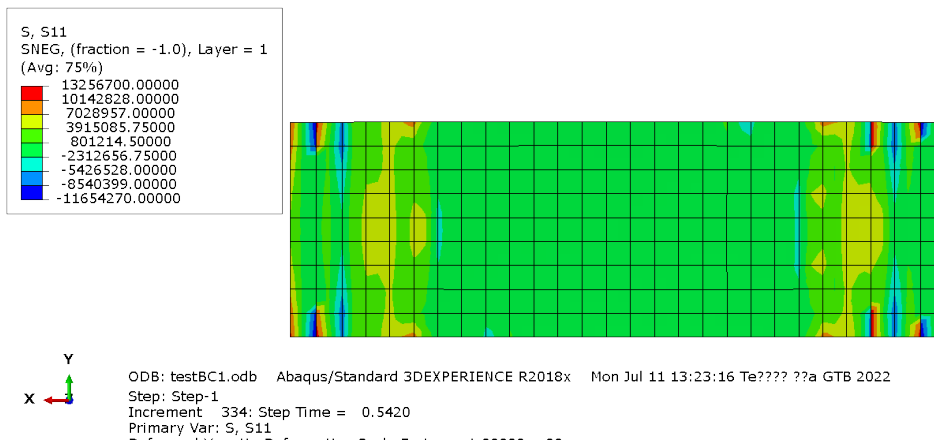
Στο Σχ 5. 29 η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση είναι

-0.0108197 m η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη κατά μέτρο από την αντίστοιχη για διαμήκεις ίνες (-0.0105515m, Σχ 4. 9). Την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 0.00102m και 0.00285m.



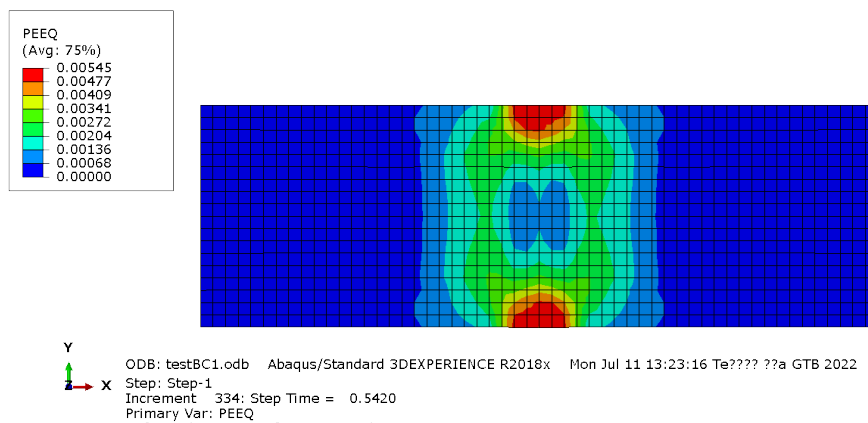
Σχ 5. 30 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Συγκρίνοντας το Σχ 5. 30 με το Σχ 4. 10, για composite layup παρατηρείται εντονότερη πλαστικοποίηση με μεγαλύτερη μέγιστη πιθανή PEEQ από ότι για διαμήκεις ίνες ($1.87\text{mm} > 0.85\text{mm}$). Αυτό είναι λογικό, αφού για composite layup το δοκίμιο προσεγγίζει μεγαλύτερη max φόρτιση (Σχ 5. 23), άρα καταπονείται περισσότερο, ενώ πλέον δεν πλαστικοποιούνται περιοχές που συνδέονται με διαμήκεις ίνες, αλλά περιοχές στρώσης υλικού. Μάλιστα, η μορφή πλαστικοποίησης είναι διαφορετική σε εικόνα, μιας και στο Σχ 5. 30 δεν πλαστικοποιούνται περιοχές των διαμήκων ινών για να επέλθει η ολίσθηση τους (όπως στο Σχ 4. 10) , αλλά περιοχές της ενίσχυσης που θα αστοχήσουν.

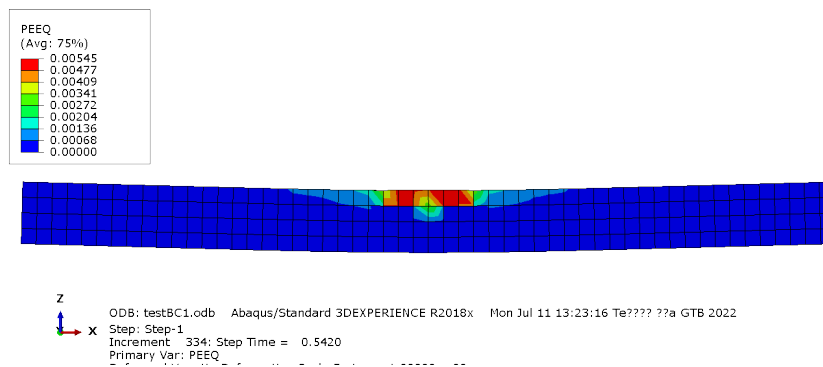


Σχ 5. 31 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης
Από την σύγκριση Σχ 5. 31 με Σχ 4. 11 παρατηρείται ότι η ενίσχυση για composite layup αναπτύσσει μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις, κάτι λογικό αφού ο οπλισμός ενίσχυσης είναι ολόκληρη στρώση και όχι διαμήκεις ίνες.

A)



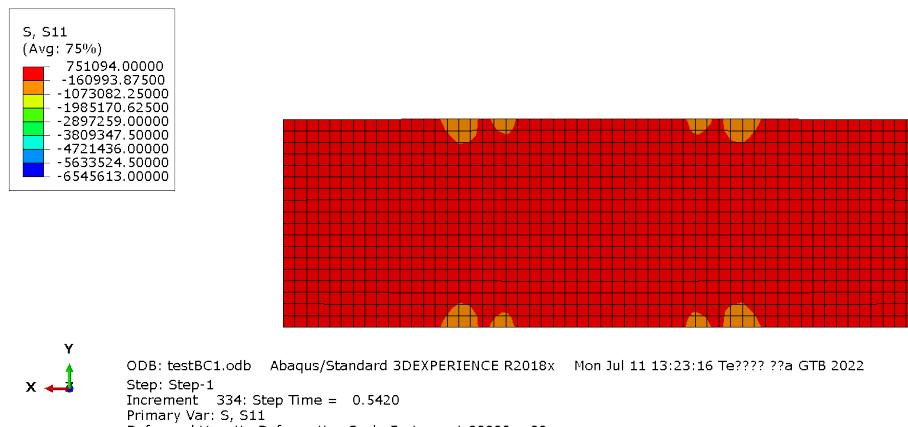
B)



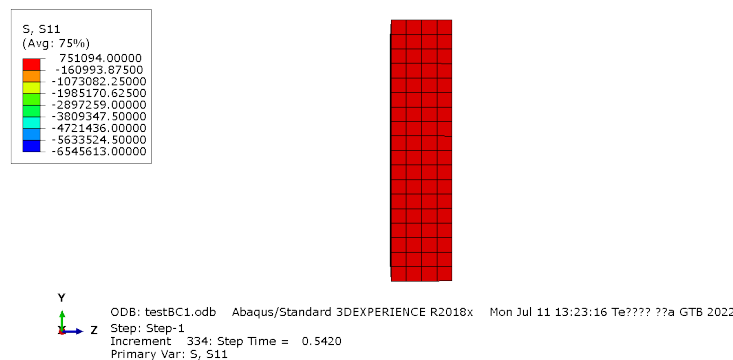
Σχ 5. 32 A), B) Διαγράμματα μέσωσ πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Τα Σχ 5. 32 A), B) και Σχ 4. 13 A), B) είναι παρόμοιας μορφής, με μεγαλύτερη μέγιστη πιθανή τιμή μέσης πλαστικής παραμόρφωσης τοιχώματος να έχει το composite layup (5.45mm>4.07mm), κάτι φυσιολογικό, από την στιγμή που το composite layup, λόγω μεγαλύτερης αντοχής, καταπονείται με μεγαλύτερη μέγιστη φόρτιση μέχρι να αστοχήσει και άρα πλαστικοποιείται περισσότερο το τοίχωμα.

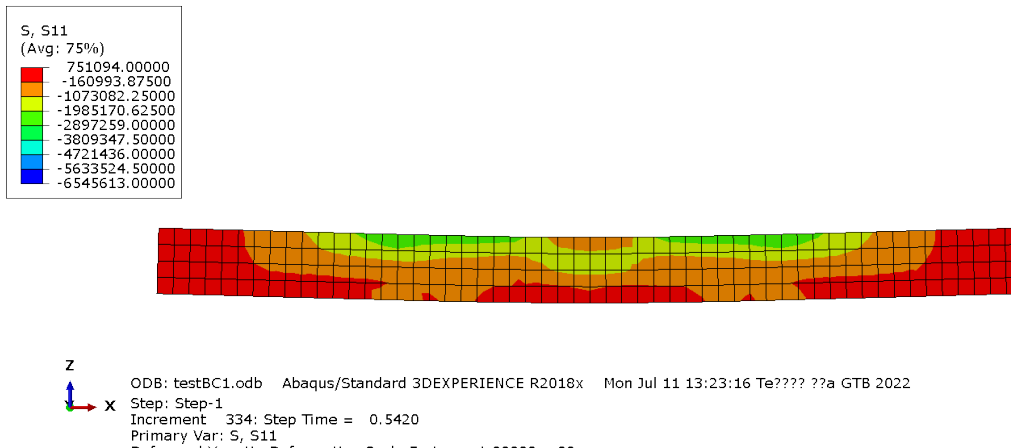
A)



B)



Γ)

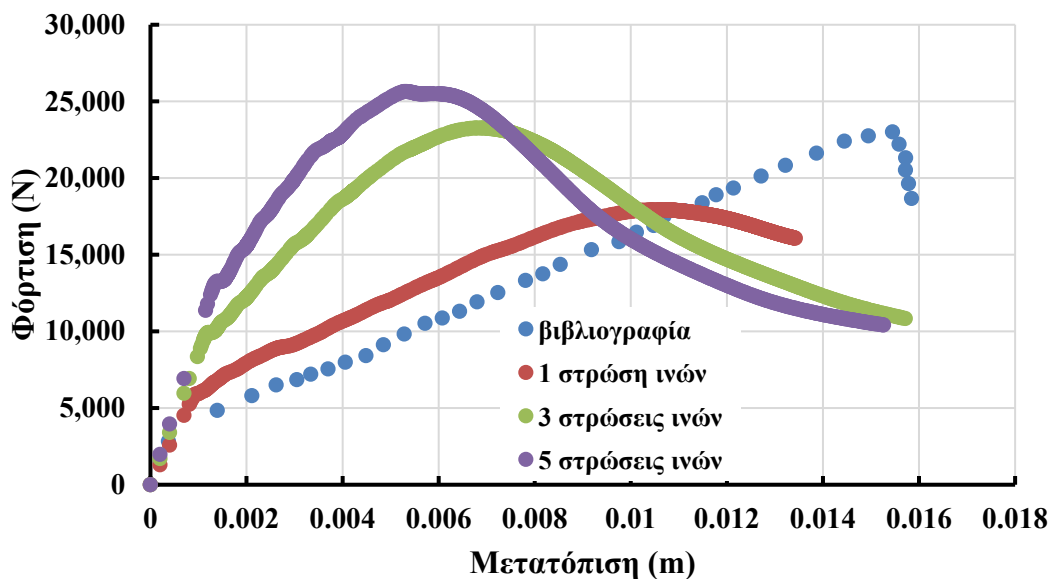


Σχ 5. 33 Α), Β), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Συγκρίνοντας τα Σχ 4. 14 Α), Β) και Γ) με τα Σχ 5. 33 Α),Β) και Γ) παρατηρείται ότι το τοίχωμα για στρώσεις υλικού ενίσχυσης καταπονείται με μικρότερες εφελκυστικές τάσεις.

5.7 ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Κλείνοντας το κεφάλαιο 5, στην ενότητα 5.7 θα πραγματοποιηθεί μια παραπάνω διερεύνηση σχετικά με το πώς επιδρούν περισσότερες στρώσεις ινών άνθρακα και ως επακόλουθο αυξάνεται ανάλογα και το πάχος της ενίσχυσης TRM ώστε να ισχύουν οι ίδιες αναλογίες υλικών τσιμεντοειδές-ίνες-τσιμεντοειδές-ίνες-τσιμεντοειδές και αντίστοιχα (Raouf et al., 2017).



Σχ 5. 34 Διάγραμμα καμπύλων με μεταβλητή τον αριθμό στρώσεων ινών άνθρακα

Από το Σχ 5. 34 συμπεραίνεται ότι προσομοίωμα με περισσότερες στρώσεις ινών άνθρακα εξάγει, φυσιολογικά, ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη καμπύλη (μεγαλύτερες κλίσεις σε ελαστική και πλαστική περιοχή και μεγαλύτερες φορτίσεις) αλλά την max φόρτιση την προσεγγίζει σε μικρότερη μετατόπιση άρα είναι πιο δύσκαμπτο το προσομοίωμα. Στην συνέχεια θα υπολογιστούν οι λόγοι των max φορτίσεων για διαφορετικό αριθμό στρώσεων ινών:

$$5 \text{ στρώσεις}/1 \text{ στρώση}=5 \rightarrow \frac{25640N}{17919.8N} = 1.43$$

$$5 \text{ στρώσεις}/3 \text{ στρώσεις}=1.667 \rightarrow \frac{25640N}{23256.2N} = 1.103$$

$$3 \text{ στρώσεις}/1 \text{ στρώση}=3 \rightarrow \frac{23256.2N}{17919.8N} = 1.3$$

Από τους υπολογισμούς εξάγεται το συμπέρασμα ότι από 1 στις 3 στρώσεις ινών υπάρχει σημαντική αύξηση της αντοχής, όχι όμως και από 3 στις 5 στρώσεις ινών ώστε να δικαιολογήσει την αύξηση στο κόστος κατασκευής της ενίσχυσης, της οποίας το κόστος είναι σημαντικό (αύξηση ινών από άνθρακα, αύξηση τιμμεντοειδούς υλικού):

$$1 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.003\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00177\text{m}^3$$

$$3 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.006\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00354\text{m}^3$$

$$5 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.009\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00531\text{m}^3$$

6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΜΨΗΣ 3 ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

Με την ολοκλήρωση της παραμετρικής ανάλυσης του κεφαλαίου 5 εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με το συγκεκριμένο δοκίμιο. Όμως όλη η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για την συγκεκριμένη περίπτωση της TRM ενίσχυσης με ίνες από άνθρακα και μονή τοιχοποιία. Για να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα για την συνεισφορά της TRM ενίσχυσης στην συμπεριφορά του ενισχυμένου τοιχώματος, στο κεφάλαιο 6 θα αλλάξουν είτε η TRM ενίσχυση, συγκεκριμένα η νέα TRM ενίσχυση θα έχει 3 στρώσεις ινών από γυαλί και πάχος 4mm, είτε θα διπλασιαστεί το πάχος της τοιχοποιίας, είτε θα εφαρμοστούν και τα δύο. Στο κάθε νέο προσομοίωμα θα συγκριθούν οι προκύπτουσες καμπύλες φόρτισης-μετατόπισης με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τα πειράματα (Kariou et al., 2018). Στους πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται συνολικά τα δεδομένα για όλα τα προσομοιώματα που ελέγχονται με διαφορετική ενίσχυση TRM ή/και διπλάσιο πάχος τοιχοποιίας. Η ισοδύναμη επιφάνεια ίνας για το γυαλί υπολογίστηκε με τον ίδιο τρόπο όπως στον άνθρακα (ενότητα 4.1):

$$(1*0.000044)/(1/0.012)= 5.28*10^{-7} \text{ m}^2$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι για τις 3 στρώσεις ινών από γυαλί η μια τοποθετείται στην μέση της ενίσχυσης (σε απόσταση 2mm από τα άκρα της ενίσχυσης) και οι άλλες 2 συμμετρικά ανάμεσα στην μεσαία στρώση ινών και στην πάνω ή κάτω άκρη της ενίσχυσης (σε απόσταση 1 mm από τα άκρα της ενίσχυσης).

Τέλος, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι χωρίς την ενίσχυση, ο μη ενισχυμένος τοίχος αστοχεί από το ίδιο το βάρος του, δηλαδή δεν αναπτύσσει καμία αντοχή, όμως ο μη ενισχυμένος διπλός τοίχος αναπτύσσει μια αντοχή (Kariou et al., 2018).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΙΝΩΝ

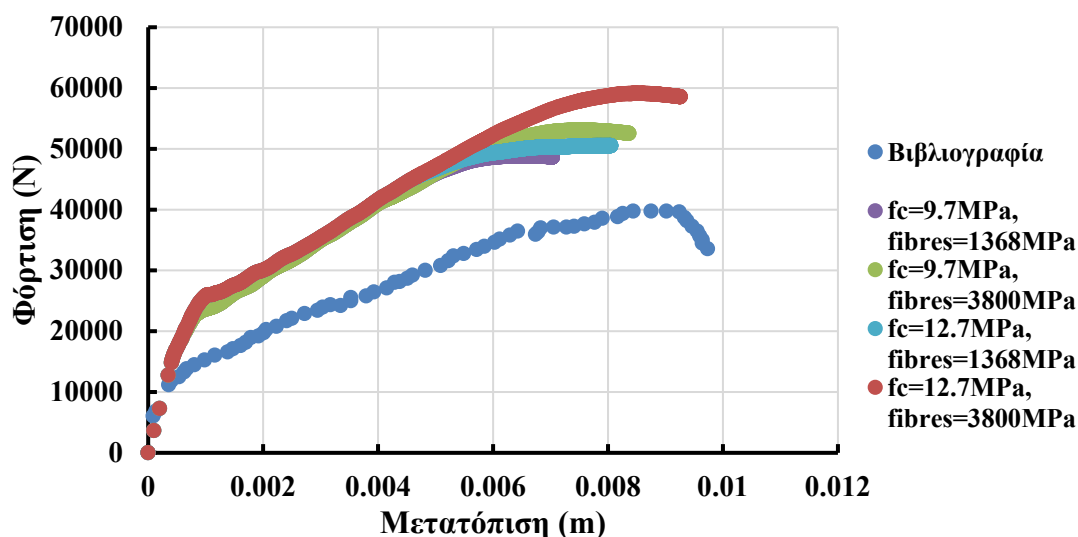
| ΥΛΙΚΟ | ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa) | ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (GPa) | ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΙΝΑΣ (mm) | ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΙΝΩΝ (mm) | ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΙΝΑΣ (m ²) |
|----------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|--|
| Άνθρακας | 3800 | 225 | 0.097 | 10 | 9.7*10 ⁻⁷ |
| Γυαλί | 1400 | 74 | 0.044 | 12 | 5.28*10 ⁻⁷ |

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ TRM

| ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ (mm) | ΥΛΙΚΟ ΙΝΩΝ | ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΙΝΩΝ | ΠΑΧΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ (mm) |
|----------------|------------------------|------------|---------------------------------|----------------------|
| S_C1 | 102.5 | Άνθρακας | 1 | 3 |
| S_G3 | 102.5 | Γυαλί | 3 | 4 |
| D_C1 | 205 | Άνθρακας | 1 | 3 |
| D_G3 | 205 | Γυαλί | 3 | 4 |

6.1 TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Η διαφορά με το κεφάλαιο 5 είναι ότι το προσομοίωμα έχει διπλάσιο πάχος τοίχου. Δοκιμάζεται α) με αντοχή ινών την αντοχή θραύσης τους 3800MPa ή την τιμή 1368MPa και β) θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας 9.7MPa (Καρίου et al., 2018) ή 12.7MPa (Σχ 6. 1). Επειδή στο πείραμα η αστοχία περιήλθε για μετατόπιση 0.0097m, στο προσομοίωμα θα ασκηθεί μετατόπιση 0.01m ώστε να προσεγγίσει σίγουρα την μέγιστη φόρτιση.



