



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Επιμέλεια: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΓΟΥΛΟΔΗΜΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Ευχαριστίες</u>	3
<u>Περίληψη</u>	4
<u>Σκοπός εργασίας</u>	4
1. <u>Εισαγωγή</u>	5
1.1 <u>Εισαγωγή στην λίθινη τοιχοποιία</u>	5
2. <u>Λογισμικό SolidWorks</u>	6
2.1 <u>Εισαγωγή στο SolidWorks</u>	6
2.2 <u>Κατασκευή μοντέλου τοιχοποιίας στο SolidWorks</u>	7
3. <u>Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων</u>	8
3.1 <u>Εισαγωγή στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων</u>	8
3.2 <u>Λογισμικό Abaqus</u>	8
4. <u>Ανάλυση ελαστικής συμπεριφοράς μοντέλων τοιχοποιίας</u>	9
4.1 <u>Von Mises Yield Criterion</u>	9
4.2 <u>Γραμμική ανάλυση ελαστικής συμπεριφοράς</u>	9
4.3 <u>Συμπεράσματα γραμμικής ανάλυσης</u>	22
5. <u>Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς μοντέλων τοιχοποιίας</u>	23
5.1 <u>Μη γραμμική ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς</u>	23
5.2 <u>Συμπεράσματα διαγραμμάτων μη γραμμικής ανάλυσης</u>	44
6. <u>Βιβλιογραφία</u>	46

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι βοήθησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και πιο συγκεκριμένα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης για την ανάθεση και μετέπειτα καθοδήγηση και προθυμία που έδειξε σε όλη την διάρκεια της εργασίας καθώς βέβαια και τον υποψήφιο διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κουτσιανίτη Παναγιώτη για τον χρόνο που μου αφιέρωσε και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε στην προσπάθεια ολοκλήρωσης της συγκεκριμένης εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και ιδιαιτέρως στους γονείς μου για την συνεχή στήριξη σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την μελέτη τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων τοιχοποιίας, τα οποία έχουν αποτελέσει τεστ δοκιμών σε διάφορες έρευνες (Oliveira et al. 2006), αποτελούμενα από τρία φύλλα-στρώσεις το καθένα, με τον διαχωρισμό τους να έγκειται στο είδος της ποιότητας του γεμίσματος αλλά και στο αν ο τοίχος έχει ενισχυθεί ή όχι με δύο μεταλλικές ράβδους. Αρχικά τα μοντέλα σχεδιάστηκαν στο λογισμικό SolidWorks 2016, το οποίο αποτελεί πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD, με το κάθε μοντέλο να είναι διαστάσεων 600 x 300 x 1100 mm και να αποτελείται από τρία κομμάτια (parts), το κονίαμα, τους λίθους και τέλος το εσωτερικό γέμισμα με το καθένα να παρουσιάζει τις δικές του μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη κατηγοριοποίηση αφορά την χρησιμοποίηση είτε χαμηλής είτε υψηλής ποιότητας γεμίσματος ενώ η δεύτερη κατηγοριοποίηση αφορά στο αν η τοιχοποιία έχει ενισχυθεί ή όχι με δύο μεταλλικές ράβδους πάχους 10 mm, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε δύο θέσεις στο μέσο του μήκους και στο 1/3 και 2/3 του ύψους του τοίχου. Επίσης τα δύο εξωτερικά φύλλα απαρτίζονται από λίθους διαστάσεων 150-250 mm τόσο σε μήκος όσο και σε πλάτος και πάχους 100 mm ενώ το εσωτερικό γέμισμα είναι διαστάσεων 600 x 100 x 1100 mm. Εν συνεχεία τα μοντέλα εισήχθησαν στο λογισμικό Abaqus 2012, το οποίο αποτελεί πρόγραμμα υποβοηθούμενης μηχανικής CAE, όπου και έγινε χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη καταπόνησης των μοντέλων και σύγκρισης μεταξύ τους ιδιαιτέρως όσον αφορά τις τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται αλλά και τις μετατοπίσεις και την πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων των τοίχων, όταν ενώ είναι πακτωμένοι στη βάση τους, τους ασκήσουμε πίεση στο επάνω μέρος τους ίση με 10 N/mm².

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στη λίθινη τοιχοποιία

Η τυπολογία πολλαπλών φύλλων και ιδιαίτερα η τρίστρωτη τοιχοποιία είναι πολύ συνηθισμένη στις κατασκευές τοιχοποιίας με ιστορική σημασία που συναντώνται στα αστικά κέντρα της Ευρώπης και ιδιαίτερα οι πέτρινοι τοίχοι τριών φύλλων. Οι πέτρινοι τοίχοι της τρίστρωτης τοιχοποιίας αποτελούνται από δύο εξωτερικές στρώσεις λιθοδομής, χρησιμοποιώντας την πέτρα της περιοχής που βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία και με χρήση μιας χαμηλής ποιότητας κονιάματος. Το εσωτερικό φύλλο αποτελείται συνήθως από μια πλήρωση ενός πολύ λεπτού υλικού (όπως χώμα ή υπολείμματα κατασκευών), που χαρακτηρίζονται από μια σημαντική παρουσία κενών (Binda et al. 1999).

Η κατάρρευση αυτού του είδους των τοίχων χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό μηχανισμών εύθραυστης κατάρρευσης, οι οποίοι συμβαίνουν κυρίως λόγω της απόσπασης των εξωτερικών φύλλων και της αποκόλλησης υλικών, και στις δύο περιπτώσεις υπό συνθήκες φόρτισης με συμπίεση και φόρτισης με συμπίεση διάτμησης (Valluzzi et al. 2004, Anzani et al. 2004). Για να διατηρήσουμε αυτές τις κατασκευές και να αποφύγουμε την συνεχιζόμενη υποβάθμιση τους, συχνά είναι απαραίτητα έργα επέμβασης.

Ωστόσο, δεδομένης της πολιτιστικής και ιστορικής τους σημασίας, τέτοιου είδους παρεμβάσεις πρέπει να τηρούν ορισμένες προϋποθέσεις, όπως η χρήση υλικών τα οποία είναι μηχανικώς, φυσικώς και χημικώς συμβατά με τα πρωτότυπα για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα και η ανθεκτικότητα των παρεμβάσεων ενίσχυσης και αποκατάστασης, βλέπε Modena (1997), ICOMOS (2001) και Binda (2006) για περισσότερες λεπτομέρειες. Όταν αυτές οι συστάσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν, τα έργα που εκτελούνται μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες και αναποτελεσματικές παρεμβάσεις (Binda 2006). Τις περισσότερες φορές, αυτά τα προβλήματα σχετίζονται με την έλλειψη γνώσης σχετικά με το υλικό και τη συμπεριφορά της κατασκευής, η οποία πρέπει να είναι βασισμένη σε εκτεταμένη έρευνα. [1]

2. Λογισμικό SolidWorks

2.1 Εισαγωγή στο SolidWorks

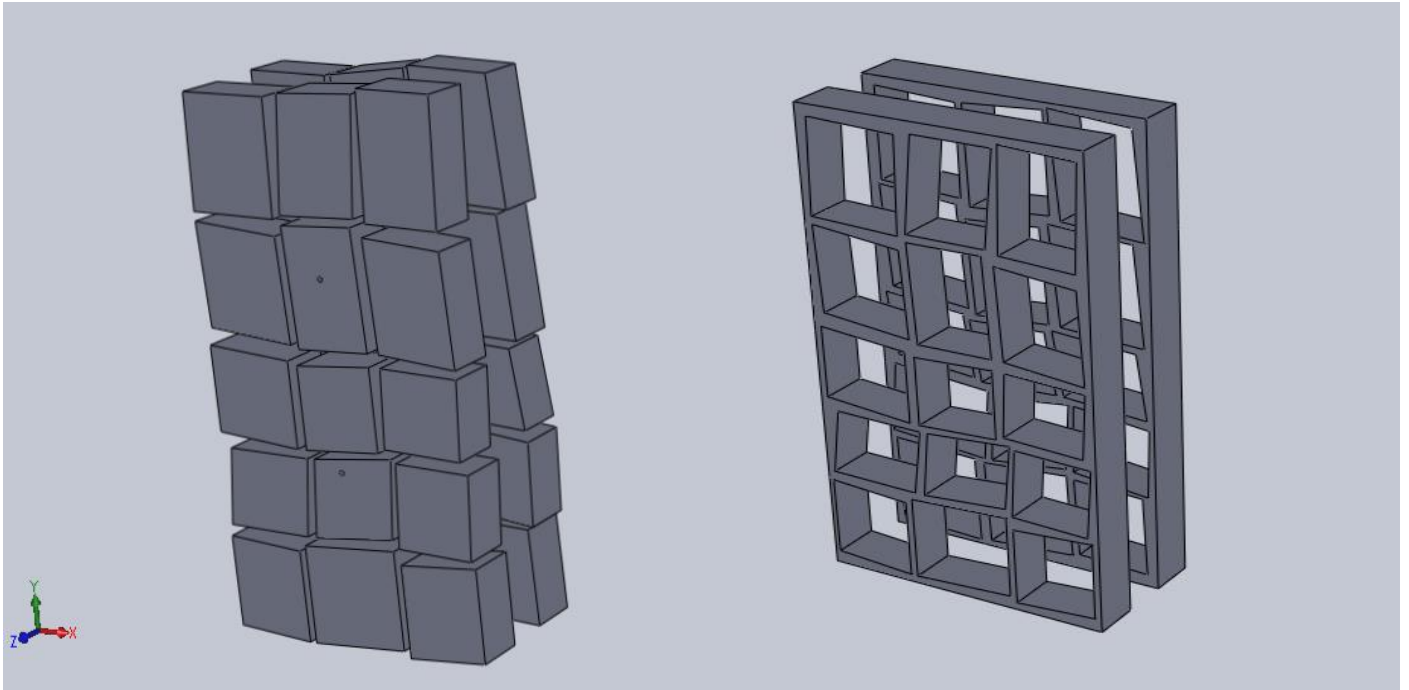
Το SolidWorks είναι ένα πρόγραμμα σχεδίασης (CAD) αλλά και πρόγραμμα υποβοηθούμενης μηχανικής (CAE) το οποίο τρέχει στα Microsoft Windows και δημοσιεύεται από τη Dassault Systèmes. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένας σταθερός μοντελοποιητής ο οποίος χρησιμοποιεί μια παραμετρική προσέγγιση βασισμένη σε χαρακτηριστικά που αρχικά αναπτύχθηκαν από την PTC (Creo / Pro-Engineer) με σκοπό τη δημιουργία μοντέλων και συναρμολογήσεων μοντέλων, με το λογισμικό να είναι γραμμένο σε Parasolid-kernel.