Σχ 6. 1 Καμπύλες προσομοιώματος TRM ενίσχυσης με μια στρώση ινών άνθρακα με διπλάσιο πάχος τοίχου

Από το Σχ 6. 1 καταγράφονται τα εξής συμπεράσματα:

A) Αν αλλάξει η αντοχή των ινών παρατηρείται ίδια ελαστική περιοχή (μέχρι την έναρξη τη πλαστικοποίησης του εκάστοτε προσομοιώματος, όπου τότε ρηγματώνεται το τσιμεντοειδές του), ενώ και η πλαστική περιοχή συμπίπτει έως ότου η καμπύλη με την μικρότερη αντοχή ινών (1368MPa) αρχίζει και προσεγγίζει την μέγιστη τιμή φόρτισης της, με την άλλη να συνεχίζει την ανοδική πορεία μέχρι να προσεγγίσει με την σειρά της την μέγιστη τιμή φόρτισης της.

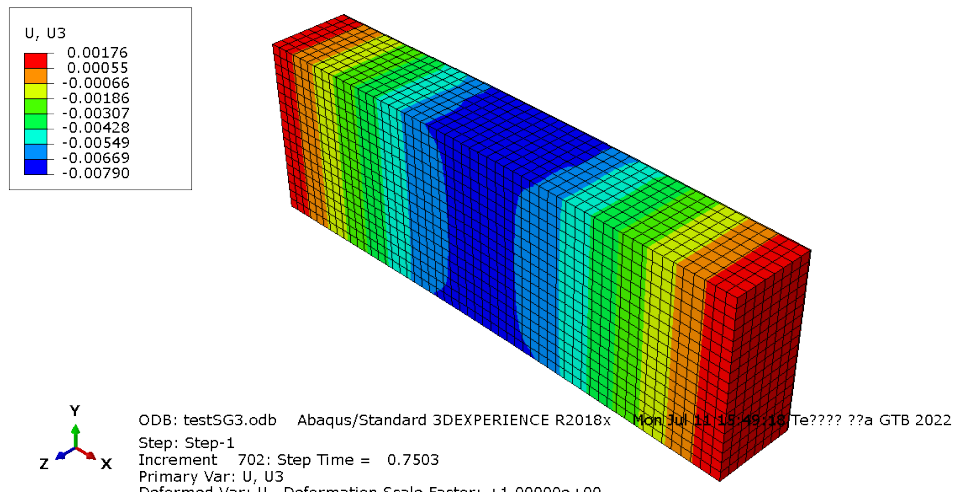
B) Αν αλλάξει η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας παρατηρείται ότι για ίδια αντοχή ινών 1368MPa επέρχεται μικρή μεταβολή στην καμπύλη. Όμως για ίδια αντοχή ινών 3800MPa παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή στην καμπύλη με την διαφορά των μέγιστων φορτίων να είναι μάλιστα μεγαλύτερη των 6kN.

Γ) Η πραγματική καμπύλη από το πείραμα είναι σημαντικά χαμηλότερη, και αυτό επειδή παρατηρείται ότι στα προσομοιώματα οι καμπύλες βρίσκονται για μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην ελαστική περιοχή και μάλιστα έχουν περίπου διπλάσια τιμή φόρτισης όταν επέρχεται η πρώτη πλαστικοποίηση (πρώτα σπασίματα καμπύλης- ρηγμάτωση τσιμεντοειδούς). Μετά την πρώτη πλαστικοποίηση, όλες οι καμπύλες έχουν περίπου ίδια κλίση.

Δ) Η πειραματική καμπύλη παρουσιάζει την μέγιστη φόρτιση της στην μεγαλύτερη μετατόπιση σε σχέση με τα προσομοιώματα.

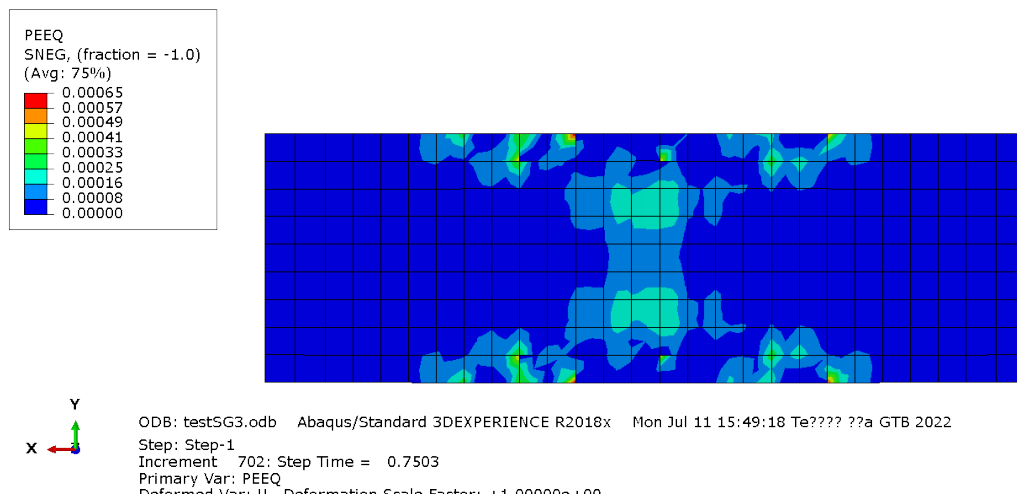
Από τα παραπάνω και σε συνδυασμό με το κεφάλαιο 5 όπου στο μονό πάχος τοίχου οι καμπύλες του προσομοιώματος ήταν χαμηλότερες από την πειραματική εξάγεται το συμπέρασμα ότι στο πεπερασμένο στοιχείο τρισδιάστατης ελαστικότητας C3D8R που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του τοιχώματος, το οποίο είναι στοιχείο τρισδιάστατης έντασης, υπερεκτιμούνται τα διατμητικά χαρακτηριστικά του τοιχώματος, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το πάχος του τοιχώματος τόσο περισσότερο να φαίνεται να αντέχει διατμητικά από την πραγματικότητα και να αυξάνεται η αντοχή του. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο δοκίμιο

(ενότητα 6, περίπτωση D_C1). Επειδή όμως το πάχος της τοιχοποιίας είναι σημαντικό (0.205m) σε σχέση με το πλάτος της (0.44m), κρίνεται απαραίτητο όσο αναφορά το τοίχωμα να εξεταστούν οι τάσεις που σχετίζονται με το πάχος του (S33, S13,S23).



Σχ 6. 2 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο προσομοίωμα ενισχυμένου τοιχώματος

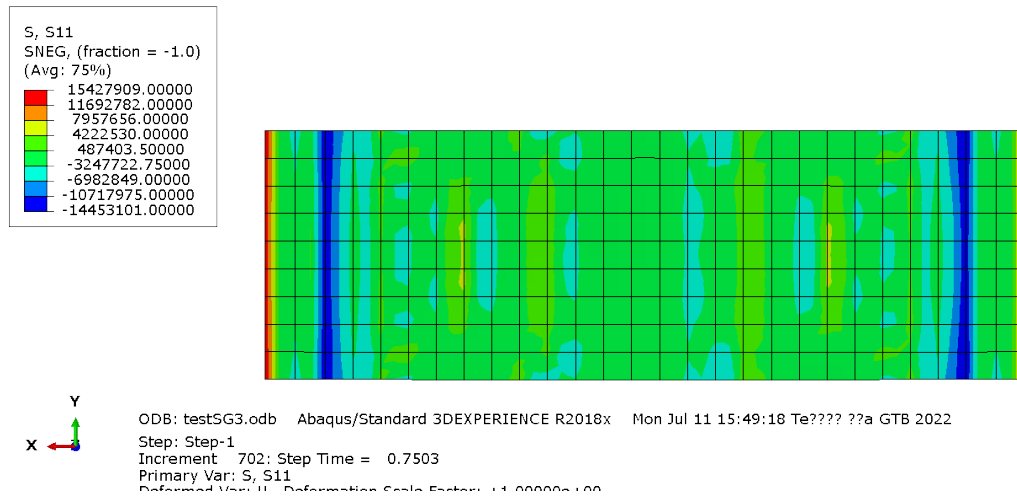
Από το Σχ 6. 2 η μετατόπιση την στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του δοκιμίου στο κεντρικό τμήμα του είναι -0.00852237m, ενώ στα ακριανά του τμήματα κυμαίνεται μεταξύ 0.00055m και 0.00176m.



Σχ 6. 3 Διάγραμμα μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκυστική παρειά της ενίσχυσης

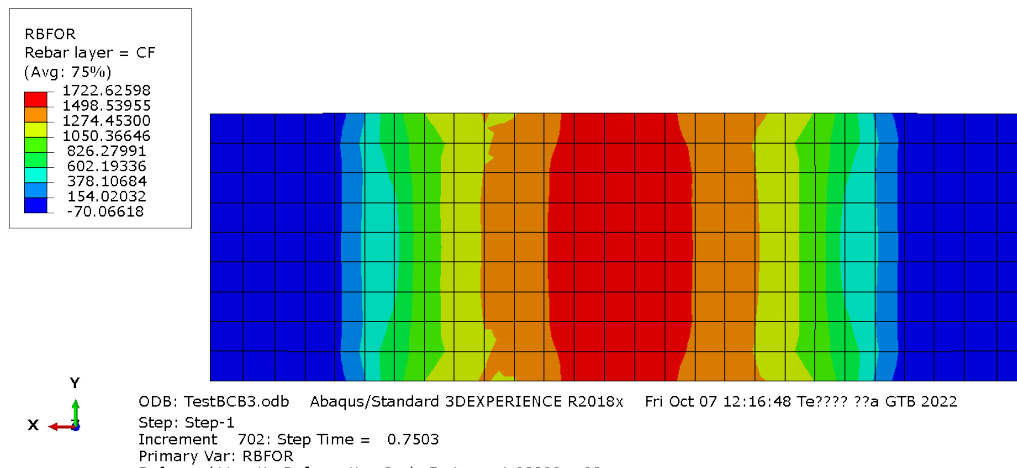
Στο Σχ 6. 3 καταγράφονται οι πλαστικοποιημένες περιοχές στην ενίσχυση καθώς και το μέγεθος της πλαστικοποίησης τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Σχ 6. 3 διαφέρει από το Σχ 4. 10, κάτι λογικό επειδή έχει αλλάξει ο μηχανισμός αστοχίας του δοκιμίου (δεν ολισθαίνουν οι διαμήκεις ίνες από

τις πλαστικοποιημένες περιοχές του τσιμεντοειδούς, ούτε αστοχούν οι ίνες όπως θα αποδειχθεί στο Σχ 6. 5).



Σχ 6. 4 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκυσμένη παρειά της ενίσχυσης

Στο Σχ 6. 4 παρατηρείται ότι οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις S11 (κυμαίνονται μεταξύ 11.7MPa και 15.4 MPa) εντοπίζονται στις 2 ακραίες μικρές πλευρές της ενίσχυσης. Οι εφελκυστικές τάσεις που καταπονούν τα περισσότερα στοιχεία της ενίσχυσης κυμαίνονται μεταξύ 487kPa και 4.2MPa.

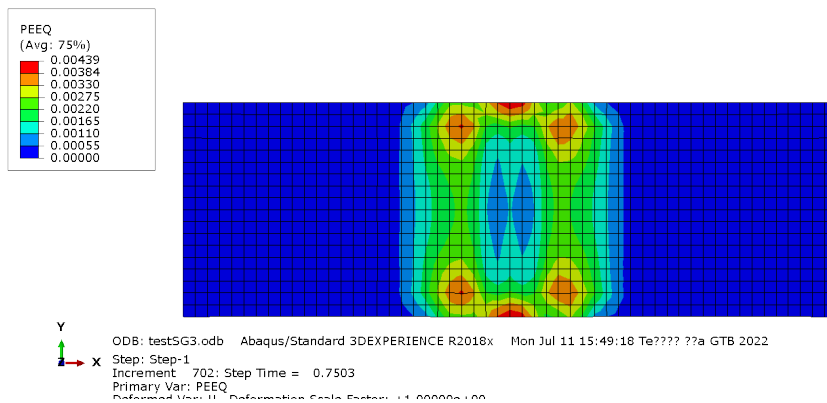


Σχ 6. 5 Διάγραμμα ορθών εφελκυστικών δυνάμεων RBFOR στην εφελκυσμένη παρειά της ενίσχυσης

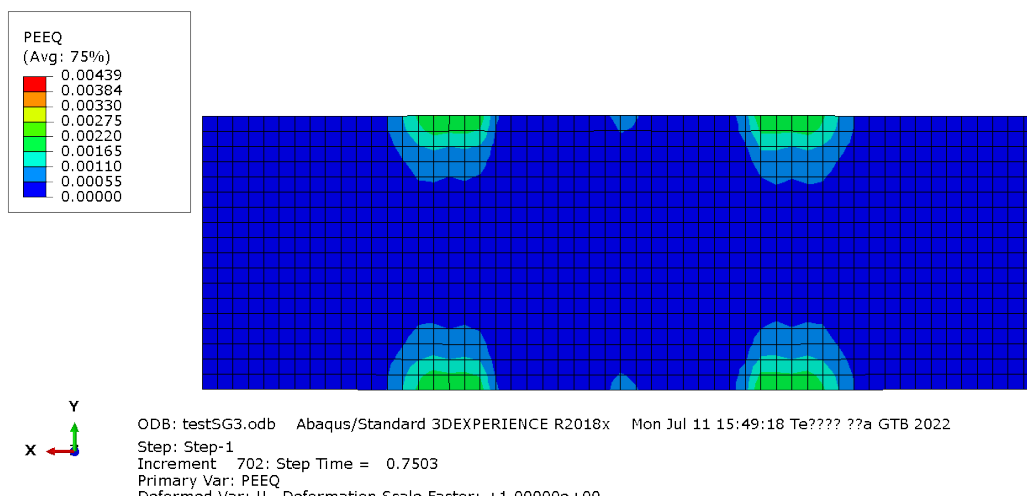
Από το Σχ 6. 5 σημειώνεται ότι η μέγιστη ορθή εφελκυστική δύναμη των ινών κυμαίνεται μεταξύ 1498.5N και 1722.6N και βρίσκεται κεντρικά της ενίσχυσης, κάτι λογικό αφού εκεί η ενίσχυση εφελκύεται περισσότερο, άρα και οι ίνες εφελκύνονται περισσότερο αντίστοιχα. Οι μέγιστες ορθές εφελκυστικές τάσεις των ινών προκύπτουν από τις αντίστοιχες δυνάμεις

διά την ισοδύναμη επιφάνεια της ίνας: $\frac{1722.6N}{9.7*10^{-7}m^2}=1775.9MPa < 3800MPa$
 (τάση αστοχίας ινών) άρα δεν αστοχούν οι ίνες της ενίσχυσης αλλά το τοίχωμα, το πιθανότερο σε διάτμηση. Ο λόγος που παρόλο που υπάρχει το ίδιο υλικό και αριθμός ινών με το S_C1 (ενότητα 4.4) αλλά δεν υφίσταται μηχανισμός αστοχίας σε σχέση με τις ίνες πιθανότερο είναι η μεγάλη αύξηση του μοχλοβραχίονα, λόγω της αύξησης του πάχους. Η αύξηση του μοχλοβραχίονα πιθανό είναι τόσο μεγάλη που η δύναμη που τελικά καλείται να παραλάβει στην μέγιστη οριακή κατάσταση η ίνα είναι κατά τη μικρότερη κατανομημένη σε όλες τις ίνες.