Οι παράμετροι (parameters) που χρησιμοποιούνται αφορούν περιορισμούς των οποίων οι τιμές καθορίζουν το σχήμα ή τη γεωμετρία του μοντέλου ή της συναρμολόγησης. Ακόμη οι παράμετροι μπορούν να είναι είτε αριθμητικές, όπως μήκη γραμμών ή διάμετροι κύκλων, είτε γεωμετρικές, όπως εφαπτομένη, παράλληλη, ομόκεντρη, οριζόντια ή κάθετη κ.λπ.

Τα χαρακτηριστικά (features) αναφέρονται στις δομικές μονάδες του τμήματος (part). Ουσιαστικά είναι τα σχήματα και οι λειτουργίες που κατασκευάζουν το part. Τα χαρακτηριστικά που είναι βασισμένα σε κάποιο σχήμα ξεκινούν συνήθως με ένα σκίτσο 2D ή 3D με σχήματα όπως τρύπες, σχισμές κλπ. Αυτό το σχήμα μετέπειτα εξωθείται ή κόβεται για να προστεθεί ή να αφαιρεθεί υλικό από το τμήμα. Τα χαρακτηριστικά που βασίζονται στις λειτουργίες δεν βασίζονται σε σκίτσο και περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως φιλέτα (fillet) και λοξοτομές (chamfer). [6]

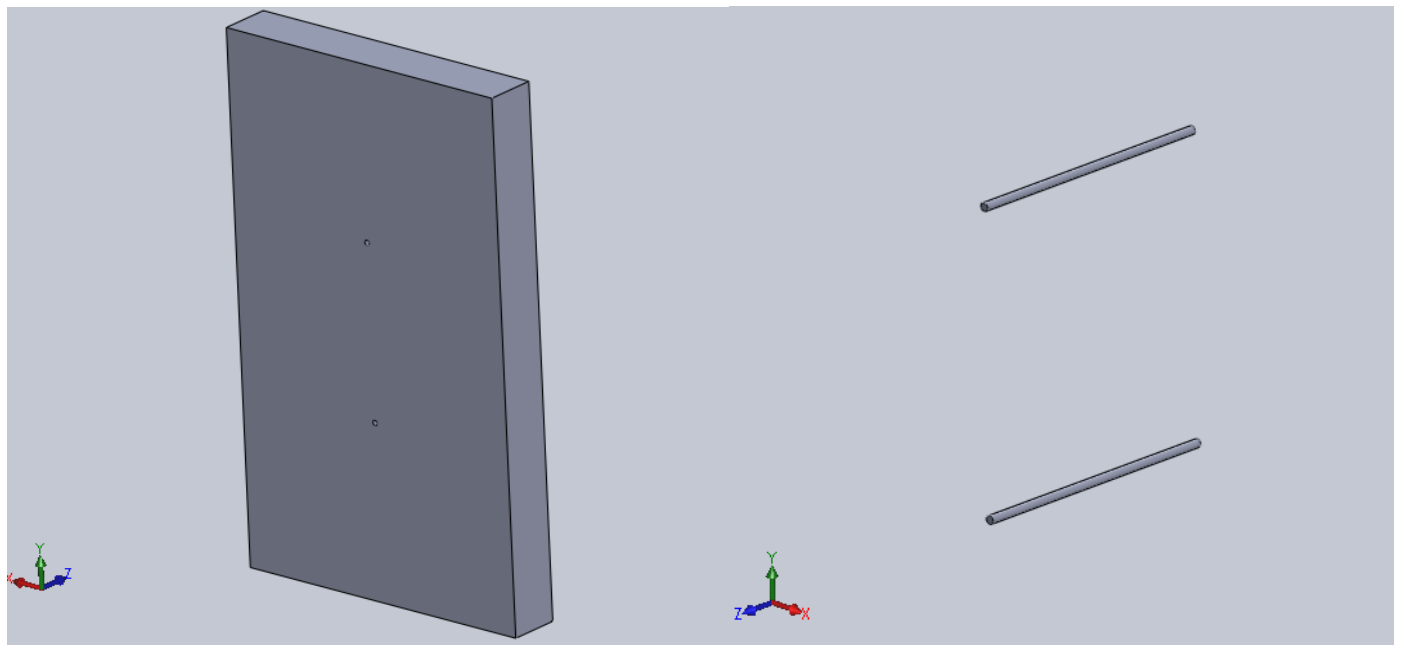
2.2 Κατασκευή μοντέλου τοιχοποιίας στο SolidWorks

Παρακάτω φαίνονται τα parts από τα οποία αποτελείται η τοιχοποιία όπως αυτά δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα SolidWorks.



Εικόνα 1: Λίθοι

Εικόνα 2: Κονίαμα



Εικόνα 3: Γέμισμα

Εικόνα 4: Μεταλλικές ράβδοι

3. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο του μηχανικού για την αριθμητική επίλυση ενός εκτεταμένου φάσματος προβλημάτων. Οι εφαρμογές της μεθόδου εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, πλοία, σε κτίρια και γέφυρες, έως την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών και αερίων, μαγνητικής ροής, υπόγειας ροής αλλά και άλλων προβλημάτων ροής. Με την πάροδο των χρόνων η εξέλιξη των Η/Υ και των συστημάτων σχεδίασης CAD, περίπλοκα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν αρκετά εύκολα. Διάφορες εναλλακτικές συνθήκες μπορούν να δοκιμαστούν στον Η/Υ πριν καν κατασκευαστεί το πρωτότυπο τους.

Όλα τα παραπάνω υποδεικνύουν την ανάγκη που υπάρχει να μένουμε κοντά στις εξελίξεις, κατανοώντας τη βασική θεωρία, τις τεχνικές μοντελοποίησης και τις υπολογιστικές έννοιες της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Με αυτή τη μέθοδο ανάλυσης είναι δυνατόν, μια περίπλοκη περιοχή, που ορίζει ένα συνεχές, να διακριτοποιηθεί σε διακριτά τμήματα πεπερασμένου μεγέθους, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Οι θεωρήσεις των ιδιοτήτων των υλικών και οι σχέσεις που τα διέπουν γίνεται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων αυτών. Στη συνέχεια μια διαδικασία σύνθεσης, η οποία αναλόγως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς που επιβάλλονται, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων η λύση των οποίων παρέχει την συμπεριφορά του συνεχούς. [4]

3.2 Λογισμικό Abaqus

Το Abaqus είναι ένα σύνολο ισχυρών προγραμμάτων προσομοίωσης για μηχανικούς, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη δυνατότητα να λύσει προβλήματα που κυμαίνονται από σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις έως τις πιο δύσκολες μη γραμμικές προσομοιώσεις. Ακόμη περιέχει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων που μπορούν να μοντελοποιήσουν σχεδόν οποιαδήποτε γεωμετρία. Έχει έναν εξίσου εκτεταμένο κατάλογο υλικών μοντέλων που μπορούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των πιο κλασσικών μηχανικών υλικών όπως μέταλλα, καουτσούκ, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα και άλλα.

Σχεδιασμένο ως γενικό εργαλείο προσομοίωσης, το Abaqus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετήσει όχι μόνο απλά δομικά προβλήματα (τάσεων / μετατοπίσεων) αλλά είναι ικανό να προσομοιώσει προβλήματα σε διάφορους τομείς, όπως διάχυση της μάζας, η μεταφορά θερμότητας, η θερμική διαχείριση ηλεκτρικών εξαρτημάτων (συζευγμένες θερμικές ηλεκτρικές αναλύσεις), μηχανική του εδάφους, πιεζοηλεκτρική ανάλυση, ηλεκτρομαγνητική ανάλυση και δυναμική ρευστού. Το Abaqus προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων για την προσομοίωση γραμμικών και μη γραμμικών εφαρμογών όπου επιλέγει αυτόματα τις κατάλληλες αυξήσεις φορτίου και τις ανοχές σύγκλισης και τις προσαρμόζει ανάλογα συνεχώς κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, ώστε να διασφαλίζεται μία αποτελεσματική λύση. [7]

4. Ανάλυση ελαστικής συμπεριφοράς μοντέλων τοιχοποιίας

4.1 Von Mises Yield Criterion

Στην επιστήμη των υλικών και στη μηχανική, το κριτήριο διαρροής Von Mises μπορεί επίσης να διατυπωθεί με όρους της τάσης Von Mises ή της ισοδύναμης εφελκυστικής τάσης σ_u . Αυτή είναι μια κλίμακα της τάσης που μπορεί να υπολογιστεί από τον τανυστή τάσης Cauchy. Σε αυτή την περίπτωση, ένα υλικό λέγεται ότι αρχίζει να διαρρέει όταν η τάση Von Mises φτάσει σε μια τιμή γνωστή ως τάση διαρροής, σ_y . Η τάση Von Mises χρησιμοποιείται για να προβλεφθεί η διαρροή των υλικών υπό συνθήκες πολύπλοκης φόρτισης που προκύπτει από τα αποτελέσματα μονοαξονικών δοκιμών εφελκυσμού. Τέλος η τάση Von Mises ικανοποιεί την ιδιότητα ότι δύο καταστάσεις οι οποίες βρίσκονται υπό πίεση με ίση ενέργεια παραμόρφωσης έχουν ίση τάση Von Mises. [9]