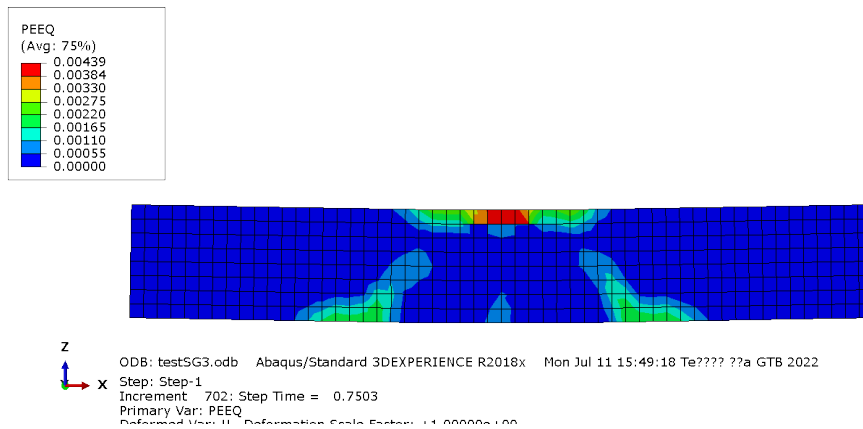
A)



B)



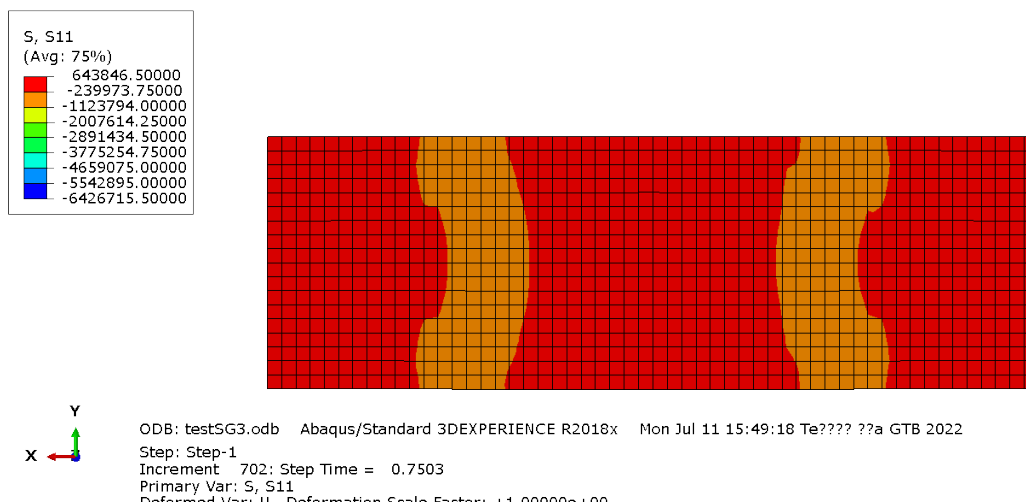
Γ)



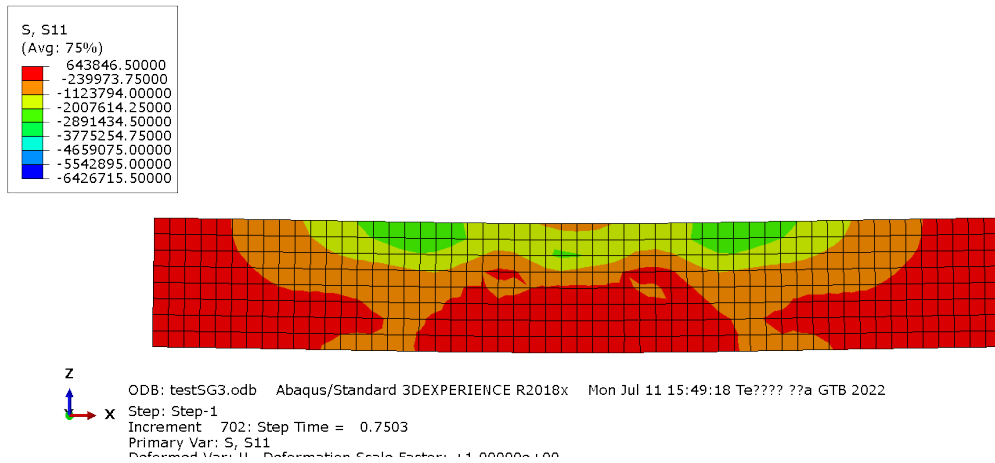
Σχ 6. 6 A), B), Γ) Διαγράμματα μέσωσν πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Από τα Σχ 6. 6 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις στο τοίχωμα αναπτύσσονται στην επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης, κάτι λογικό μιας και εκεί ασκούνται άμεσα τα φορτία της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Αναπτύσσονται όμως, έστω και λιγότερο ως προς τις τιμές και τον αριθμό των παραμορφωμένων στοιχείων, και σε περιοχές της εφελκυσμένης παρειάς του τοιχώματος. Επίσης παρατηρείται στο Σχ 6. 6 Γ) πλαστικοποίηση λόγω εφελκυσμού με τις τιμές της πλαστικοποίησης να κυμαίνονται μεταξύ 2.2mm και 2.75mm.

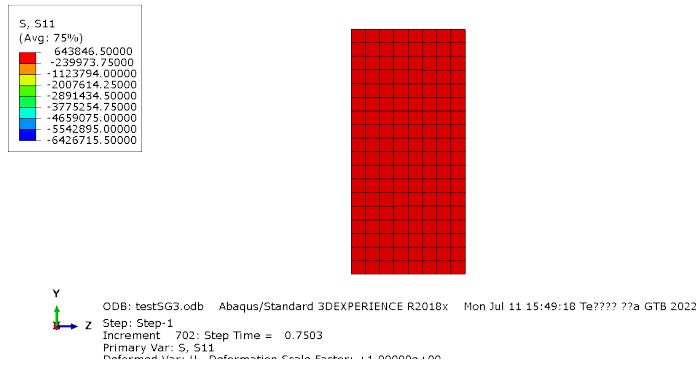
A)



B)



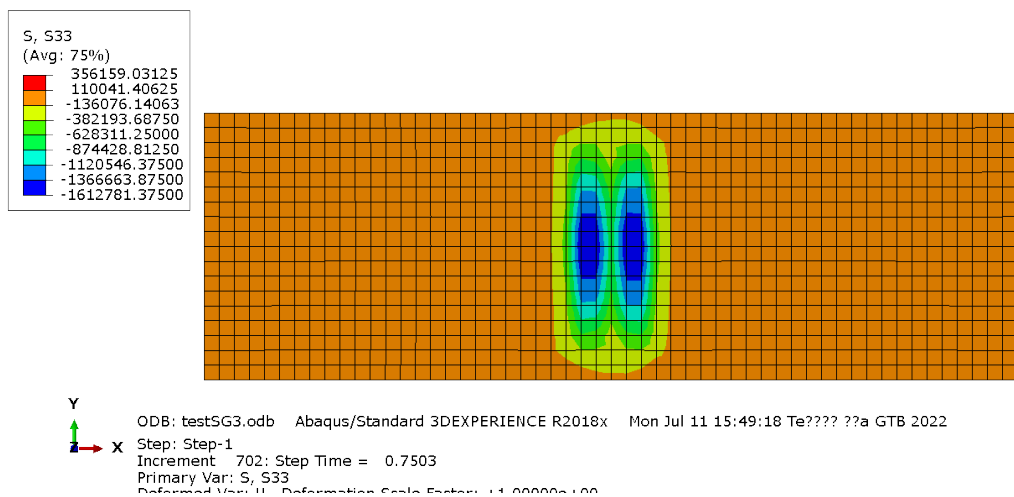
Γ)



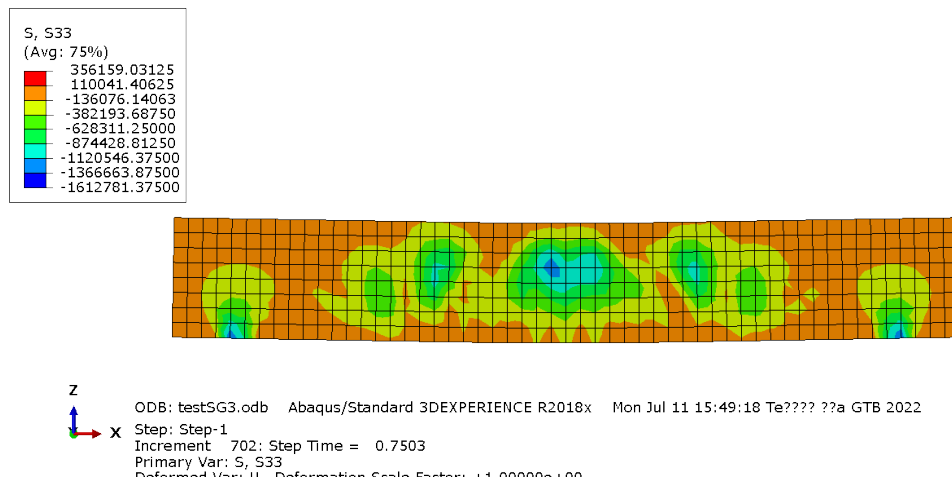
Σχ 6. 7 Α), Β), Γ) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Από τα Σχ 6. 7 Α), Β) και Γ) συμπεραίνεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα του τοιχώματος καταπονείται σε εφελκυσμό με μέγιστη πιθανή τιμή εφελκυστικής τάσης $S_{11}=644\text{kPa}$. Αυτές οι τάσεις είναι σχετικά μικρότερες από τις αντίστοιχες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στην ενίσχυση (τιμές μεταξύ 487kPa και 4.2MPa Σχ 6. 4).

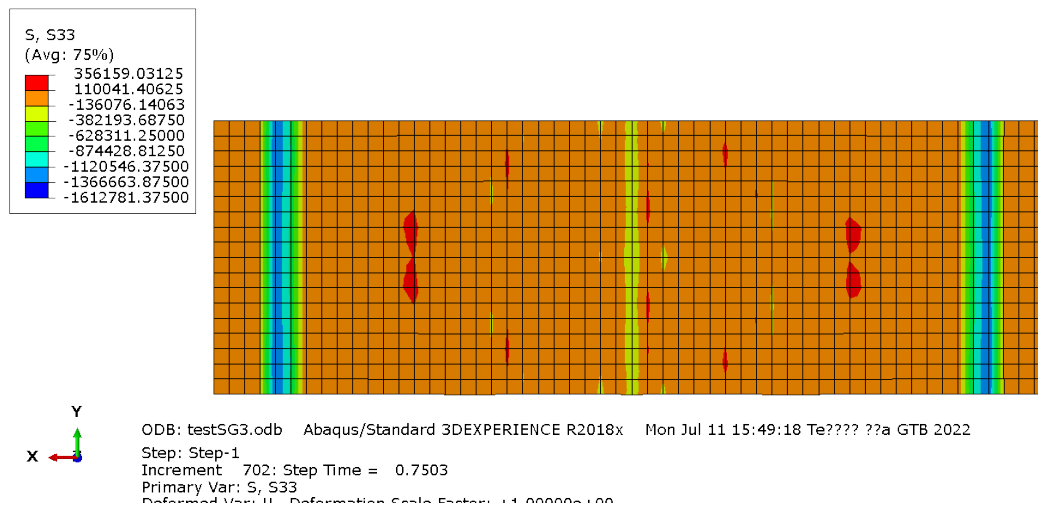
Α)



B)



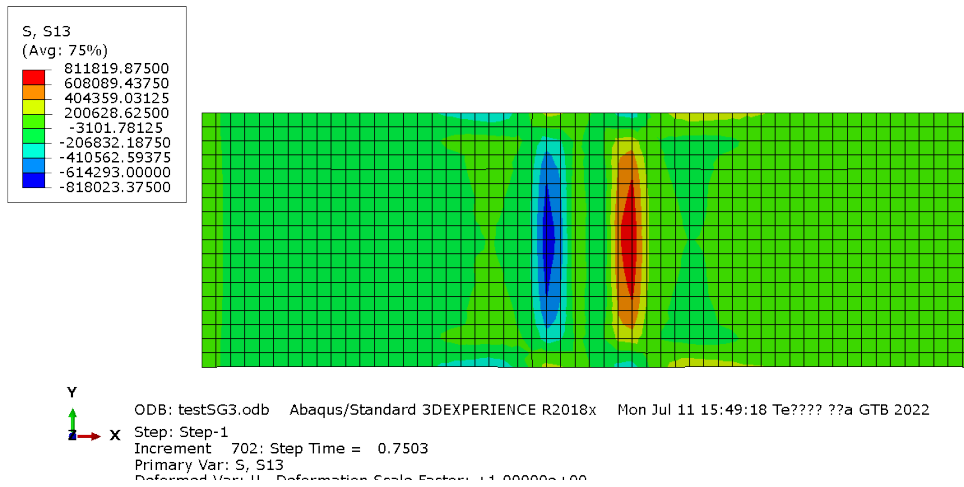
Γ)



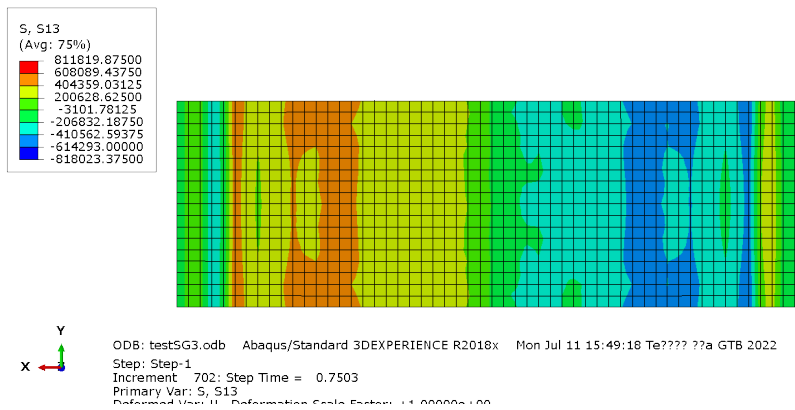
Σχ 6. 8 Α), Β),Γ) Διαγράμματα τάσεων S33 στο τοίχωμα

Από τα Σχ 6. 8 Α), Β) και Γ) παρατηρείται ότι για τις κύριες τάσεις S33 που αναπτύσσονται στο τοίχωμα, οι τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ 110kPa και -136kPa, αμελητέες σχετικά με τις άλλες τάσεις που καταπονούν το τοίχωμα, ενώ πολύ πιθανό αρκετά από τα στοιχεία αυτά να έχουν τάση $S_{33} \approx 0$. Οι μέγιστες κατά μέτρο τάσεις S33 αναπτύσσονται στη περιοχή επιβολής της μετατόπισης (Σχ 6. 8 Α)), οι τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ 1.4MPa και 1.6MPa και κρίνονται σημαντικές ως προς μέγεθος. Επίσης σημαντικές ως προς το μέτρο τάσεις S33 αναπτύσσονται και στις περιοχές που συνορεύουν με τις περιοχές των στηρίξεων της ενίσχυσης λόγω των δυνάμεων των αντιδράσεων των στηρίξεων (Σχ 6. 8 Γ)).

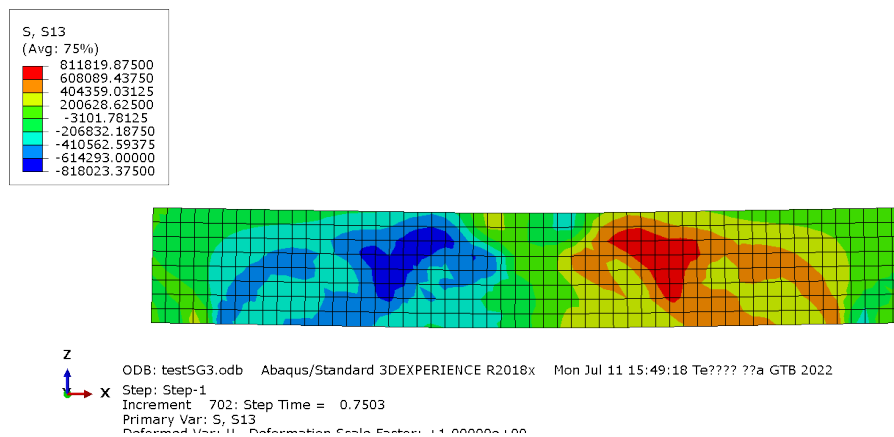
A)



B)



Γ)

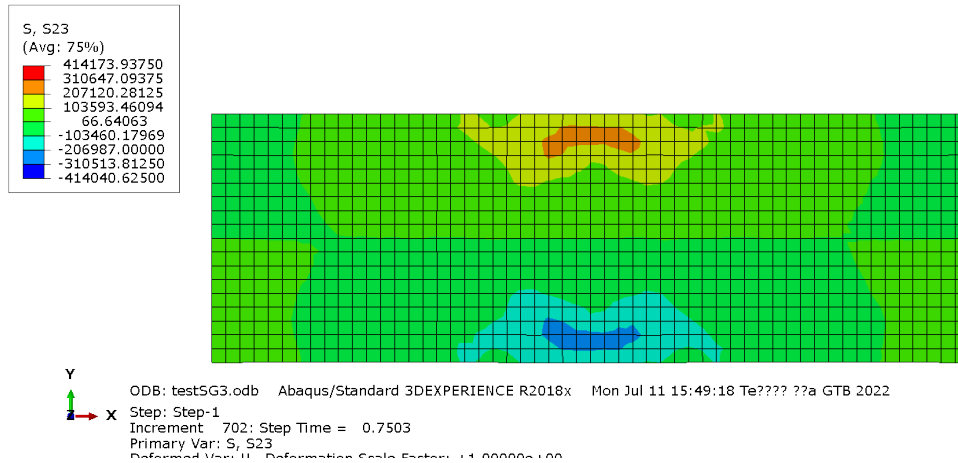


Σχ 6. 9 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S13 στο τοίχωμα

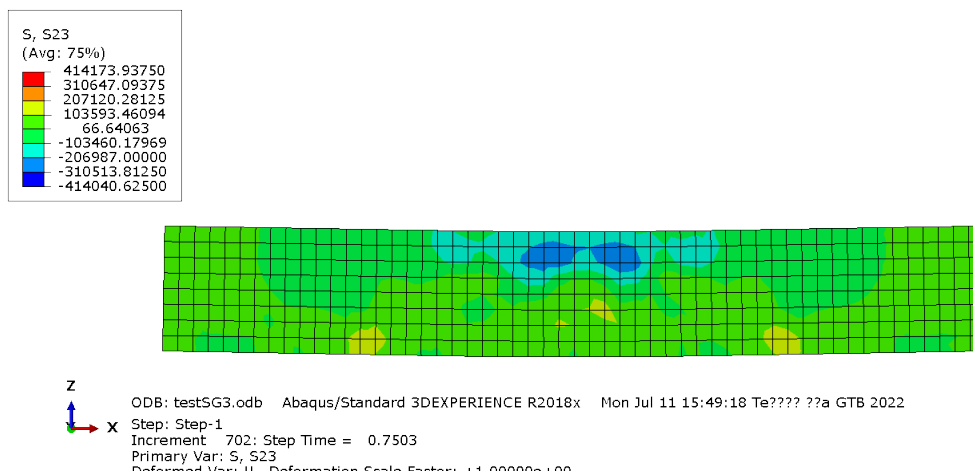
Στα Σχ 6. 9 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι οι διαμηθικές τάσεις S13 αναπτύσσονται συμμετρικά αλλά με αντίθετο πρόσημο, με άξονες

συμμετρίας στα Σχ 6. 9 Α) και Β) τον Υ και στο Σχ 6. 9 Γ) τον Ζ. Οι μέγιστες πιθανές διατμητικές τάσεις S13 κυμαίνονται $\approx 800\text{kPa}$ κατά μέτρο.