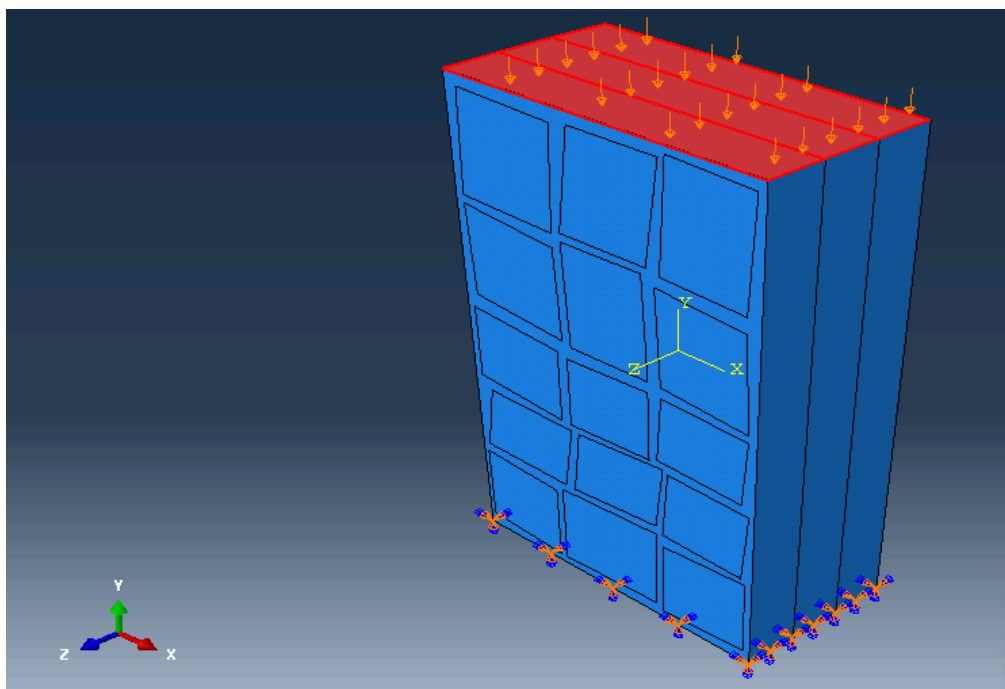
4.2 Γραμμική ανάλυση ελαστικής συμπεριφοράς

Ιδιότητες υλικών τοιχοποιίας

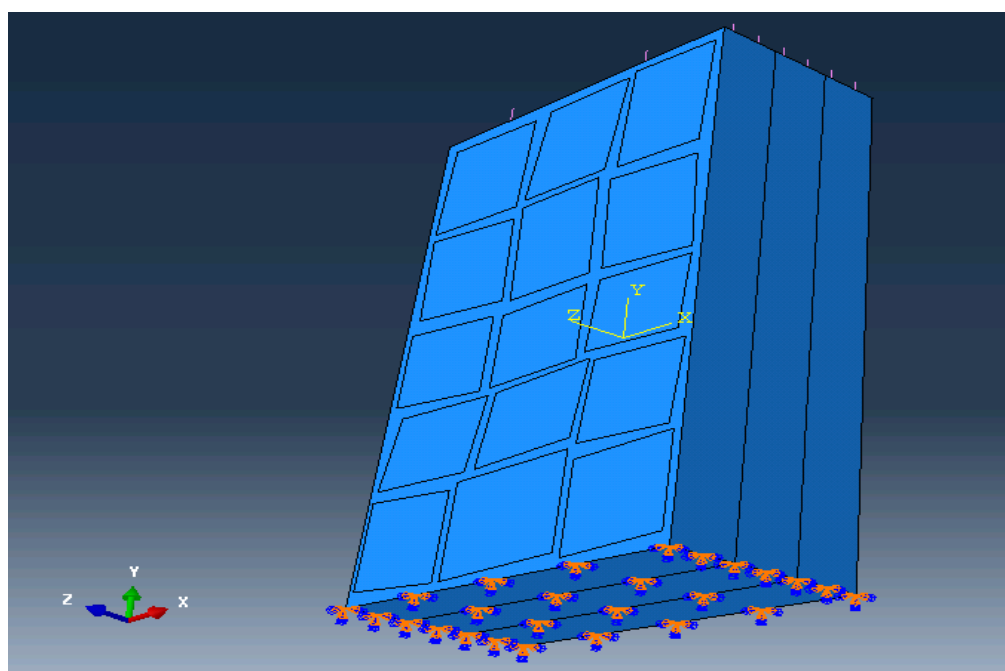
	Young's Modulus (N/mm ²)	Poisson's ratio	Compressive Stress (N/mm ²)	Tensile Stress (N/mm ²)
Χαμηλή ποιότητα γεμίσματος	10 ³	0.3	0.3	0.0333
Υψηλή ποιότητα γεμίσματος	3x10 ³	0.3	4.1	0.4556
Λίθοι	20.6x10 ³	0.24	52.2	5.8
Κονίαμα	20.6x10 ³	0.24	2.2	0.2444

Καταπόνηση της τοιχοποιίας και συνοριακές συνθήκες

Η τοιχοποιία καταπονείται στο επάνω τοίχωμα με πίεση 10 N/mm² και είναι πακτωμένη στην βάση της όπως φαίνεται στις δύο παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 5: Άσκηση πίεσης 10 N/mm^2 στο επάνω μέρος της τοιχοποιίας

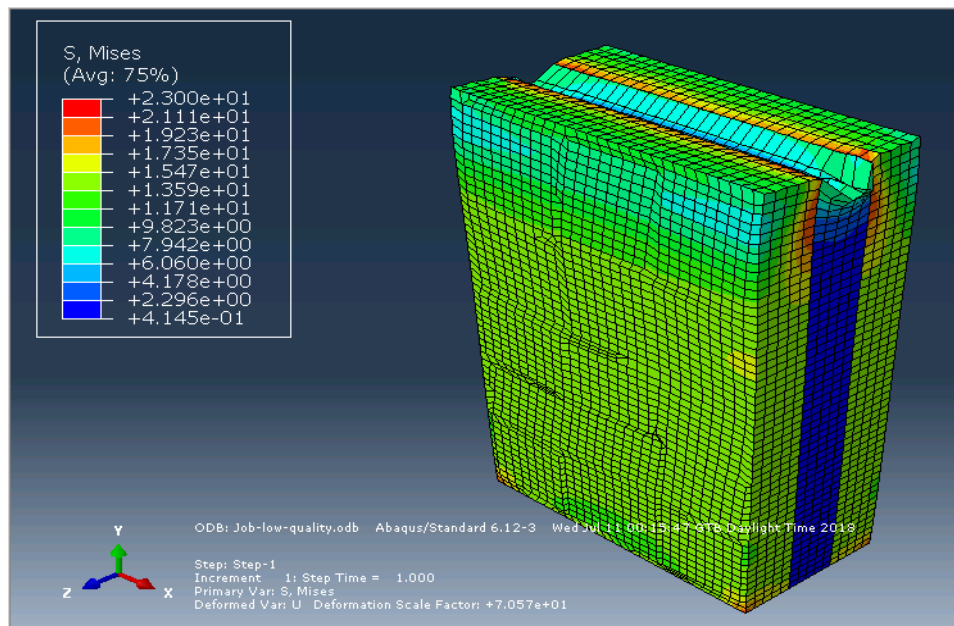


Εικόνα 6: Εφαρμογή πάκτωσης στο κάτω μέρος της τοιχοποιίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ελαστικότητας των τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων τοίχου όσον αφορά τις τάσεις Von Mises και τις μετατοπίσεις U.

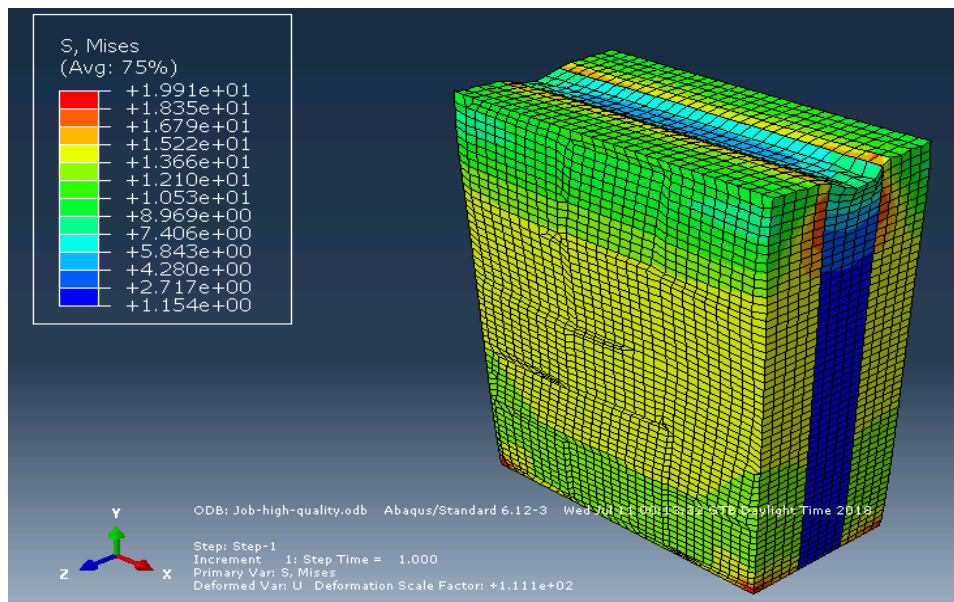
❖ Τάσεις - Von Mises Stress

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



Εικόνα 7: Κατανομή τάσεων Von Mises στην τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

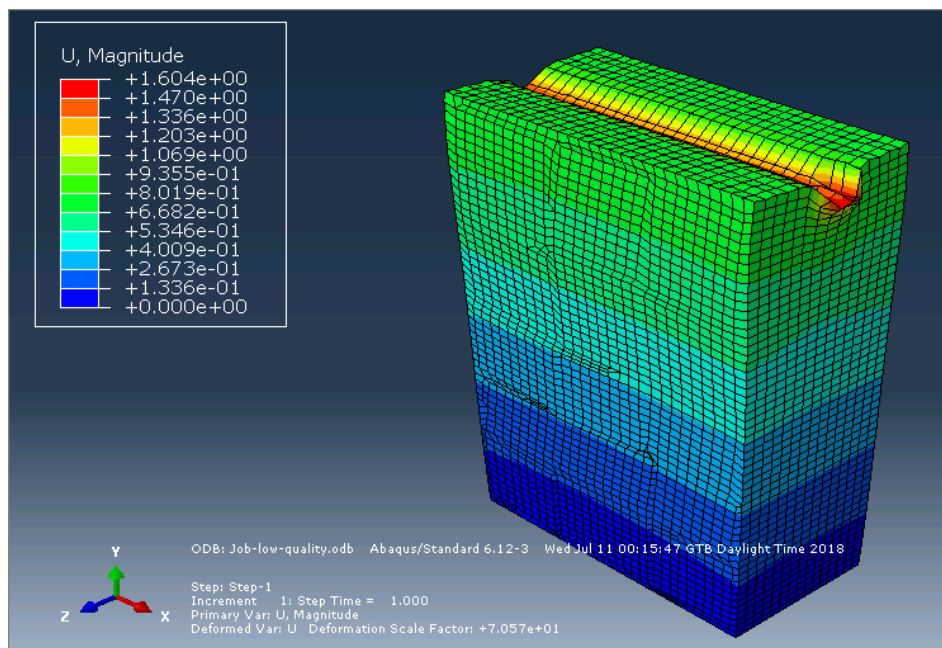


Εικόνα 8: Κατανομή τάσεων Von Mises στην τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται πως οι μεγαλύτερες τάσεις Von Mises (περίπου 20 MPa) ασκούνται στα άκρα της βάσης της τοιχοποιίας (όπου εφαρμόζεται πάκτωση) καθώς επίσης και στα άκρα του μήκους του γεμίματος στο επάνω μέρος του τοίχου όπου και ασκείται η σταδιακά επιβαλλόμενη πίεση, με αποτέλεσμα να έχουμε υποχώρηση του γεμίματος. Συγκρίνοντας τις δύο διαφορετικές ποιότητες γεμίματος παρατηρούμε ότι με το ενισχυμένο γέμισμα καταφέραμε να μειώσουμε τις τάσεις παραμόρφωσης στα σημεία ένωσης του γεμίματος με το κονίαμα αλλά αυξήθηκαν στις γωνίες της βάσης του τοίχου. Τέλος στις παραμορφώσεις στα εξωτερικά τοιχώματα (όπου εδράζονται οι λίθοι) δεν φαίνεται να σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές.

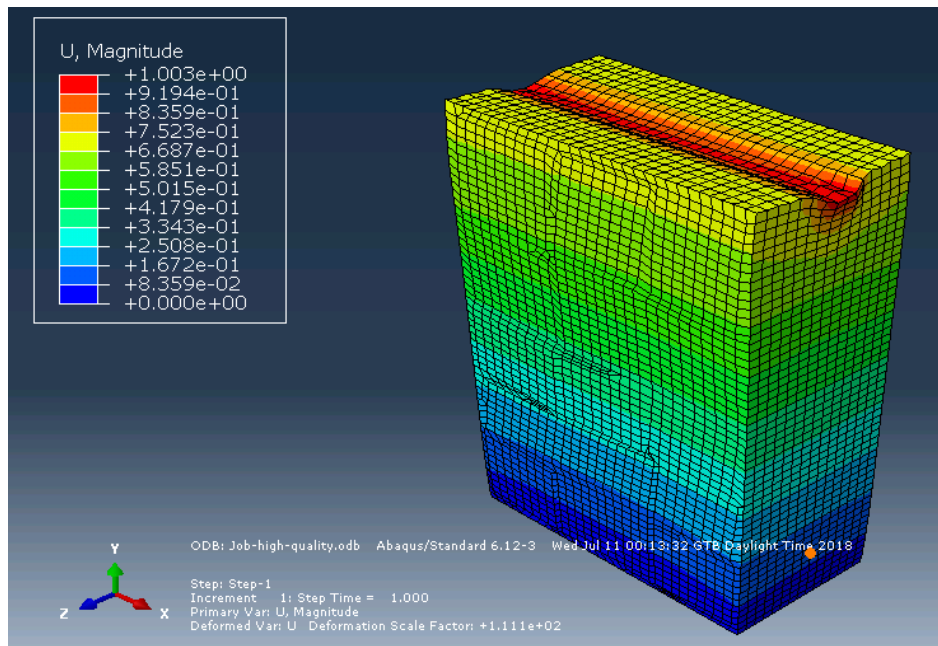
❖ Μετατοπίσεις - U

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



Εικόνα 9: Κατανομή μετατοπίσεων στην τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίματος

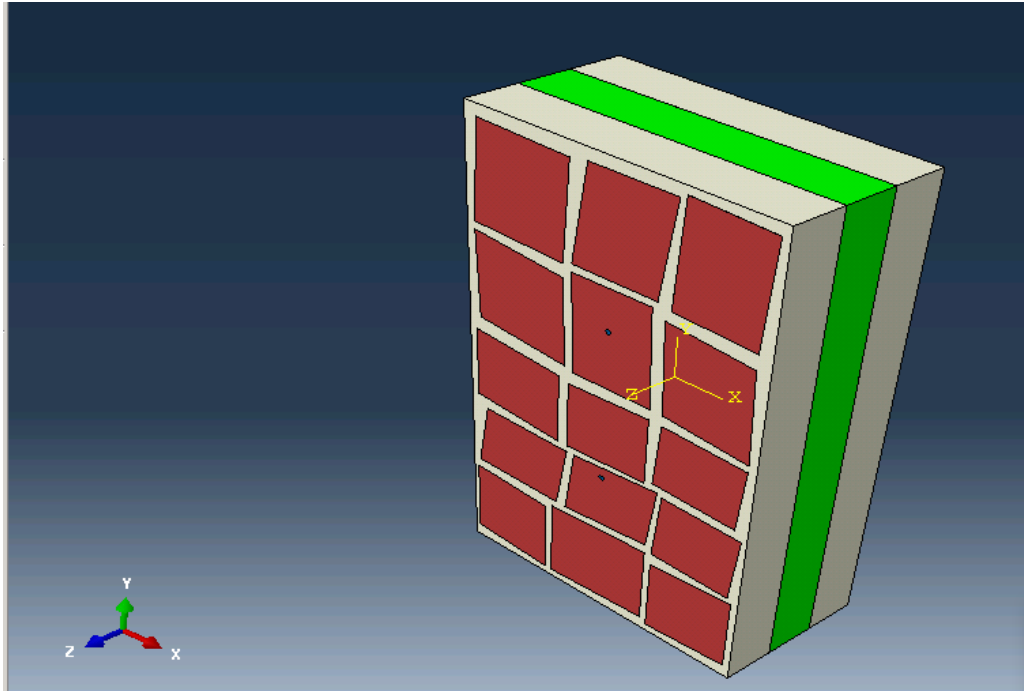
➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



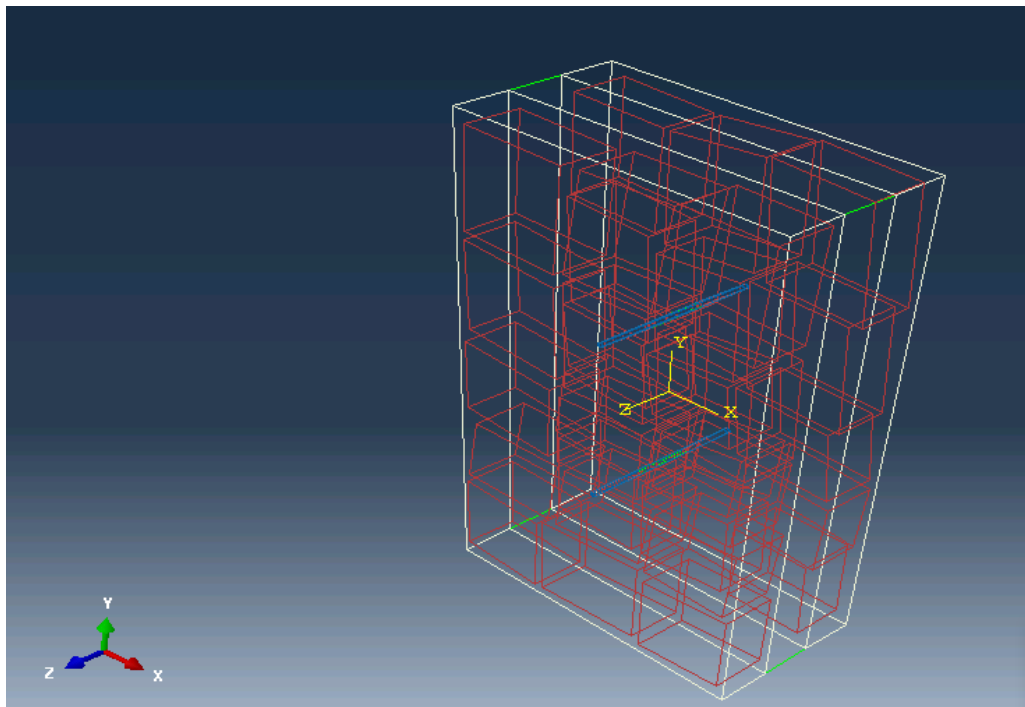
Εικόνα 10: Κατανομή μετατοπίσεων στην τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις φαίνεται πως στην τοιχοποιία με γέμισμα χαμηλής ποιότητας οι τιμές των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες σε όλη την τοιχοποιία και ειδικότερα στο κεντρικό τμήμα του γεμίσματος στο επάνω μέρος του όπου και ασκείται η σταδιακά επιβαλλόμενη πίεση, βλέπουμε ότι στο γέμισμα χαμηλής ποιότητας έχουμε μεγαλύτερη μέγιστη μετατόπιση 1.6 mm αντί για 1 mm περίπου που έχουμε στο ενισχυμένο γέμισμα. Αντιθέτως παρατηρούμε ότι στο ενισχυμένο γέμισμα έχουμε μεγαλύτερη ζώνη μετατόπισης, δηλαδή η μετατόπιση πραγματοποιείται σε όλο σχεδόν το πάχος του γεμίσματος ενώ στο γέμισμα χαμηλής ποιότητας περιορίζεται στο υποδιπλάσιο πάχος.

Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στην ενίσχυση της τοιχοποιίας με χρήση 2 μεταλλικών ράβδων (*Young's Modulus* $210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, *Poisson's ratio* 0.15, *Yield Stress* 600 N/mm^2 , *Tensile Stress* 820 N/mm^2) στις θέσεις $1/3$ και $2/3$ του ύψους του τοίχου και στο μέσο του μήκους του όπως φαίνεται στις δύο επόμενες εικόνες.