A)



B)



Σχ 6. 10 Α), Β) Διαγράμματα τάσεων S23 στο τοίχωμα

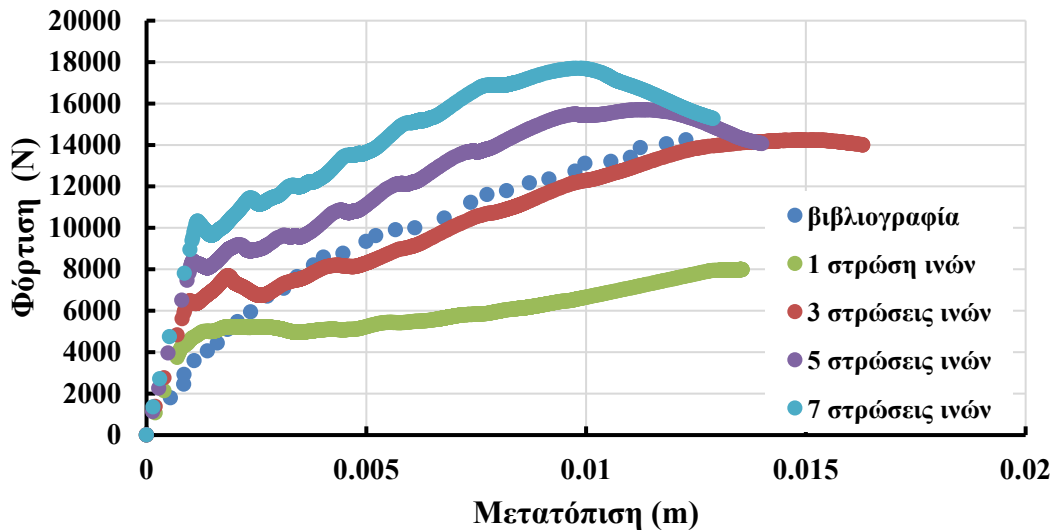
Από τα Σχ 6. 10 Α) και Β) παρατηρείται ότι οι μέγιστες πιθανές διατμητικές τάσεις S23 κυμαίνονται $\approx 400\text{kPa}$ κατά μέτρο και είναι μικρότερες σε τιμή από τις αντίστοιχες S13 (Στα Σχ 6. 9 Α), Β)), κάτι λογικό, αφού στην διεύθυνση X ασκείται ουσιαστικά η καταπόνηση από την φόρτιση, ενώ στην Υ δεν αναπτύσσεται καταπόνηση. Επίσης από το Σχ 6. 10 Β) σημειώνεται ότι οι τάσεις S23 αναπτύσσονται κοντά στην επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης. Στις επιφάνειες του τοιχώματος που απέχουν από την επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης καταγράφεται $S23 \approx 0$. Άρα, οι S23 είναι αμελητέες όσο αναφορά τον μηχανισμό αστοχίας του δοκιμίου.

6.2 TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΜΟΝΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Από το Σχ 6. 11 παρατηρείται ότι η αντίστοιχη πειραματική καμπύλη η οποία έχει 3 στρώσεις ινών από γυαλί προσεγγίζεται σε μορφή και τιμές σε πολύ σημαντικό βαθμό από την αντίστοιχη του προσομοιώματος. Όμως, η μέγιστη φόρτιση του προσομοιώματος προσεγγίζεται για μεγαλύτερη μετατόπιση από το αντίστοιχο πείραμα ($14.86\text{mm} > 12.2\text{mm}$), παρουσιάζοντας όμως ταυτόχρονα σχεδόν ίδια μέγιστη φόρτιση. Συγκεκριμένα, ο λόγος της μέγιστης φόρτισης του προσομοιώματος διά την αντίστοιχη μέγιστη φόρτιση του πραγματικού δοκιμίου είναι

$$\frac{14230.2\text{N}}{14245.28\text{N}} = 0.999 \text{ άρα είναι σχεδόν ίσες οι τιμές, καταλήγοντας έτσι ότι το}$$

συγκεκριμένο προσομοίωμα προσεγγίζει την συμπεριφορά του συγκεκριμένου δοκιμίου σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Στην συνέχεια, αυξομειώνεται ο αριθμός των στρώσεων ινών γυαλιού και ως επακόλουθο αυξομειώνεται ανάλογα και το πάχος της ενίσχυσης TRM ώστε να ισχύουν οι ίδιες αναλογίες υλικών τσιμεντοειδές-ίνες-τσιμεντοειδές-ίνες-τσιμεντοειδές και αντίστοιχα (Kariou et al., 2018) και προκύπτουν αναμενόμενα αποτελέσματα: αυξάνουν οι στρώσεις ινών, αυξάνει το μέγεθος της καμπύλης καθώς και οι φορτίσεις, όμως τις μέγιστες φορτίσεις τις προσεγγίζουν για μικρότερη μετατόπιση. Οπότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι περισσότερες στρώσεις ινών από γυαλί κάνουν το δοκίμιο πιο δύσκαμπτο. Εξαίρεση αποτελεί η 1 στρώση, στην οποία η αντίστοιχη καμπύλη έχει ελαφρώς διαφορετική μορφή μετά την πρώτη πλαστικοποίηση (ρηγμάτωση τσιμεντοειδούς), με την αστοχία να πραγματοποιείται για πολύ χαμηλότερη φόρτιση συγκριτικά με τις άλλες καμπύλες των διαφορετικών αριθμών στρώσεων. Αυτή η απόκλιση τεκμηριώνει την μη χρήση στην πραγματικότητα ενισχύσεων TRM με 1 στρώση ινών από γυαλί, μιας και δεν αυξάνουν σημαντικά την αντοχή του ενισχυμένου δοκιμίου συγκριτικά με την χρήση περισσότερων στρώσεων ινών (Kariou et al., 2018).



Σχ 6. 11 Διάγραμμα καμπυλών του προσομοιώματος ενισχυμένης τοιχοποιίας με ενίσχυση TRM με ίνες από γυαλί με διαφορετικό αριθμό στρώσεων ινών

Στην συνέχεια θα υπολογιστούν οι λόγοι των μέγιστων φορτίων για διαφορετικό αριθμό στρώσεων ινών:

$$3 \text{ στρώσεις} / 1 \text{ στρώση} = 3 \rightarrow \frac{14230.2\text{N}}{7983.29\text{N}} = 1.78$$

$$7 \text{ στρώσεις} / 5 \text{ στρώσεις} = 1.4 \rightarrow \frac{17692.8\text{N}}{15695.7\text{N}} = 1.13$$

$$5 \text{ στρώσεις} / 3 \text{ στρώσεις} = 1.667 \rightarrow \frac{15695.7\text{N}}{14230.2\text{N}} = 1.1$$

$$7 \text{ στρώσεις} / 3 \text{ στρώσεις} = 2.333 \rightarrow \frac{17692.8\text{N}}{14230.2\text{N}} = 1.24$$

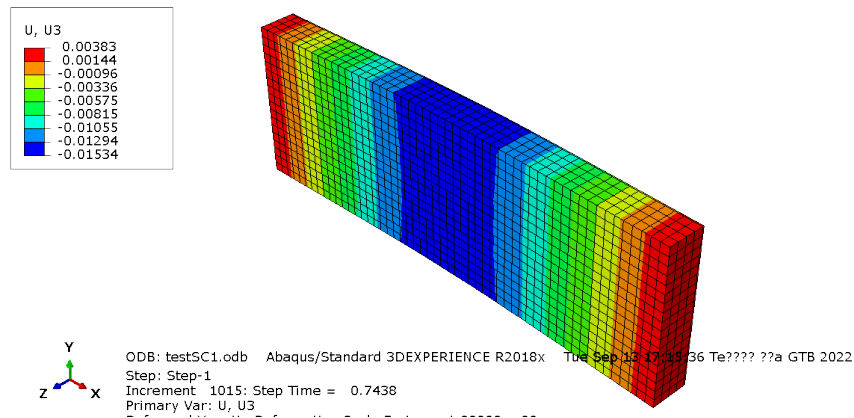
Από τους υπολογισμούς συμπεραίνεται ότι προτιμότερο κρίνεται το προσομοίωμα με 3 στρώσεις ινών. Από την 1 στις 3 στρώσεις καταγράφεται σημαντική αύξηση της αντοχής. Όμως οι 3 στρώσεις συγκρινόμενες με τις 5 και τις 7 παρατηρείται ότι η αύξηση της αντοχής δεν είναι αρκετή για να δικαιολογήσει την αύξηση στο κόστος κατασκευής της ενίσχυσης, της οποίας το κόστος είναι σημαντικό (αύξηση ινών από γυαλί, αύξηση τσιμεντοειδούς υλικού):

$$3 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.004\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00236\text{m}^3$$

$$5 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.006\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00354\text{m}^3$$

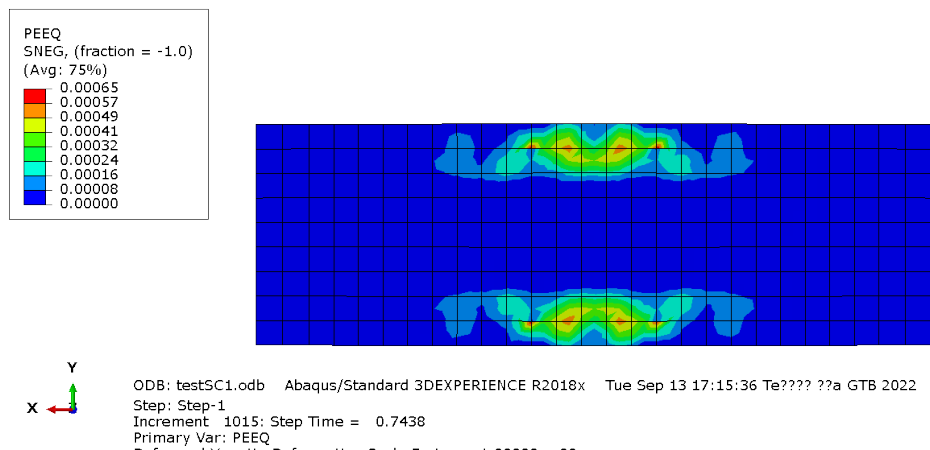
$$7 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.008\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00472\text{m}^3$$

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων του δοκιμίου με 3 στρώσεις ινών από γυαλί και μονό πάχος τοιχοποιίας (ενότητα 6, περίπτωση S_G3):



Σχ 6. 12 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 για το προσομοίωμα του ενισχυμένου τοιχώματος

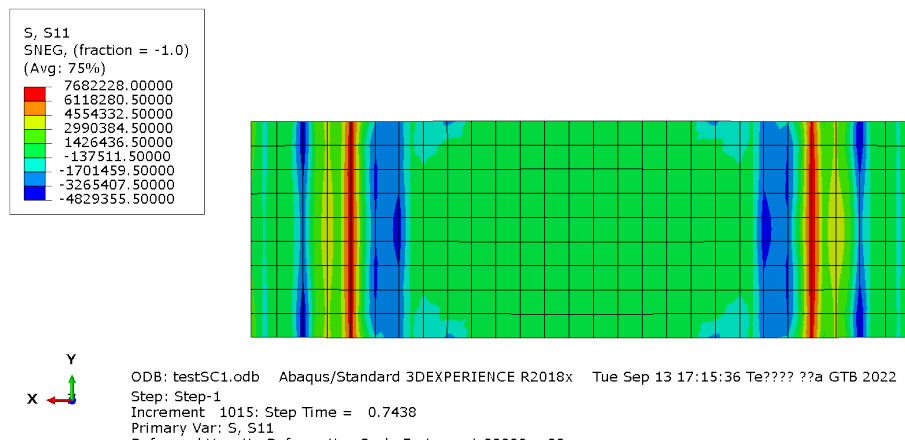
Στο Σχ 6. 12 η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση είναι -0.014864m ενώ την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 0.00144m και 0.00383m .



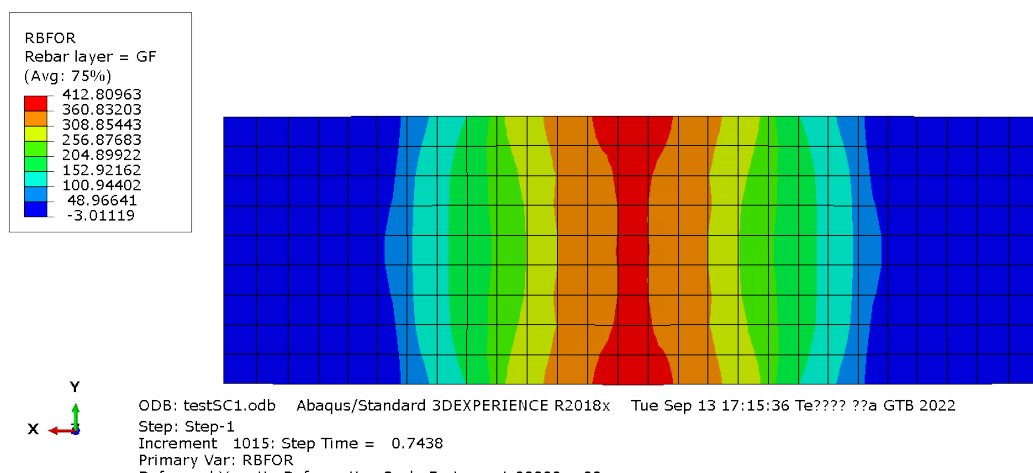
Σχ 6. 13 Διάγραμμα μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Από το Σχ 6. 13 καταγράφονται οι πλαστικοποιημένες περιοχές στην ενίσχυση, οι οποίες εμφανίζονται κεντρικά της ενίσχυσης, κάτι λογικό, εφόσον η επιβαλλόμενη μετατόπιση ασκείται στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου οπότε και αυτή μετατοπίζεται (Σχ 6. 12) και παραμορφώνεται περισσότερο, καθώς επίσης είναι παράλληλες στις διαμήκεις ίνες.

Αξιοσημείωτο είναι ότι είναι συμμετρικές ως προς τον X αλλά και τον Y άξονα.



Σχ 6. 14 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης
 Από το Σχ 6. 14 καταγράφονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις να κυμαίνονται μεταξύ 6.1MPa και 7.7MPa, οι οποίες αναπτύσσονται στις περιοχές των στηρίξεων, λογικό αφού εκεί ασκούνται οι φορτίσεις από τις αντιδράσεις των στηρίξεων.

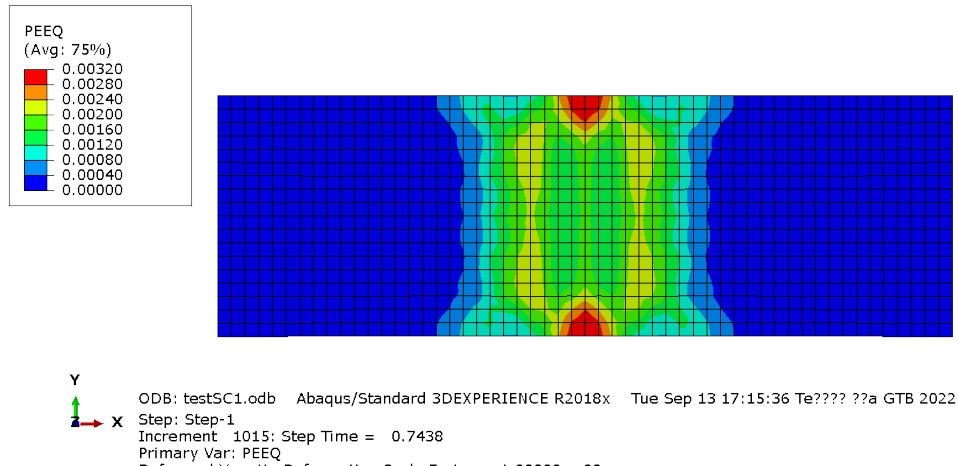


Σχ 6. 15 Διάγραμμα ορθών εφελκυστικών δυνάμεων ινών RBFOR στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

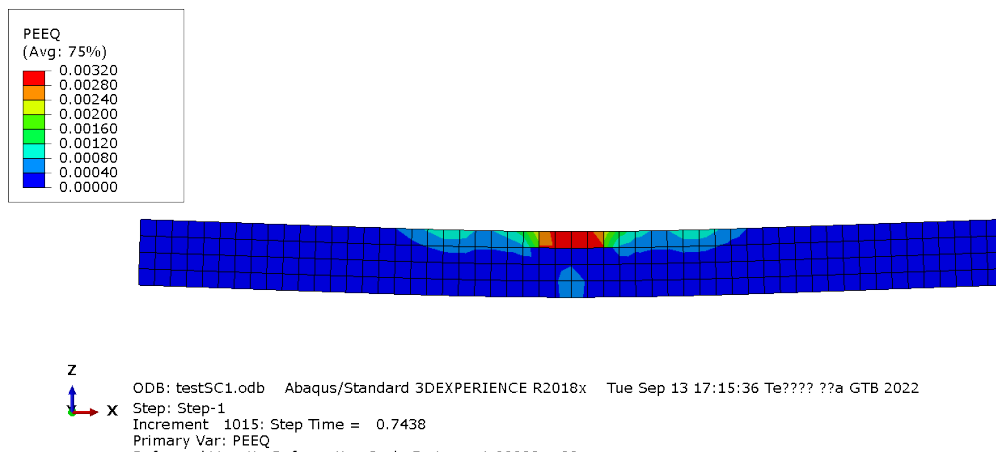
Από το Σχ 6. 15 σημειώνεται ότι η μέγιστη ορθή εφελκυστική δύναμη των ινών κυμαίνεται μεταξύ 360.8N και 412.8N και βρίσκεται κεντρικά της ενίσχυσης, κάτι λογικό αφού εκεί η ενίσχυση εφελκύεται περισσότερο, άρα και οι ίνες εφελκύνονται περισσότερο αντίστοιχα. Οι μέγιστες ορθές εφελκυστικές τάσεις των ινών προκύπτουν από τις αντίστοιχες δυνάμεις διά την ισοδύναμη επιφάνεια της ίνας: $\frac{412.8N}{5.28 \cdot 10^{-7} m^2} = 781.82 MPa < 1400 MPa$

(τάση αστοχίας ινών) άρα δεν αστοχούν οι ίνες της ενίσχυσης αλλά το τοίχωμα, το πιθανότερο σε διάτμηση.

A)



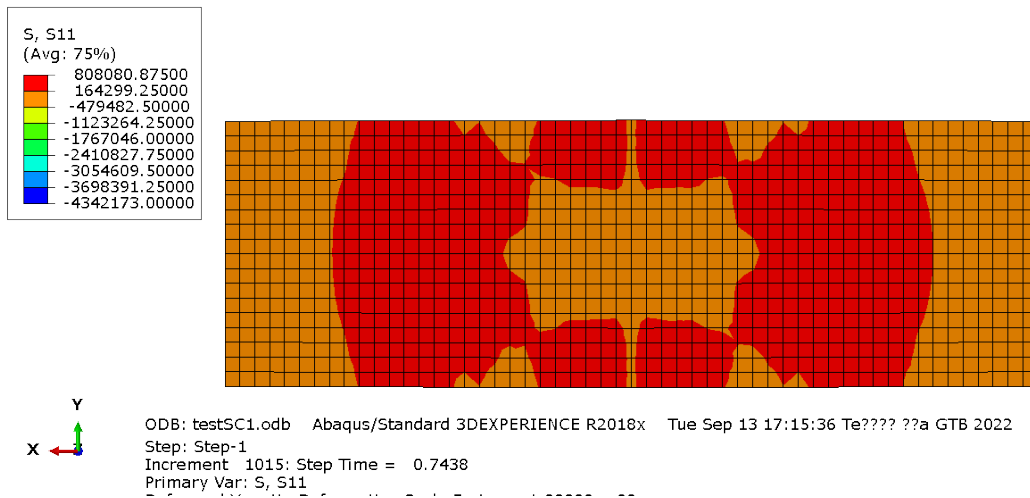
B)



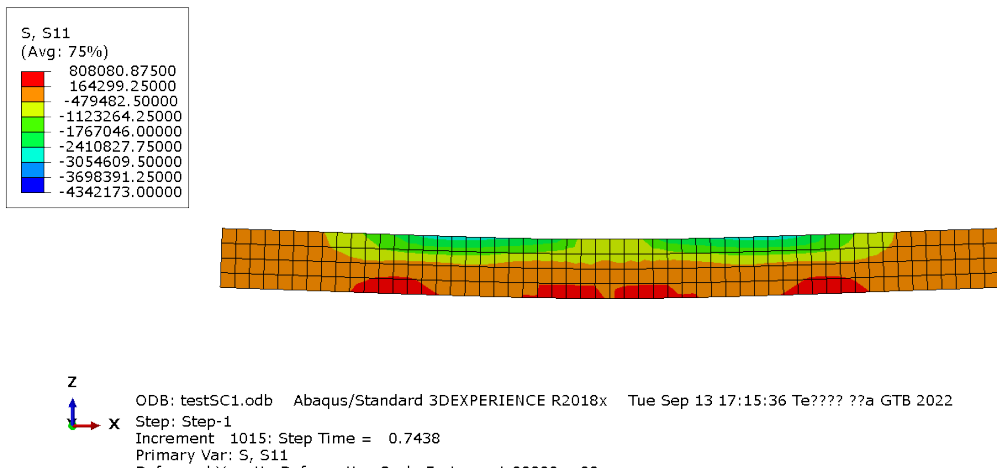
Σχ 6. 16 A), B) Διαγράμματα μέσω πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Από τα Σχ 6. 16 A) και B) παρατηρείται ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις στο τοίχωμα αναπτύσσονται στην επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης, κάτι λογικό μιας και εκεί ασκούνται άμεσα τα φορτία της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Η τιμή πλαστικοποίησης $\approx 0.6\text{mm}$ που αναπτύσσεται σε πολύ μικρή περιοχή στην μέση κάτω στο Σχ 6. 16 B) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

A)



B)



Σχ 6. 17 A), B) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Στο Σχ 6. 17 συμπεραίνεται ότι μόνο η παρειά του τοιχώματος που συνορεύει με την ενίσχυση (εφελκυστική παρειά του τοιχώματος) καταπονείται με μέγιστες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 164kPa και 808kPa. Οι εφελκυστικές τάσεις S11 στο τοίχωμα είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες που αναπτύσσονται στην ενίσχυση (Σχ 6. 14).

6.3 TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Σύμφωνα με το Σχ 6. 18 η καμπύλη για προσομοίωμα με 3 στρώσεις ινών από γυαλί προσεγγίζει ικανοποιητικά σε μορφή την πειραματική καμπύλη, όμως προσεγγίζει την μέγιστη καταπόνηση για μετατόπιση $\approx 3\text{mm}$

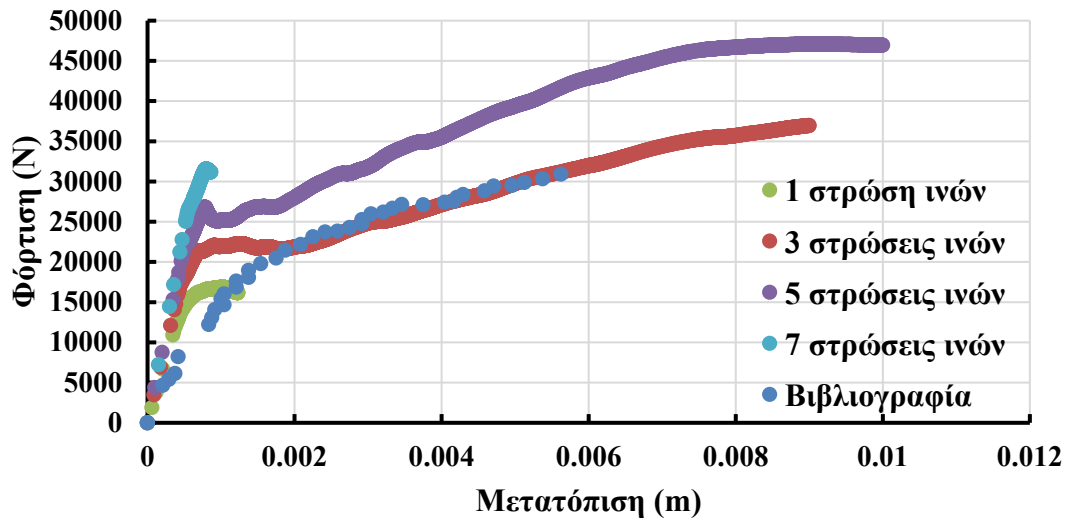
μεγαλύτερη σε σχέση με την πειραματική καμπύλη. Αποτέλεσμα είναι το προσομοίωμα να αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη φόρτιση σε σχέση με το πείραμα, με τον λόγο των μεγίστων φορτίσεων της πραγματικής καμπύλης με του προσομοιώματος να είναι $\frac{36951.4}{30895.06} = 1.196$. Η μεγαλύτερη αντοχή που αναπτύσσεται πολύ πιθανό να συμβαίνει επειδή το πεπερασμένο στοιχείο τρισδιάστατης ελαστικότητας C3D8R που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του τοιχώματος, το οποίο είναι στοιχείο τρισδιάστατης έντασης, υπερεκτιμούνται τα διατμητικά χαρακτηριστικά του τοιχώματος, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το πάχος του τοιχώματος (στην συγκεκριμένη περίπτωση διπλασιάστηκε) τόσο περισσότερο να φαίνεται να αντέχει διατμητικά από την πραγματικότητα και άρα να αυξάνεται η αντοχή του (όπως παρατηρήθηκε και στην ενότητα 6.1). Στο προσομοίωμα για 1 στρώση ινών από γυαλί παρατηρήθηκε αστοχία σχεδόν με την έναρξη της πλαστικοποίησης και για χαμηλές τιμές μετατόπισης και καταπόνησης (όταν ρηγματώθηκε το τσιμεντοειδές, άρα αστόχησε το τσιμεντοειδές), κάτι που επαληθεύει (όπως και στην ενότητα 6.2) το λόγο που δεν χρησιμοποιούνται ενισχύσεις TRM με 1 στρώση πλέγματος ινών από γυαλί στις κατασκευές. Σημαντικό είναι ότι στο προσομοίωμα για 7 στρώσεις ινών από γυαλί παρατηρείται αδυναμία σύγκλισης της ανάλυσης και χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση. Στο προσομοίωμα για 5 στρώσεις ινών από γυαλί η αντίστοιχη καμπύλη έχει παρόμοια μορφή με την καμπύλη για 3 στρώσεις ινών αλλά αναπτύσσει μεγαλύτερες τιμές φόρτισης. Ο λόγος των μεγίστων φορτίσεων για 5 στρώσεις και 3 στρώσεις ινών από γυαλί υπολογίζεται:

$$5 \text{ στρώσεις} / 3 \text{ στρώσεις} = 1.667 \rightarrow \frac{47091.4\text{N}}{36951.4\text{N}} = 1.274$$

$$3 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.004\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00236\text{m}^3$$

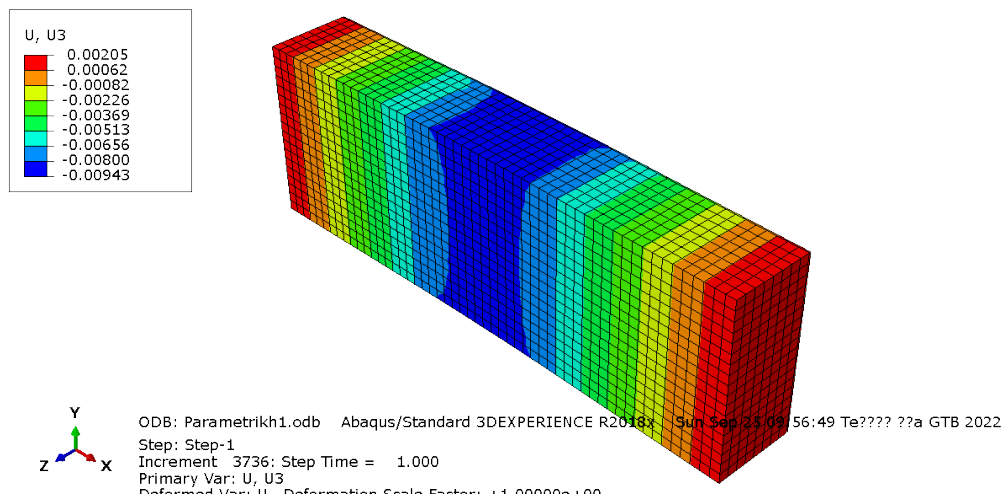
$$5 \text{ στρώσεις ινών} \rightarrow 0.006\text{m πάχος ενίσχυσης} \times 0.44\text{m} \times 1.34\text{m} = 0.00354\text{m}^3$$

Από τους υπολογισμούς συμπεραίνεται ότι προτιμότερο κρίνεται το προσομοίωμα με 5 στρώσεις ινών, επειδή η αύξηση της αντοχής είναι αρκετή για να δικαιολογήσει την αύξηση στο κόστος κατασκευής της ενίσχυσης (αύξηση ινών από γυαλί, αύξηση τσιμεντοειδούς υλικού).



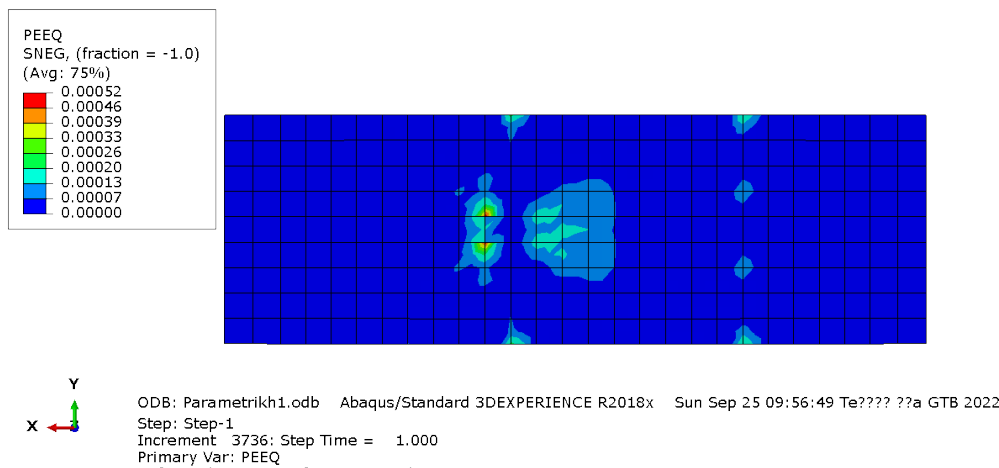
Σχ 6. 18 Διάγραμμα καμπυλών του προσομοιώματος ενισχυμένης τοιχοποιίας με ενίσχυση TRM με ίνες από γυαλί και διπλάσιο πάχος τοιχοποιίας με διαφορετικό αριθμό στρώσεων ινών

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων του δοκιμίου με 3 στρώσεις ινών από γυαλί και διπλό πάχος τοιχοποιίας (ενότητα 6, περίπτωση D_G3):



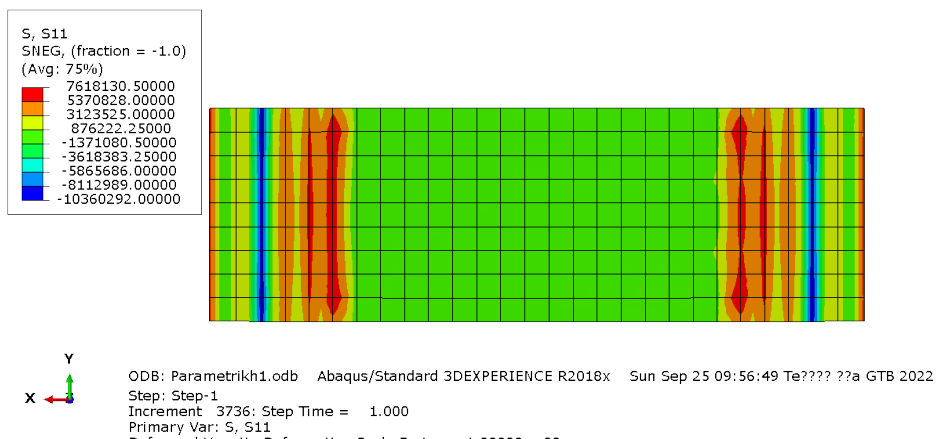
Σχ 6. 19 Διάγραμμα μετατοπίσεων U3 στο προσομοίωμα του ενισχυμένου τοιχώματος

Στο Σχ 6. 19 καταγράφεται η κρίσιμη μετατόπιση στην μέγιστη φόρτιση $-0.009m$, ενώ την ίδια στιγμή στα άκρα του προσομοιώματος η μετακίνηση κυμαίνεται μεταξύ $0.00062m$ και $0.00205m$.



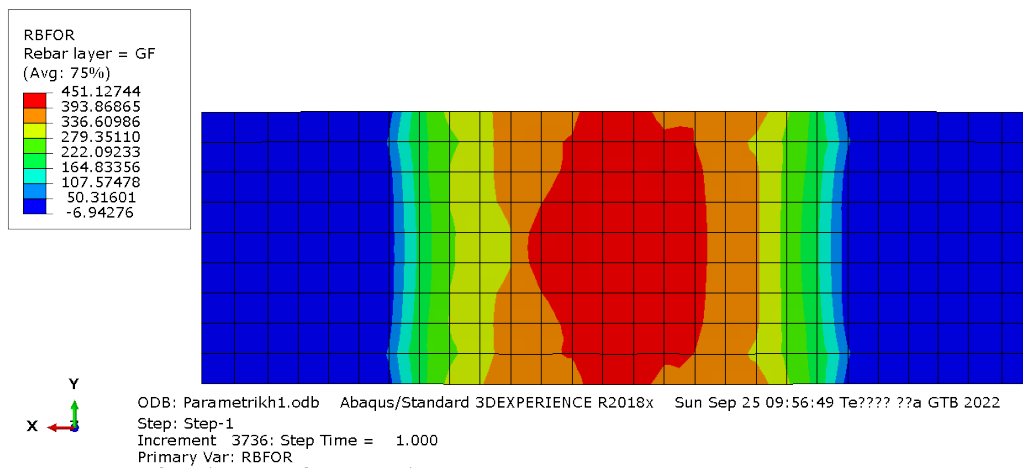
Σχ 6. 20 Διάγραμμα μέσων πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Στο Σχ 6. 20 παρατηρείται σχετικά μικρή πλαστικοποίηση σε περιοχές της ενίσχυσης. Οι μέγιστες μέσες πλαστικές παραμορφώσεις (κυμαίνονται μεταξύ 0.46mm και 0.52mm) αναπτύσσονται σημειακά, ενώ σχεδόν όλες οι μέσες πλαστικές παραμορφώσεις ≈ 0 .