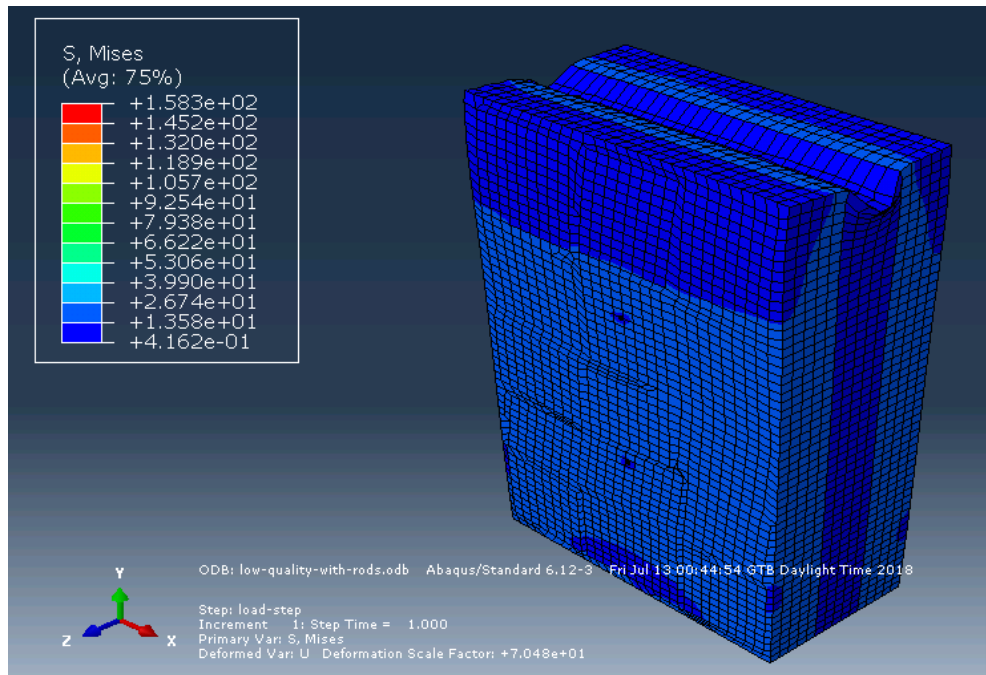
Εικόνα 11: Μοντέλο τοιχοποιίας μετά την χρήση των δύο μεταλλικών ράβδων (shaded)



Εικόνα 12: Μοντέλο τοιχοποιίας μετά την χρήση των δύο μεταλλικών ράβδων (wireframe embedded rods)

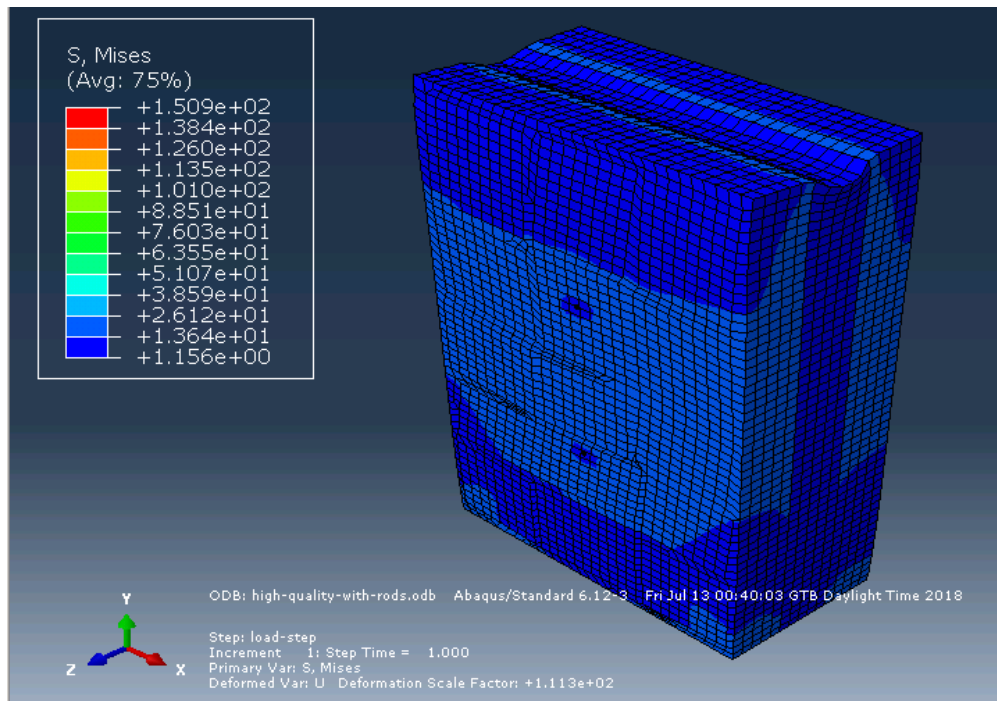
❖ Τάσεις - Von Mises Stress (Ενισχυμένες Τοιχοποιίες)

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



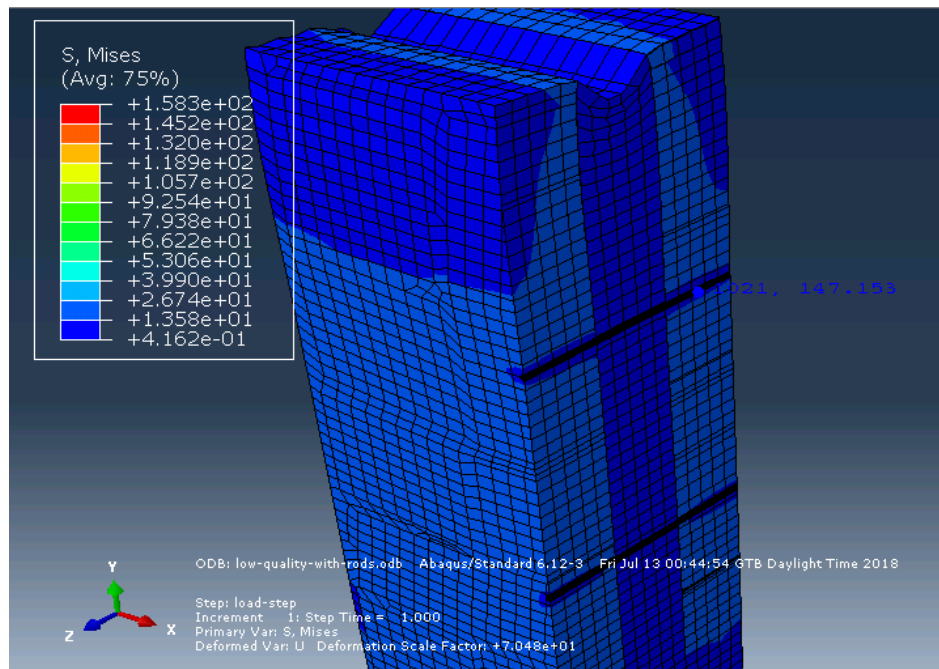
Εικόνα 13: Κατανομή τάσεων Von Mises στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

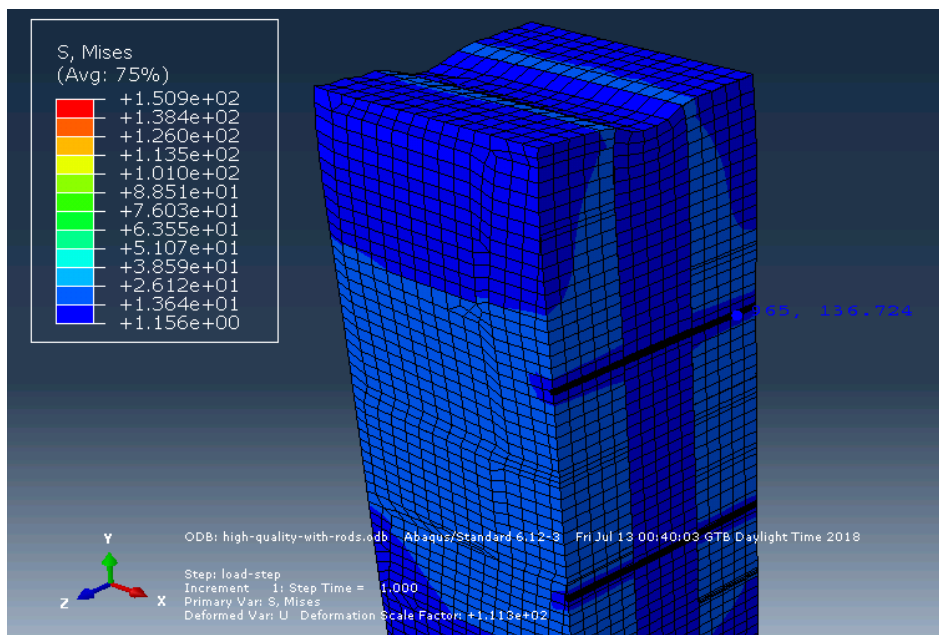


Εικόνα 14: Κατανομή τάσεων Von Mises στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

Στις παραπάνω εικόνες συγκρίνοντας τις τάσεις Von Mises παρατηρούμε ότι έχουμε παρόμοια κατανομή τάσεων στις τοιχοποιίες (με μικρές διαφορές που εντοπίζονται στη βάση των τοίχων) με υποχώρηση του γεμίσματος και τιμές στα εξωτερικά τοιχώματα από 0.4 MPa – 39 MPa στο χαμηλής ποιότητας γέμισμα και 1.2 MPa – 38.6 MPa στο ενισχυμένο γέμισμα. Μελετώντας και συγκρίνοντας τις μέγιστες τιμές των μοντέλων και στις δύο περιπτώσεις φαίνεται πως η επάνω μεταλλική ράβδος έχει απορροφήσει τις περισσότερες τάσεις με την μέγιστη τιμή στο χαμηλής ποιότητας γέμισμα να φτάνει τα 158 MPa ενώ στο ενισχυμένο γέμισμα αυτή η τιμή πέφτει στα 151 MPa. (φαίνονται στις δύο επόμενες εικόνες τα σημεία εφαρμογής των μέγιστων τάσεων με την μπλε κουκίδα στο δεξί μέρος της ράβδου).