Σχ 6. 21 Διάγραμμα τάσεων S11 στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

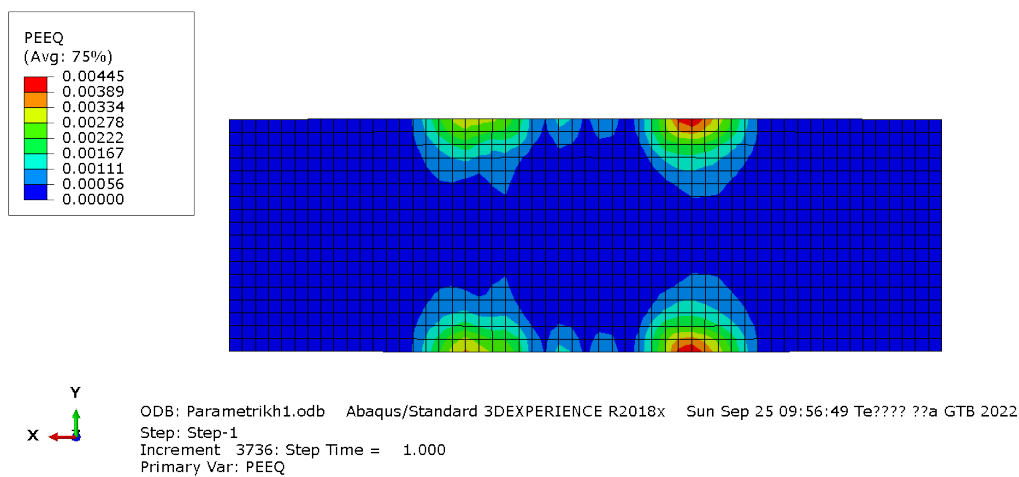
Από το Σχ 6. 21 παρατηρείται ότι οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (κυμαίνονται μεταξύ 5.4MPa και 7.6MPa) αναπτύσσονται στις περιοχές των στηρίξεων, ενώ οι αμέσως μεγαλύτερες (κυμαίνονται μεταξύ 3.1MPa και 5.4MPa) αναπτύσσονται σε περιοχές παράλληλες προς τις γραμμικές στηρίξεις και προς τις άκρες της ενίσχυσης.



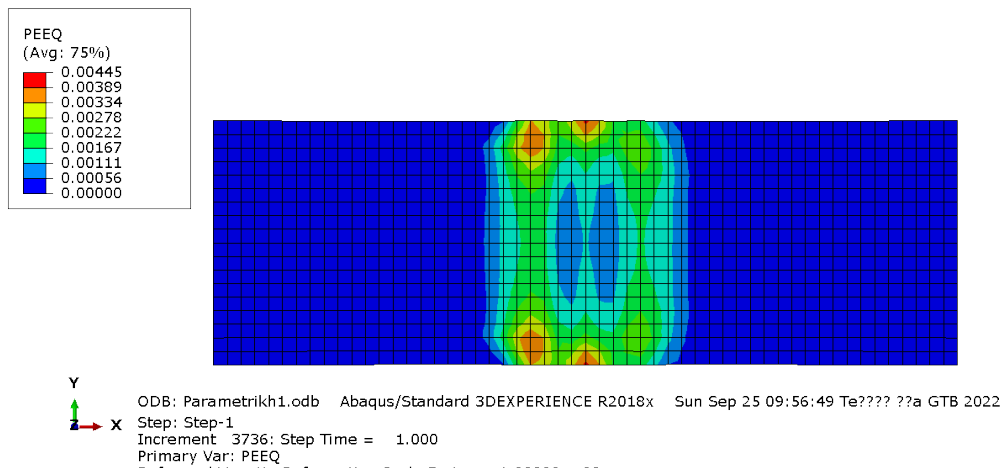
Σχ 6. 22 Διάγραμμα ορθών εφελκυστικών δυνάμεων ιών RBFOR στην εφελκόμενη παρειά της ενίσχυσης

Από το Σχ 6. 22 σημειώνεται ότι η μέγιστη ορθή εφελκυστική δύναμη των ιών κυμαίνεται μεταξύ 393.9N και 451.1N και βρίσκεται κεντρικά της ενίσχυσης, κάτι λογικό αφού εκεί η ενίσχυση εφελκύεται περισσότερο, άρα και οι ίνες εφελκύνονται περισσότερο αντίστοιχα. Οι μέγιστες ορθές εφελκυστικές τάσεις των ιών προκύπτουν από τις αντίστοιχες δυνάμεις διά την ισοδύναμη επιφάνεια της ίνας: $\frac{451.1N}{5.28 \cdot 10^{-7} m^2} = 854.4MPa < 1400MPa$ (τάση αστοχίας ιών) άρα δεν αστοχούν οι ίνες της ενίσχυσης αλλά το τοίχωμα, το πιθανότερο σε διάτμηση.

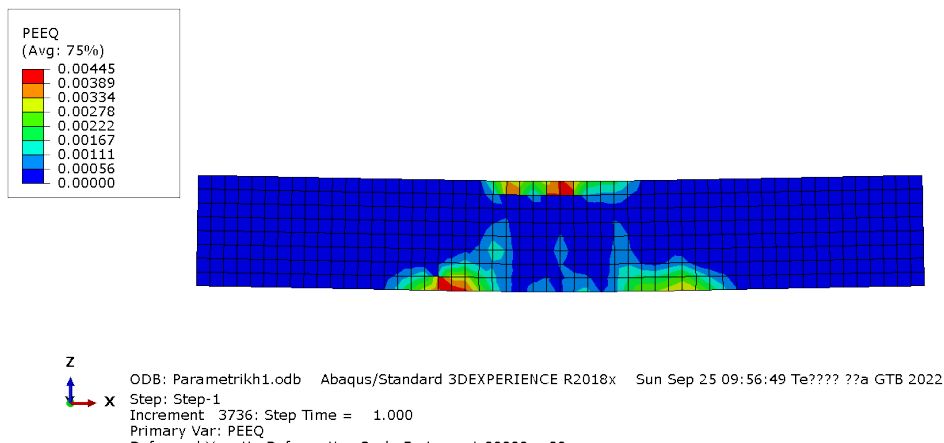
A)



B)



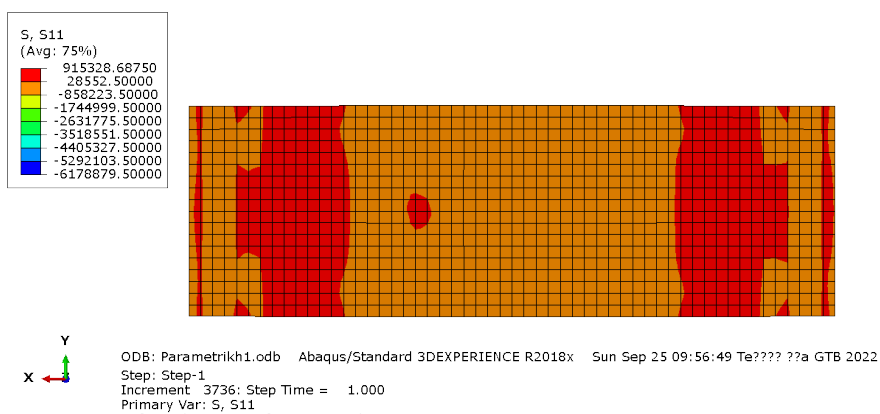
Γ)



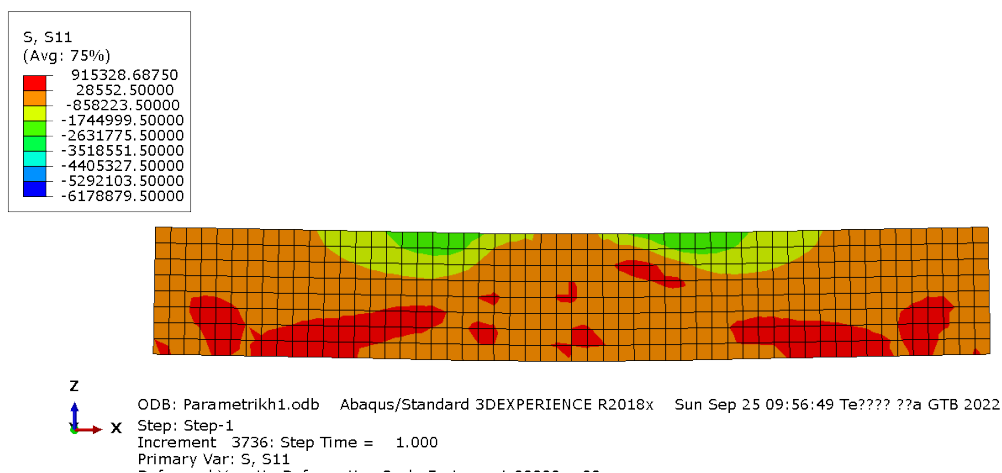
Σχ 6. 23 A), B), Γ) Διαγράμματα μέσωσν πλαστικών παραμορφώσεων PEEQ στο τοίχωμα

Το αξιοσημείωτο στα Σχ 6. 23 A), B) και Γ) είναι ότι πέρα από την περιοχή επιβολής της φόρτισης (της επιβαλλόμενης μετατόπισης) αναπτύσσονται σημαντικές μέσες πλαστικές παραμορφώσεις και σε περιοχές στην παρειά του τοιχώματος που συνδέεται με την ενίσχυση (εφελκυόμενη παρειά τοιχώματος).

A)



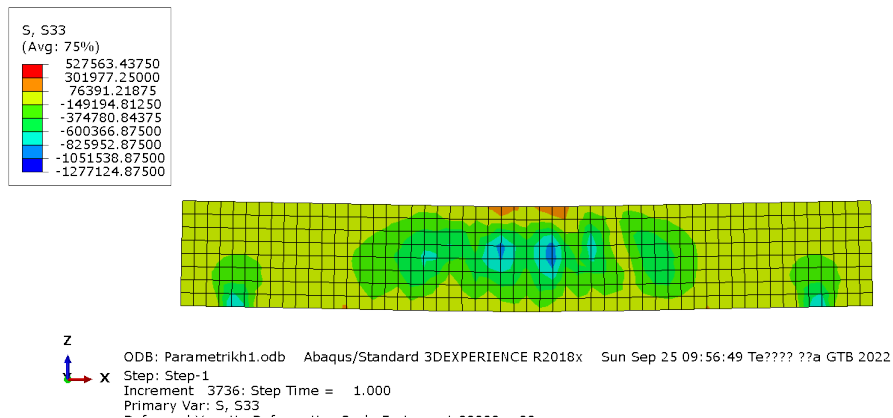
B)



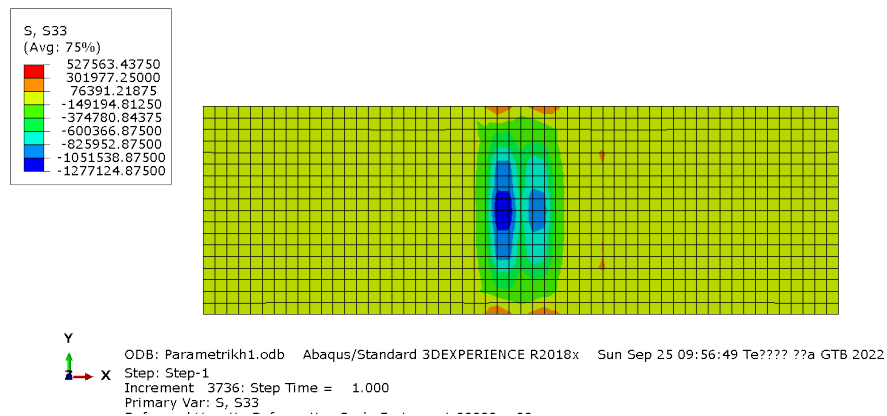
Σχ 6. 24 A), B) Διαγράμματα τάσεων S11 στο τοίχωμα

Στα Σχ 6. 24 A) και B) συμπεραίνεται ότι οι κύριες εφελκυστικές τάσεις (κυμαίνονται μεταξύ 29kPa και 915kPa) αναπτύσσονται στην εφελκυσόμενη παρειά του τοίχου (παρειά που συνδέεται με την ενίσχυση) γύρω από τις περιοχές που συνορεύουν με τις περιοχές των στηρίξεων στην ενίσχυση (Σχ 6. 21). Αυτό είναι λογικό, μιας και υπάρχει φόρτιση από τις αντιδράσεις των στηρίξεων η οποία μεταφέρεται στην εφελκυσόμενη παρειά του τοιχώματος μέσω της ενίσχυσης. Αξίζει να σημειωθεί από το Σχ 6. 24 B) ότι υπάρχουν και άλλες περιοχές που καταπονούνται από τις κύριες εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες όμως ελαττώνονται πλησιάζοντας την θλιβόμενη παρειά του τοίχου.

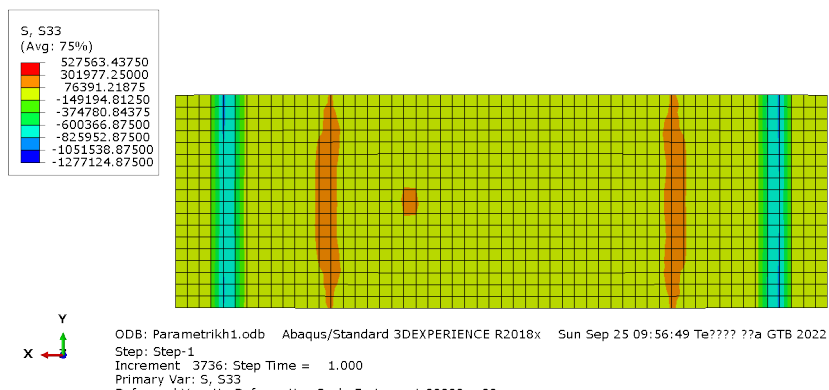
A)



B)



Γ)

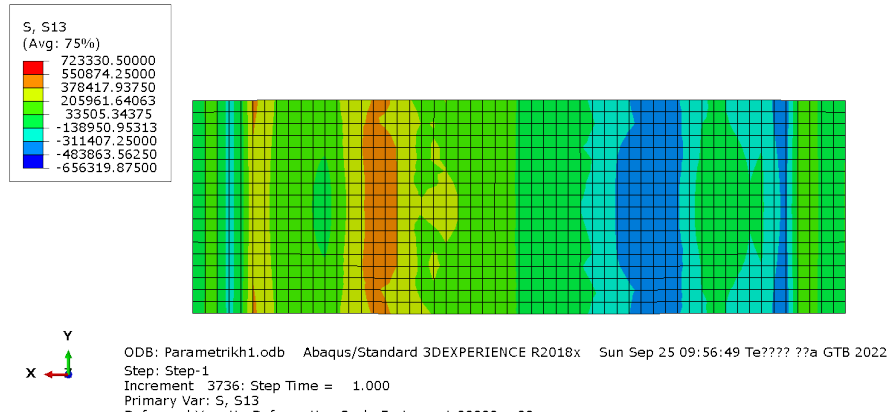


Σχ 6. 25 A), B), Γ) Διαγράμματα τάσεων S33 στο τοίχωμα

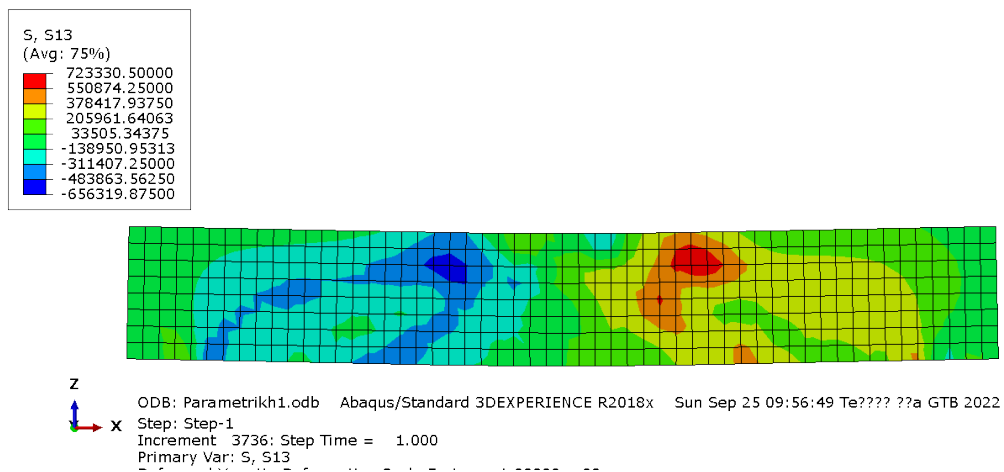
Από τα Σχ 6. 25 A), B) και Γ) παρατηρείται ότι οι τάσεις $S_{33} \approx 0$ (είναι αμελητέες) στις περισσότερες περιοχές του τοιχώματος. Όμως, οι μέγιστες κατά μέτρο τάσεις S33 που αναπτύσσονται στις περιοχές επιβαλλόμενης

μετατόπισης και οι τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ -1.1MPa και -1.3MPa κρίνονται σημαντικές, κατά αντιστοιχία με τα Σχ 6. 8.