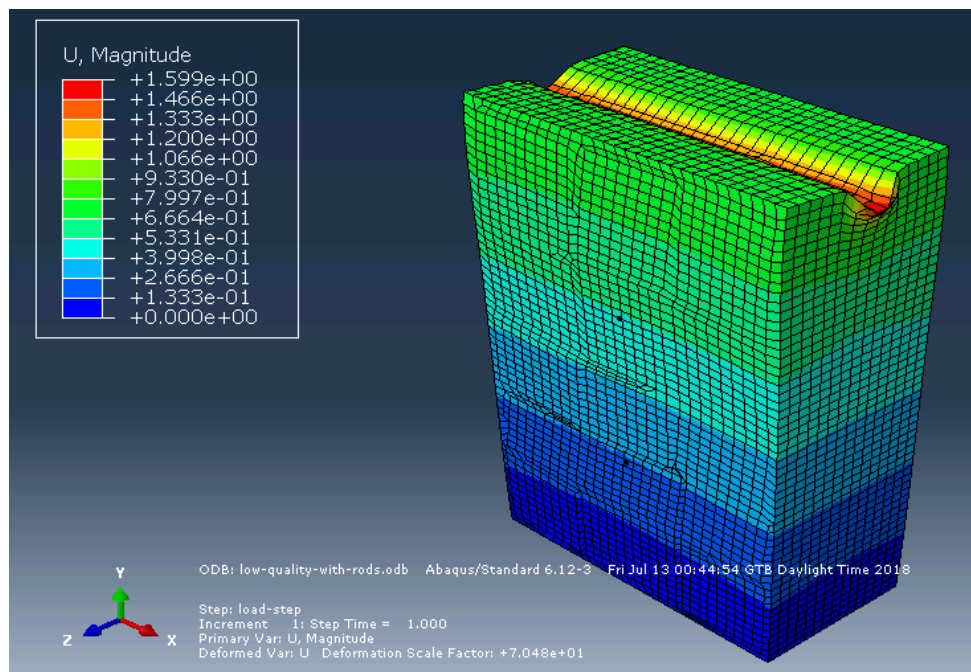
Εικόνα 15: Μέγιστες τάσεις Von Mises στο χαμηλής ποιότητας γέμισμα



Εικόνα 16: Μέγιστες τάσεις Von Mises στο υψηλής ποιότητας γέμισμα

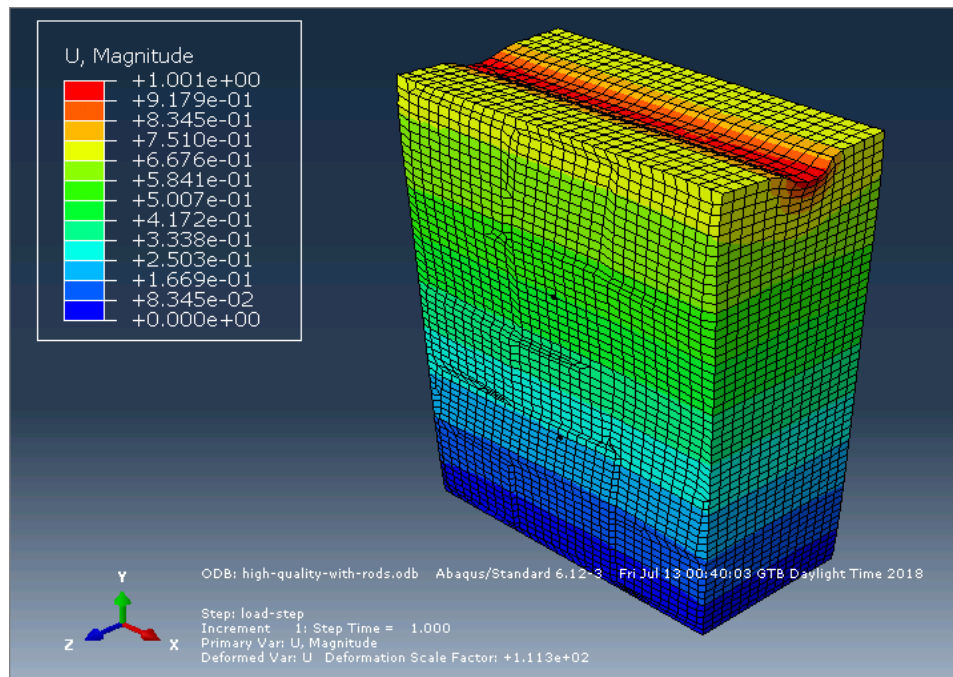
❖ Μετατοπίσεις - U

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



Εικόνα 17 : Κατανομή μετατοπίσεων στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



Εικόνα 18 : Κατανομή μετατοπίσεων στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

Συγκρίνοντας τις παραπάνω εικόνες βλέπουμε πως και οι μετατοπίσεις όπως και οι τάσεις προηγουμένως, είναι παρόμοιες στα εξωτερικά τοιχώματα όμως υπάρχουν εμφανείς διαφορές όσον αφορά την παραμόρφωση του γεμίματος καθώς είναι μεγαλύτερη στο ενισχυμένο γέμισμα και εκτείνεται σε όλο το πάχος και μήκος του, αλλά με μικρότερη μέγιστη τιμή 1mm. Αντιθέτως στο χαμηλής ποιότητας γέμισμα το πάχος των μετατοπίσεων μειώνεται περίπου στο μισό συγκλίνοντας προς το κέντρο της κατασκευής αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή της τάξεως των 1.6 mm.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι διαφορές που παρατηρήθηκαν σε κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις ανάλυσης (ανάλογα το είδος γεμίματος και αν εξετάζουμε τάσεις ή μετατοπίσεις) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα πριν αλλά και μετά την τοποθέτηση των δύο μεταλλικών ράβδων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ (ΤΑΣΕΙΣ VON MISES)

Είναι φανερό ότι με τη χρήση των μεταλλικών ράβδων οι τάσεις στα εξωτερικά τοιχώματα έχουν αυξηθεί κατά πολύ από 10 MPa - 17 MPa στα 40 MPa, όπως επίσης και στο γέμισμα με τιμές 26 MPa – 40 MPa από 7.5 MPa - 15 MPa. Το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων όμως έχει απορροφηθεί από τις ράβδους με την επάνω ράβδο να καταπονείται αρκετά περισσότερο από την δεύτερη στο κάτω μέρος αφού εκεί σημειώνεται η μέγιστη τιμή των 158 MPa ενώ πριν την τοποθέτηση των ράβδων οι μέγιστες τάσεις συγκεντρώνονταν στο εξωτερικό πάνω μέρος του γεμίματος και στην βάση της τοιχοποιίας με τιμή 23 MPa. Τέλος κοινό σημείο των δύο αυτών μοντέλων είναι ότι το γέμισμα φαίνεται να μην αλλάζει τιμές σε όλο σχεδόν το ύψος του παραμένοντας στα 0.42 MPa.

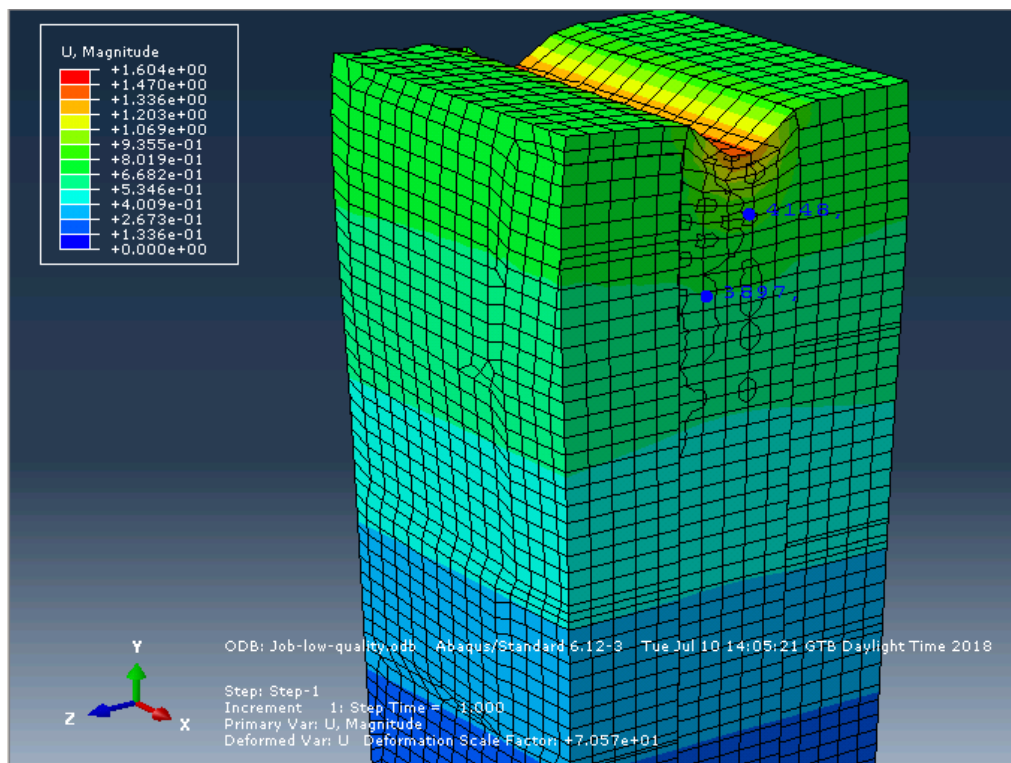
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ (ΤΑΣΕΙΣ VON MISES)

Όπως και στην προηγούμενη σύγκριση οι τάσεις Von Mises από τα εξωτερικά τοιχώματα και το επάνω μέρος του γεμίματος μεταφέρονται κυρίως στην ράβδο που είναι τοποθετημένη στα 2/3 του ύψους του τοίχου με μέγιστη τιμή 151 MPa ενώ πριν την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων η μέγιστη τιμή εντοπιζόταν στο εξωτερικό επάνω αλλά και πλάγιο μέρος του γεμίματος και στην βάση της κατασκευής. Επιπροσθέτως, τα τοιχώματα καταπονούνται περισσότερο με τιμές από 1.16 MPa - 40 MPa, ενώ προηγουμένως οι τιμές ήταν μεταξύ 7.5 MPa και 18 MPa και το γέμισμα