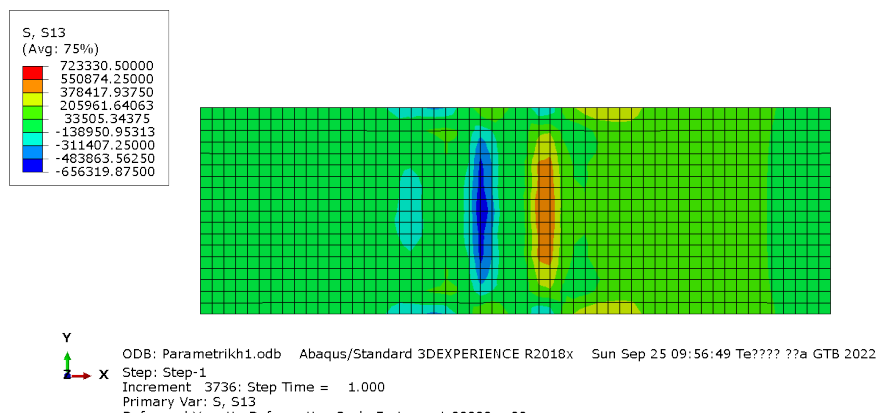
A)



B)



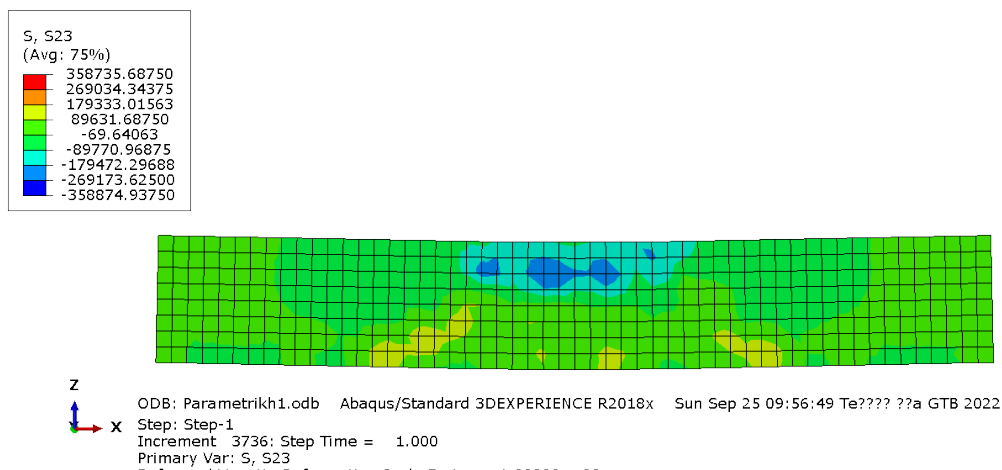
Γ)



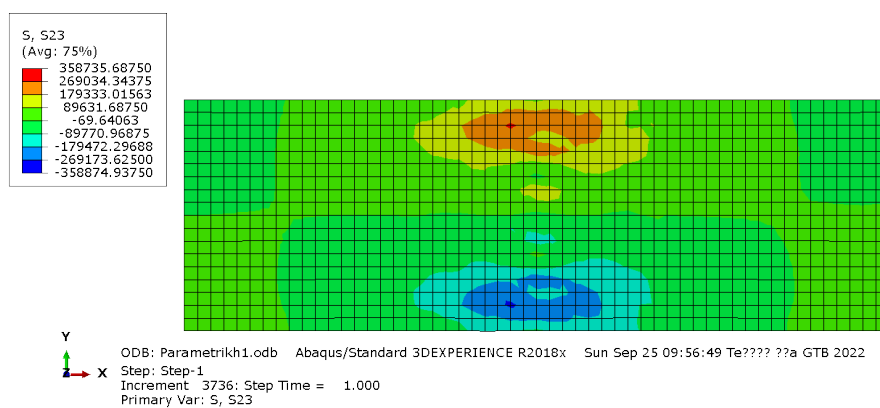
Σχ 6. 26 Α), Β), Γ) Διαγράμματα τάσεων S13 στο τοίχωμα

Στα Σχ 6. 26 Α), Β) και Γ) παρατηρείται ότι από την μέση του τοιχώματος και προς την φορά της διεύθυνσης X (προς τα θετικά της) αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις S13 με θετική φορά και μέγιστες τιμές μεταξύ 551kPa και 723kPa, ενώ από την μέση του τοιχώματος και προς την αντίθετη φορά της διεύθυνσης X (προς τα αρνητικά της) αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις S13 με αρνητική φορά και μέγιστες τιμές μεταξύ -484kPa και -656kPa. Παρατηρείται ότι σε τιμή είναι μεγαλύτερες οι θετικές S13, όμως οι αρνητικές S13 καλύπτουν περισσότερα στοιχεία του τοιχώματος από τις θετικές.

A)



B)



Σχ 6. 27 Α), Β) Διαγράμματα τάσεων S23 στο τοίχωμα

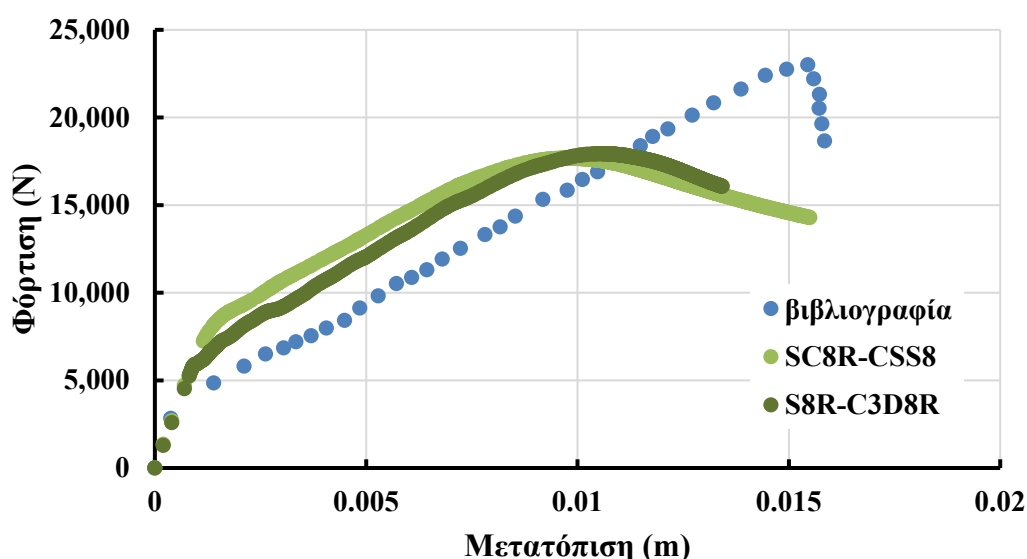
Από τα Σχ 6. 27 Α),Β) παρατηρείται ότι οι τάσεις S23 αναπτύσσονται κοντά στην επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης και συγκεκριμένα στις ακραίες

μεγάλες πλευρές του τοιχώματος, καθώς επίσης και στις αντίστοιχες περιοχές κοντά στην θλιβόμενη παρειά του τοιχώματος. Οι περιοχές του τοιχώματος που απέχουν από την επιφάνεια επιβολής της μετατόπισης καταγράφεται $S_{23} \approx 0$ ή $S_{23} \approx 179 \text{kPa}$ κοντά στην εφελκυστική παρειά του τοιχώματος. Η μέγιστες κατά μέτρο τάσεις (κυμαίνονται μεταξύ 269kPa και 359kPa) είναι μικρότερες από τις μέγιστες S_{13} κατά μέτρο (Σχ 6. 26 Α), Β)). Είναι λογικό το τοίχωμα να καταπονείται λιγότερο από την S_{23} σε σχέση με την S_{13} , αφού στην διεύθυνση X ασκείται ουσιαστικά η καταπόνηση από την φόρτιση, ενώ στην Y δεν αναπτύσσεται καταπόνηση.

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ SC8R ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ CSS8 ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όσο αναφορά τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων, στις ενότητες 5 και 6 χρησιμοποιήθηκαν ενίσχυση από συμβατικό κέλυφος S8R και τοίχωμα από στοιχείο τρισδιάστατης ελαστικότητας με μειωμένη ενσωμάτωση C3D8R. Σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιηθούν ενίσχυση από συνεχές κέλυφος SC8R και τοίχωμα από στερεό συνεχές κέλυφος CSS8, θα πραγματοποιηθούν αναλύσεις με διαφορετική TRM ενίσχυση ή/και διπλό πάχος τοιχοποιίας και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα των ενότητων 5 και 6, αλλά και με τα αντίστοιχα πειραματικά

(Kariou et al., 2018). Επιλέχθηκε αυτός ο συνδυασμός επειδή παρουσιάζει την περίπτωση ενός πλήρους τρισδιάστατου και κελυφωτού προσομοιώματος. Επίσης από την ενότητα 4.4 το αντίστοιχο διάγραμμα SC8R - CSS8 έχει μικρές διαφορές από την τελική επιλογή S8R- C3D8R, άρα θα μπορούσε να είναι μια καλή εναλλακτική προσομοίωση που αξίζει να διερευνηθεί (Σχ 7. 1).



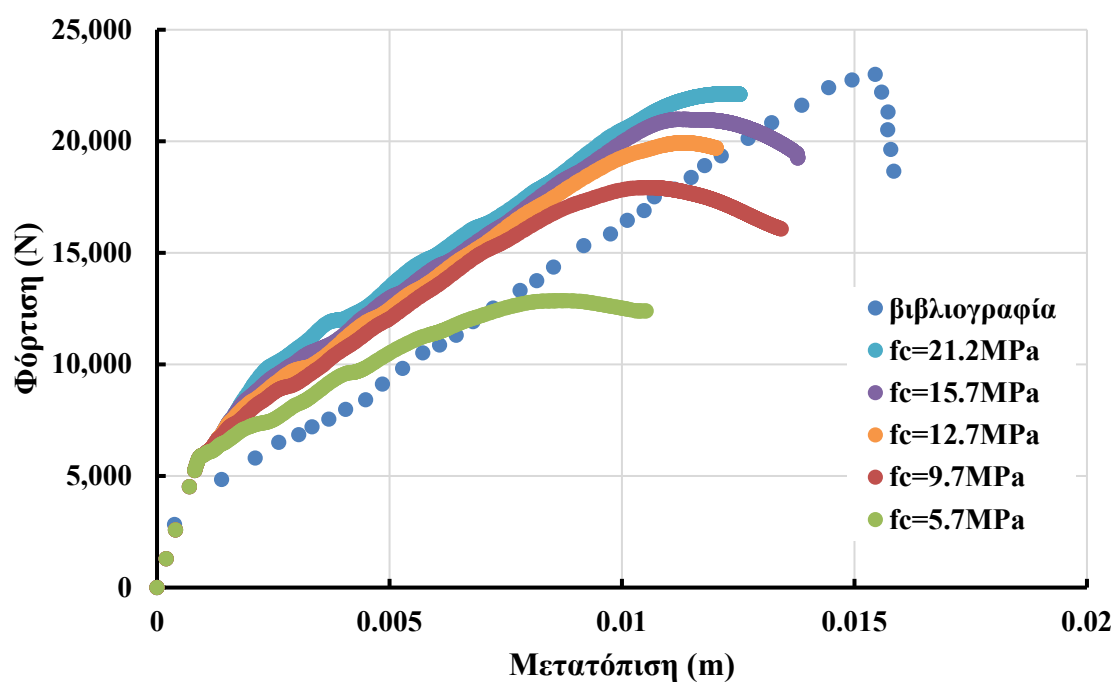
Σχ 7. 1 Διάγραμμα καμπυλών S8R- C3D8R και SC8R - CSS8

Τέλος, κρίνεται αναγκαίο να αναφερθεί ότι πρόκειται για τα ίδια προσομοιώματα με των ενότητων 5 και 6, άρα δεν θα παρουσιαστούν πάλι οι ίδιοι υπολογισμοί, μόνο οι συγκρίσεις των αντίστοιχων καμπυλών. Το μόνο που αλλάζει είναι τα είδη πεπερασμένων στοιχείων ενίσχυσης και τοίχου καθώς και το μέγεθος της διακριτοποίησή τους (ενότητα 4.4).

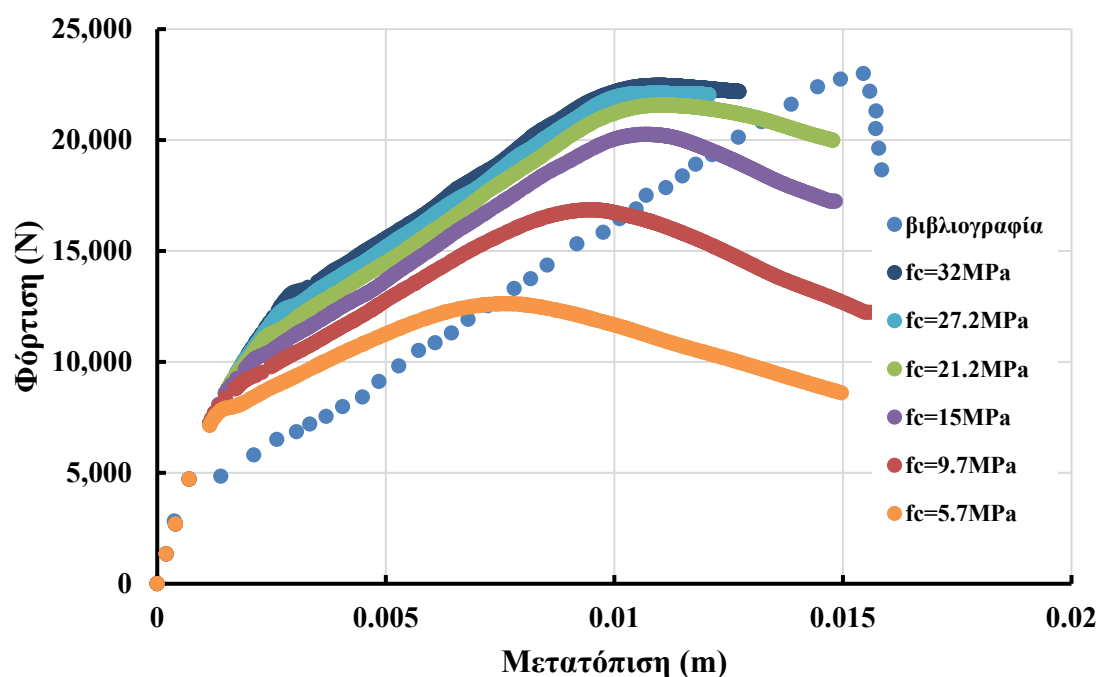
7.1 TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΜΟΝΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Από την ενότητα 5 εξήχθη το συμπέρασμα ότι πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Άρα, σε αυτήν την ενότητα, πέρα από την σύγκριση των καμπυλών για την λειτουργία των ινών άνθρακα, θα γίνει σύγκριση στο πώς επηρεάζει η παράμετρος της θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας το κάθε προσομοίωμα.

A)



B)



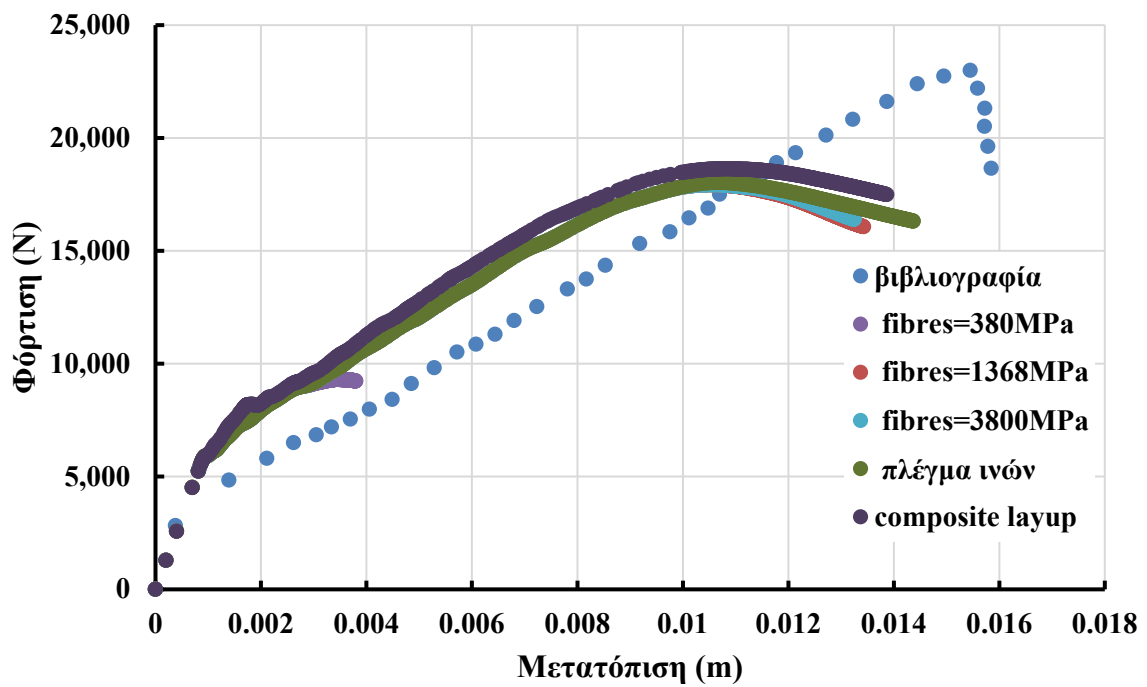
Σχ 7. 2 A),B) Καμπύλες προσομοιωμάτων A) S8R- C3D8R και

B) SC8R - CSS8 με μια στρώση ινών άνθρακα με εξεταζόμενη παράμετρο την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

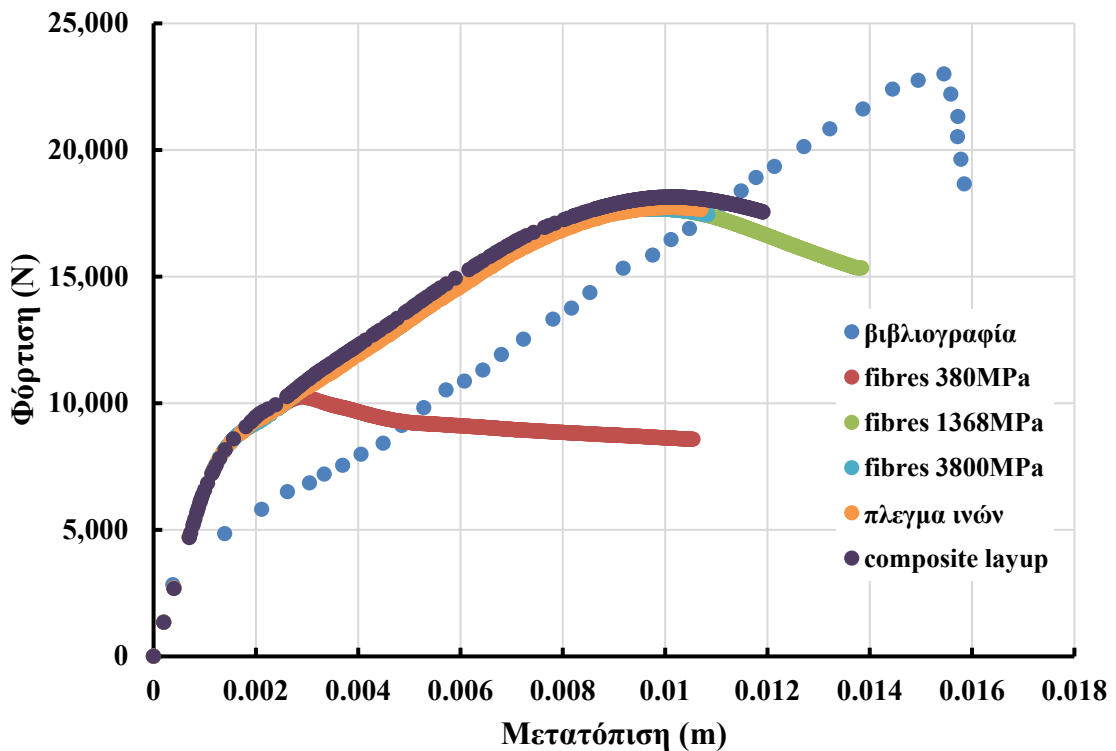
Συγκρίνοντας στο Σχ 7. 2 το A) με το B) παρατηρείται ότι και στα δύο προσομοιώματα όσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας όλο και συγκλίνουν, όμως το SC8R-CSS8 συγκλίνει για μεγαλύτερες τιμές θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας, καθώς επίσης για τιμές 15MPa και 21.2MPa προσεγγίζουν την πειραματική καμπύλη, ενώ το S8R-C3D8R οι τιμές 12.7MPa και 15.7MPa προσεγγίζουν την καμπύλη ικανοποιητικά. Οπότε το S8R-C3D8R προσεγγίζει καλύτερα το πείραμα και με την αξιοποίηση μικρότερων τιμών θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας.