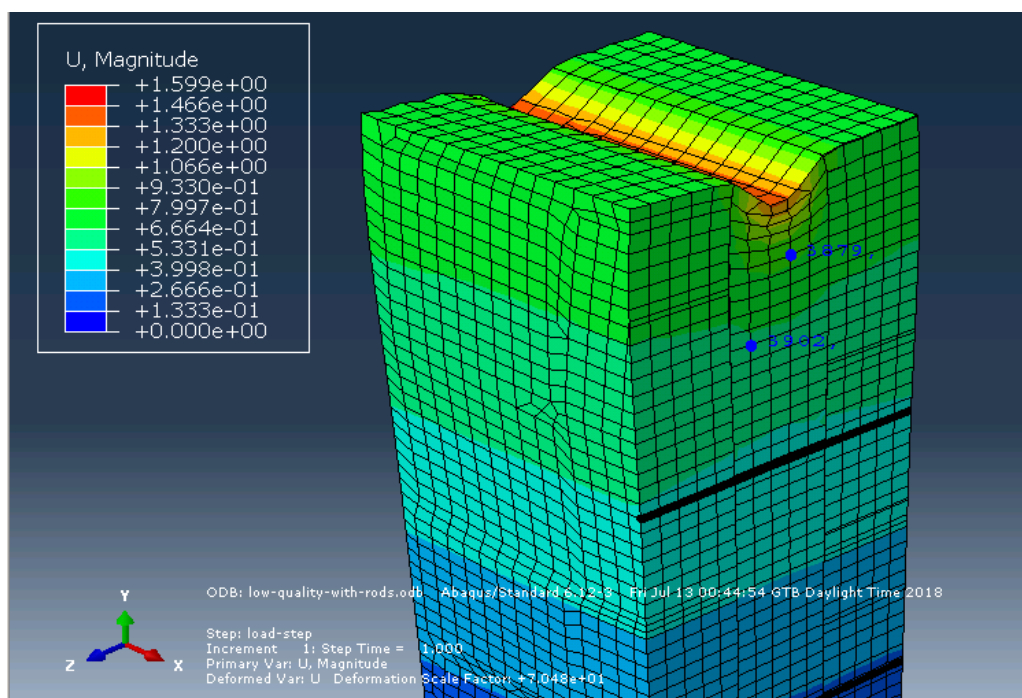
παραμένει ανεπηρέαστο, στο μεγαλύτερο μέρος του ύψους του, από τη χρήση των ράβδων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ (ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ - U)

Συγκρίνοντας τις μετατοπίσεις U φαίνεται πως στα εξωτερικά τοιχώματα της κατασκευής δεν συμβαίνουν κάποιες αλλαγές μετά τη χρήση των δύο μεταλλικών ράβδων τόσο στην κατανομή των μετατοπίσεων, όσο και στις τιμές οι οποίες είναι σχεδόν αμετάβλητες. Αν μελετήσουμε τα δύο μοντέλα εσωτερικά, επίσης δεν παρατηρούμε αλλαγές στις μετατοπίσεις παρά μόνο μια παραμόρφωση κάποιων στοιχείων της τοιχοποιίας (όπως φαίνεται και στις δύο επόμενες εικόνες, όπου συγκρίνονται δύο στοιχεία που βρίσκονται στην ίδια θέση, ανά μοντέλο).



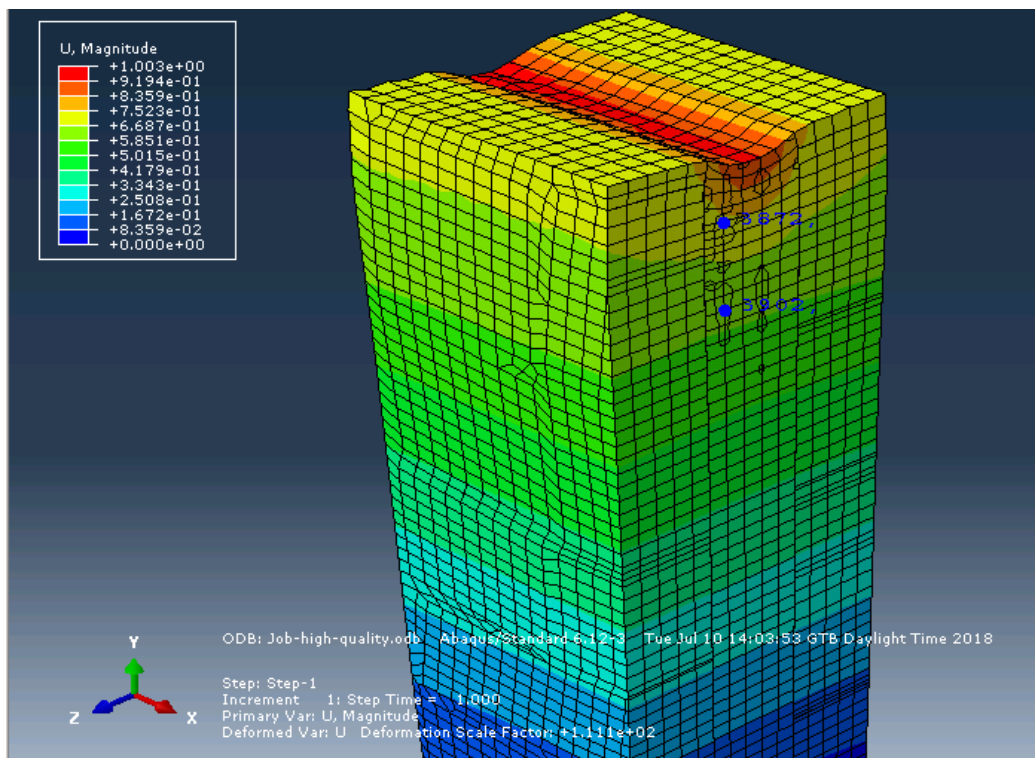
Εικόνα 19: Παραμόρφωση στοιχείων εντός της τοιχοποιίας με χρήση χαμηλής ποιότητας γεμίσματος πριν την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων



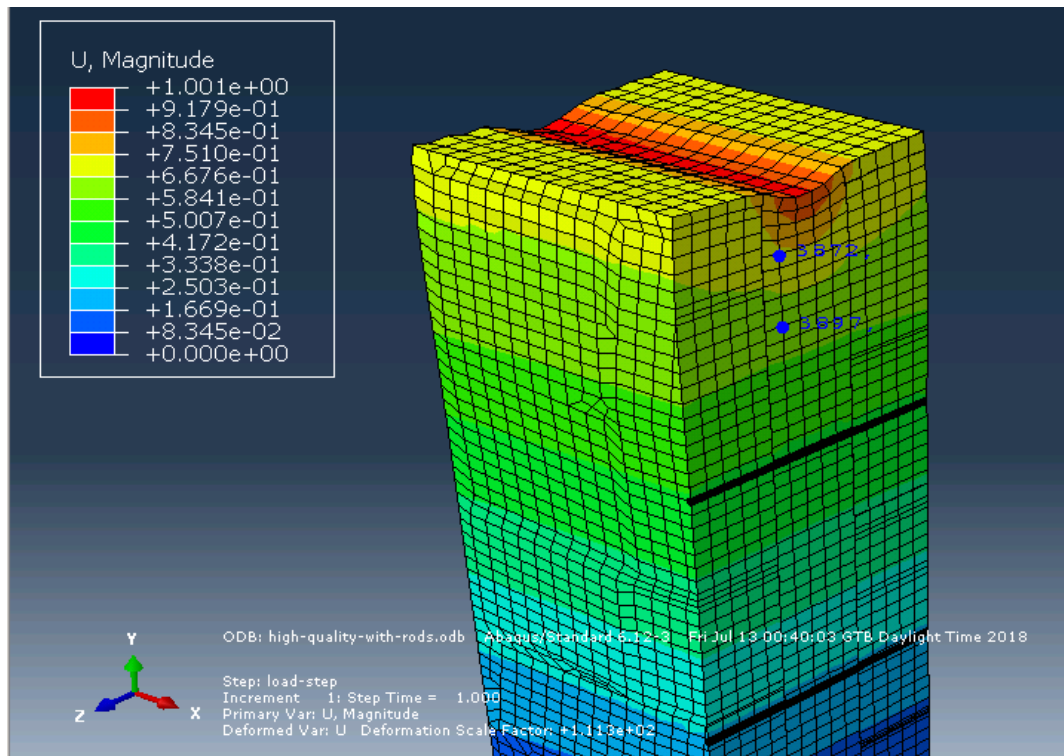
Εικόνα 20: Παραμόρφωση στοιχείων εντός της τοιχοποιίας με χρήση χαμηλής ποιότητας γεμίσματος μετά την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ (ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ - U)

Όσον αφορά το ενισχυμένο γέμισμα, όπως προηγουμένως στο χαμηλής ποιότητας γέμισμα οι τιμές των μετατοπίσεων στα εξωτερικά τοιχώματα μοιάζουν αρκετά όπως επίσης και η κατανομή, με την μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται στο κέντρο του επάνω εξωτερικού μέρους του γεμίσματος (1 mm). Μελετώντας το εσωτερικό αν και οι παραμορφώσεις των στοιχείων της κατασκευής μειώνονται σε σχέση με το χαμηλής ποιότητας γέμισμα και σε αυτή την περίπτωση η χρήση των μεταλλικών ράβδων φαίνεται να μην επηρεάζει τις τιμές των μετατοπίσεων σε εκείνα τα σημεία (φαίνεται στις δύο επόμενες εικόνες).



Εικόνα 21: Παραμόρφωση στοιχείων εντός της τοιχοποιίας με χρήση υψηλής ποιότητας γεμίσματος πριν την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων



Εικόνα 22: Παραμόρφωση στοιχείων εντός της τοιχοποιίας με χρήση υψηλής ποιότητας γεμίματος μετά την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι διαφορές που παρατηρήθηκαν όσον αφορά τις εκτός επιπέδου αλλά και τις κάθετες μετατοπίσεις συγκρίνοντας τα αποτελέσματα πριν αλλά και μετά την τοποθέτηση των δύο μεταλλικών ράβδων.