Στο Σχ 7. 3 από τα A) και B) συγκρίνεται η επίδραση των ινών άνθρακα στα 2 προσομοιώματα.

A)



B)

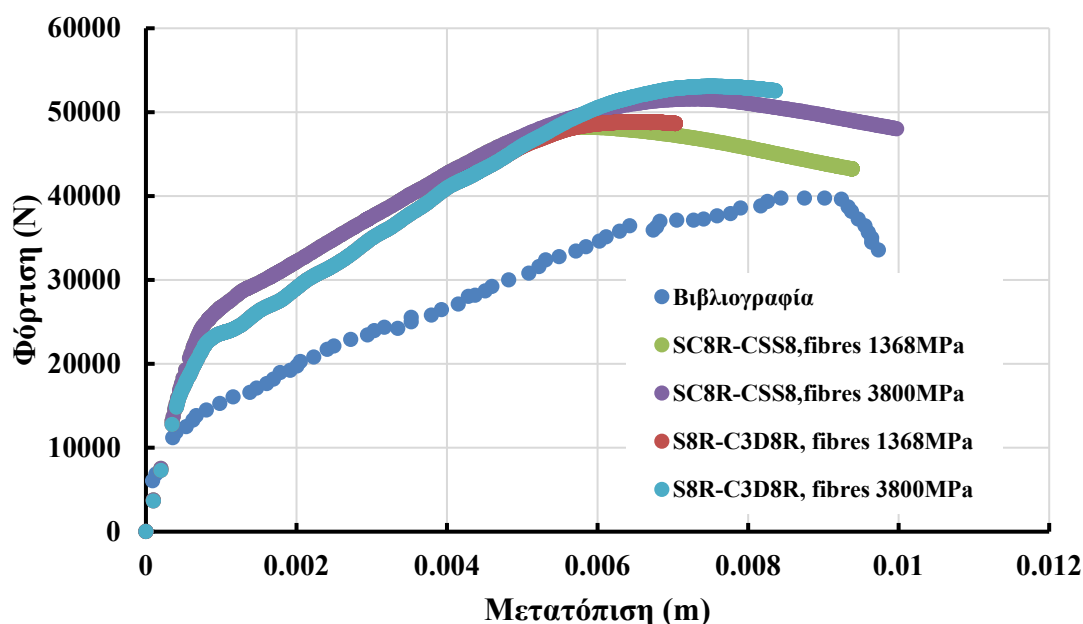


Σχ 7. 3 A),B) Καμπύλες προσομοιωμάτων A) S8R- C3D8R και

B) SC8R - CSS8 με μια στρώση ινών άνθρακα με εξεταζόμενη παράμετρο την προσομοίωση των ινών άνθρακα στα δοκίμια

Παρατηρούνται παρόμοιες συμπεριφορές στα δύο προσομοιώματα είτε αυξομειώνοντας την αντοχή των ινών είτε χρησιμοποιώντας πλέγμα ινών είτε χρησιμοποιώντας composite layer. Αυτές οι συμπεριφορές περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 5.6.

7.2 TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 1 ΣΤΡΩΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ



Σχ 7. 4 Διάγραμμα καμπυλών προσομοιωμάτων S8R- C3D8R και SC8R - CSS8 με μια στρώση ινών άνθρακα με διπλάσιο πάχος τοίχου

Από το Σχ 7. 4 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

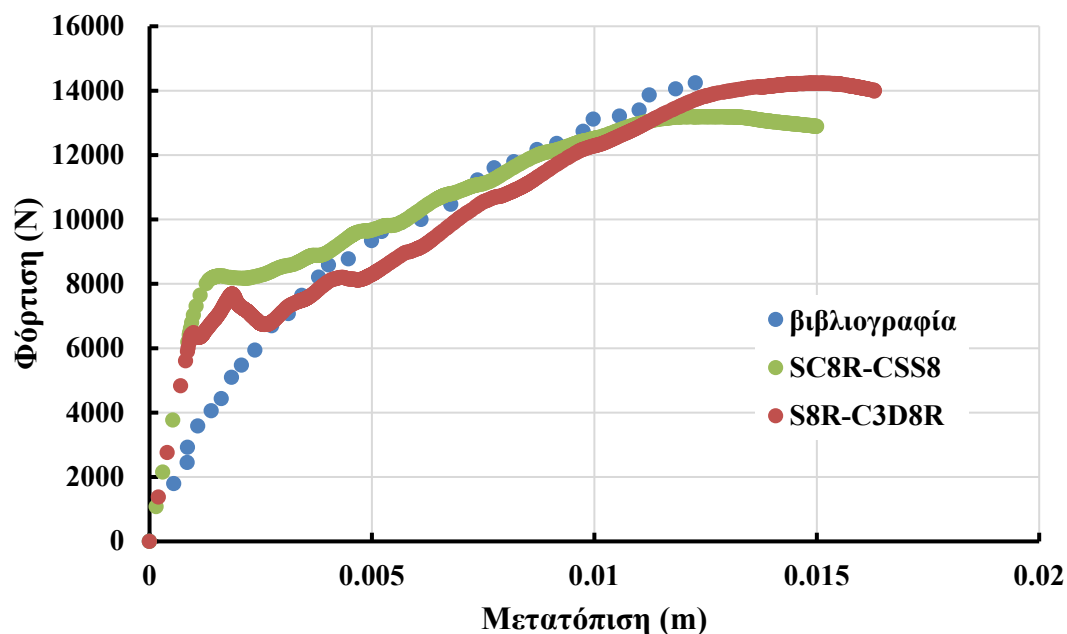
A) Για αντοχή ινών 1368MPa οι καμπύλες S8R- C3D8R και SC8R - CSS8 συγκλίνουν περισσότερο ως μορφή και τιμές φόρτισης σε σχέση με αντοχή ινών 3800MPa.

B) Οι καμπύλες του S8R- C3D8R προσεγγίζουν περισσότερο ως μορφή την πειραματική καμπύλη, παρουσιάζουν όμως μεγαλύτερες τιμές φόρτισης σε σχέση με τις καμπύλες του SC8R - CSS8 και της πειραματικής καμπύλης.

Γ) Και στα δύο προσομοιώματα οι καμπύλες τους παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από την πειραματική καμπύλη. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή έχουν μεγαλύτερη ελαστική περιοχή και ως προς την κλίση της και ως προς την μετατόπιση και την αντίστοιχη φόρτιση σύμφωνα με τις οποίες ξεκινά η πλαστικοποίηση του προσομοιώματος (σημεία πρώτων

σπασιμάτων των καμπυλών, όταν ρηγματώνεται το τσιμεντοειδές) σε σχέση με την πειραματική καμπύλη.

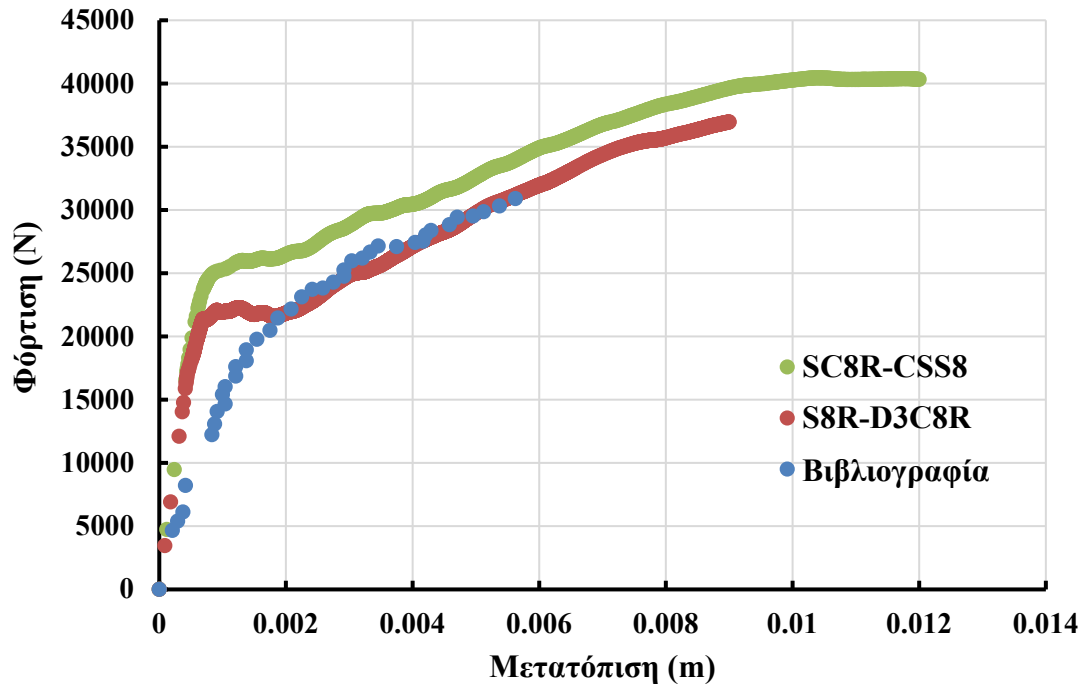
7.3 TRM ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 3 ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΜΟΝΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ



Σχ 7. 5 Διάγραμμα καμπυλών προσομοιωμάτων S8R- C3D8R και SC8R - CSS8 με 3 στρώσεις ινών γυαλί με μονό πάχος τοίχου

Από το Σχ 7. 5 παρατηρείται ότι και οι δύο καμπύλες των προσομοιωμάτων συγκλίνουν ικανοποιητικά με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη ως προς την μορφή και τις τιμές. Περισσότερο συγκλίνει και σε μορφή και σε τιμές φόρτισης η καμπύλη S8R-C3D8R. Μια διαφορά που παρατηρείται είναι ότι η μέγιστη φόρτιση του προσομοιώματος SC8R-CSS8 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της πειραματικής καμπύλης ($13190N < 14245.28N$), σε αντίθεση με το S8R-C3D8R όπου $14230.2 \approx 14245.28$ (ενότητα 6.2). Ο λόγος της μέγιστης φόρτισης του SC8R-CSS8 προς την αντίστοιχη μέγιστη για το πείραμα είναι: $\frac{13190N}{14245.28N} = 0.926 < 0.999$ του S8R-C3D8R στην ενότητα 6.2, κάτι που επιβεβαιώνει την καλύτερη προσέγγιση του συγκεκριμένου ενισχυμένου δοκιμίου με το αντίστοιχο προσομοίωμα S8R-C3D8R.

7.4 ΤΡΜ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ 3 ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ



Σχ 7. 6 Διάγραμμα καμπυλών προσομοιωμάτων S8R- C3D8R και SC8R - CSS8 με 3 στρώσεις ινών από γυαλί με διπλό πάχος τοίχου

Από το Σχ 7. 6 συμπεραίνεται ότι καλύτερο προσομοίωμα αποτελεί το S8R-D3C8R επειδή η αντίστοιχη καμπύλη συγκλίνει περισσότερο ως προς την μορφή με την πειραματική καμπύλη αλλά και ως προς τις τιμές φόρτισης. Όσο αναφορά την μέγιστη τιμή φόρτισης, τόσο ως προς το μέτρο της όσο και ως προς την μετατόπιση που παρουσιάζεται, η καμπύλη του προσομοιώματος S8R-D3C8R προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική από την αντίστοιχη του SC8R-CSS8. Οι λόγοι των μέγιστων φορτίσεων της πειραματικής καμπύλης διά των προσομοιωμάτων επαληθεύουν την επιλογή S8R-D3C8R: $\frac{30895.06}{36951.4}=0.83 > \frac{30895.06}{40440.1}=0.764$

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας την μελέτη, ένα πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι καλύτερη προσομοίωση της ενίσχυσης TRM επιτυγχάνεται πρωτίστως με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων συμβατικού κελύφους S8R και δευτερευόντως με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων συνεχούς κελύφους SC8R. Από τις παραμετρικές αναλύσεις συμπεραίνεται ότι στο πεπερασμένο στοιχείο τρισδιάστατης ελαστικότητας C3D8R που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του τοιχώματος, το οποίο είναι στοιχείο τρισδιάστατης έντασης, υπερεκτιμούνται τα διατμητικά χαρακτηριστικά του τοιχώματος, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το πάχος του τοιχώματος τόσο περισσότερο να φαίνεται να αντέχει διατμητικά από την πραγματικότητα και άρα να αυξάνεται η αντοχή του. Επίσης, από τις παραμετρικές αναλύσεις παρατηρήθηκαν ότι η γωνία τριβής του τσιμεντοειδούς δεν επηρεάζει την απόκριση του προσομοιώματος, ενώ η θλιπτική αντοχή (και η εφελκυστική αντοχή) του τσιμεντοειδούς χρειάζεται να είναι από μια συγκεκριμένη τιμή και μεγαλύτερη για να λειτουργήσει ικανοποιητικά η ενίσχυση. Κρίσιμες παράμετροι για την απόκριση και το μέγεθος της αντοχής του προσομοιώματος είναι η γωνία τριβής τοιχοποιίας και η θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας. Για την προσομοίωση του πλέγματος ινών επιλέγονται οι διαμήκεις ίνες λόγω ικανοποιητικής προσέγγισης αποτελεσμάτων, λογικής (καταπόνηση στον διαμήκη άξονα) και γρήγορης και ελαφριού φόρτου ανάλυσης. Τέλος, με την σύγκριση των διαφορετικών συνδυασμών πεπερασμένων στοιχείων για την ενίσχυση και το τοίχωμα, αλλά και συγκρίνοντας αναλυτικότερα τα προσομοιώματα S8R- C3D8R και SC8R- CSS8, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι καλύτερη προσομοίωση του ενισχυμένου δοκιμίου επιτυγχάνεται για τον συνδυασμό ενίσχυσης-τοιχώματος S8R- C3D8R.

8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Υπάρχουν πολλά περιθώρια περαιτέρω έρευνας σε αυτό το πεδίο. Μια κατεύθυνση είναι να μελετηθούν και να συγκριθούν και άλλοι συνδυασμοί διακριτοποιημένων στοιχείων πέρα από τους S8R- C3D8R και SC8R - CSS8 ώστε να εξαχθούν περισσότερα και ασφαλέστερα συμπεράσματα σχετικά με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Όσο αναφορά τα προσομοιώματα

με TRM ενίσχυση, μπορεί να διερευνηθεί η χρήση και άλλου υλικού για τις ίνες της ενίσχυσης, για παράδειγμα ίνες από επικαλυμμένο βασάλτη, ώστε να εξαχθούν περισσότερα συμπεράσματα όσο αναφορά τις TRM ενισχύσεις. Τέλος, για διεύρυνση του πεδίου της μελέτης, θα μπορούσε να αλλάξει τελείως η ενίσχυση από TRM σε FRP και έτσι να συγκριθούν και οι δύο τύποι ενίσχυσης καταλήγοντας έτσι στον καλύτερο ή σε ποιους τομείς υπερέχει ο καθένας.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

F.A. Kariou, S.P. Triantafyllou, D.A. Bournas, L.N. Koutas, (2018) "Out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system", *Construction and Building Materials* 165 (2018) 769–781, www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

M. Soroush, K. Malekzadeh Fard, M. Shahravi, (2018) "Finite Element Simulation of Interlaminar and Intralaminar Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Impact", *Latin American Journal of Solids and Structures*, www.lajss.org, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Saad M. Raoof, Lampros N. Koutas, Dionysios A. Bournas, (2017) "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams", *Construction and Building Materials* 151 (2017) 279–291, www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

Aikaterini S. Genikomsou, Maria Anna Polak, (2015) "Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS", Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON, N2L 3G1, Canada, *Engineering Structures* 98 (2015) 38–48, www.elsevier.com/locate/engstruct.

Abaqus 6.11, (2011) "Abaqus/CAE User's Manual", *SIMULIA*

Κ.Ι. Τσαπρούνης, (2017) "ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΙΛΟΦΟΡΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ", Διπλωματική εργασία

Μ. Παπαδρακάκης, (2001) *Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Αθήνα: Παπασωτηρίου.