4.3 Συμπεράσματα γραμμικής ανάλυσης

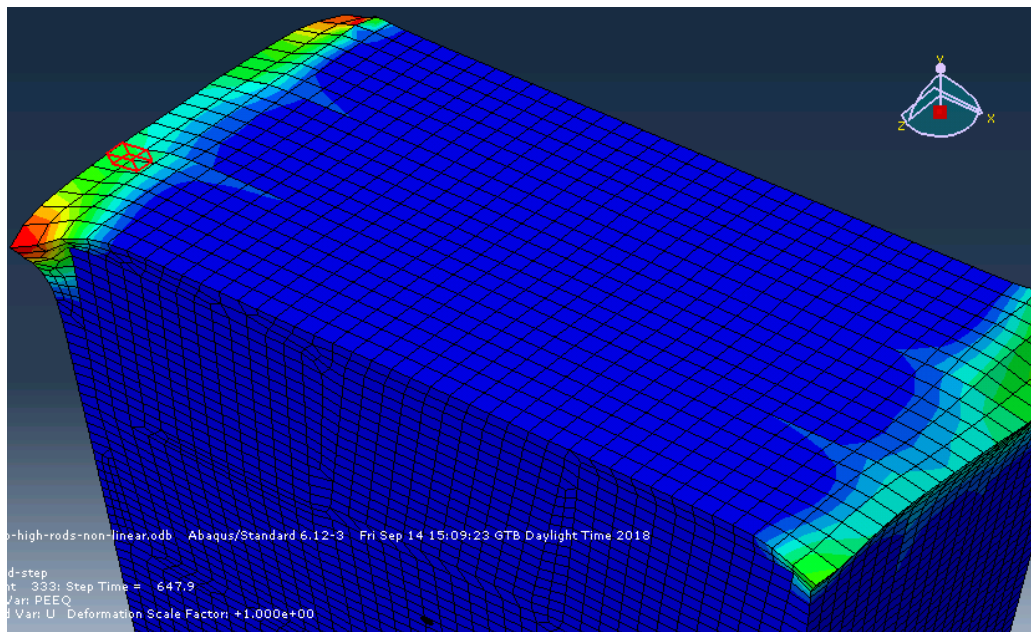
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ελαστικότητας όλων των μοντέλων τοιχοποιίας είναι ότι με τη χρήση των δύο μεταλλικών ράβδων στο 1/3 και στα 2/3 του ύψους της κατασκευής παρατηρήθηκε αύξηση των τάσεων στο μεγαλύτερο κομμάτι του τοίχου αλλά με τη σημαντική διαφορά ότι μετά την ενίσχυση με τις ράβδους η μέγιστη τιμή συναντάται στις ράβδους και όχι στο τοίχωμα. Τέλος όσον αφορά τις μετατοπίσεις, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές τόσο στα εξωτερικά όσο και στα εσωτερικά τοιχώματα της λίθινης τοιχοποιίας παρά μόνο μία παραμόρφωση κάποιων στοιχείων που προκλήθηκαν από την σταδιακά επιβαλλόμενη πίεση που ασκήθηκε στο επάνω μέρος του τοίχου.

5. Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς μοντέλων τοιχοποιίας

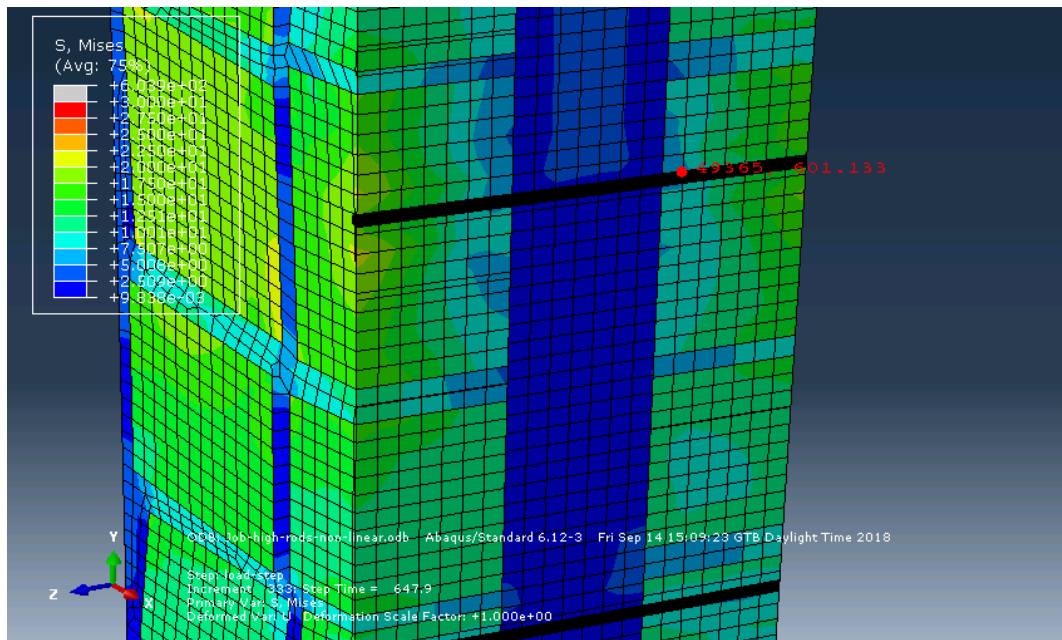
5.1 Μη γραμμική ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης με τη μέθοδο Concrete Damaged Plasticity ανάλογα με το μέγεθος που μελετάται στην εκάστοτε περίπτωση (Von Mises Stress, PEEQ, U) με την άσκηση σταδιακά επιβαλλόμενης πίεσης στο επάνω τοίχωμα και πάκτωσης στην βάση της τοιχοποιίας όπως προηγούμενως. Ο πρώτος συνδυασμός εικόνων θα αντιπροσωπεύει την τοιχοποιία στην οποία έχει χρησιμοποιηθεί χαμηλή ποιότητα γεμίσματος ενώ το δεύτερο ζεύγος θα αντιπροσωπεύει την τοιχοποιία με το υψηλής ποιότητας γέμισμα.

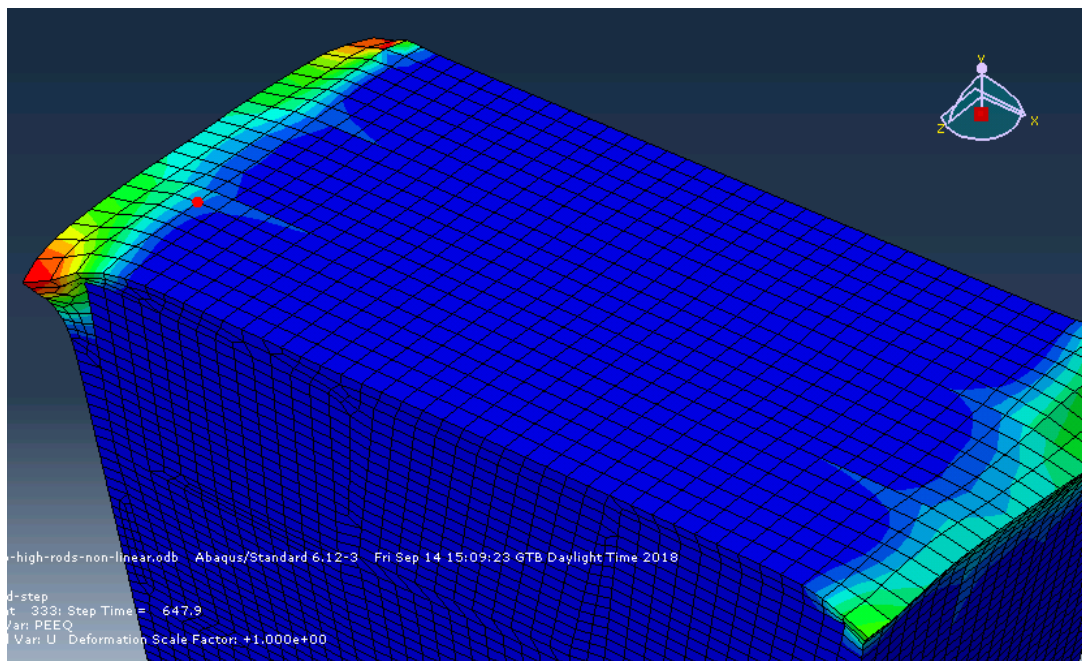
Τα στοιχεία (elements) 5936,49365 και ο κόμβος (node) 1777, που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των διαγραμμάτων Von Mises Stress, PEEQ και U αντίστοιχα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, φαίνονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 23: Element 5936



Εικόνα 24: Element 49365

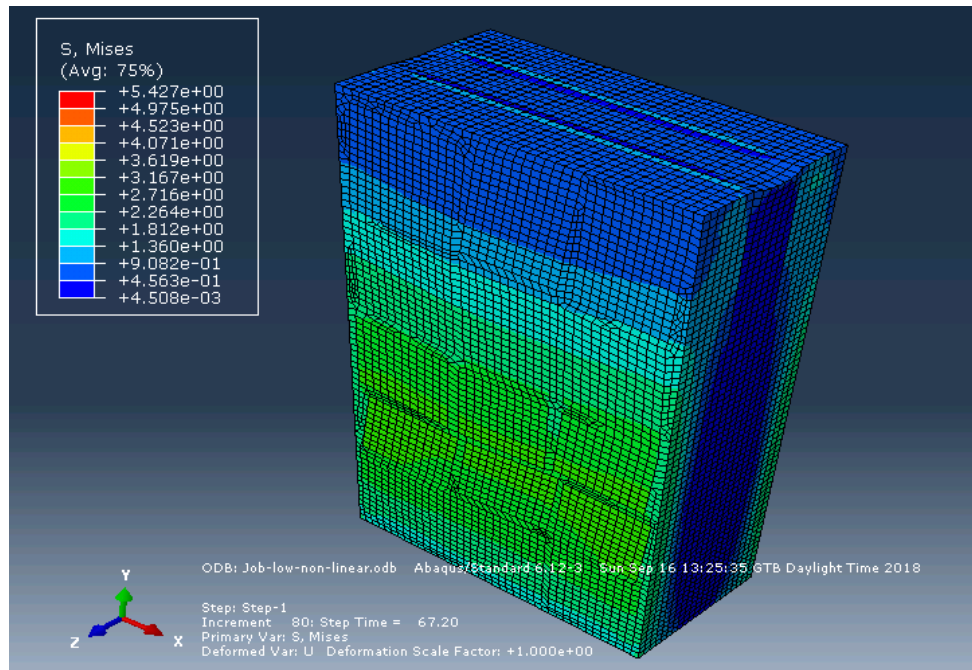


Εικόνα 25: Node 1777

❖ Τάσεις - Von Mises Stress

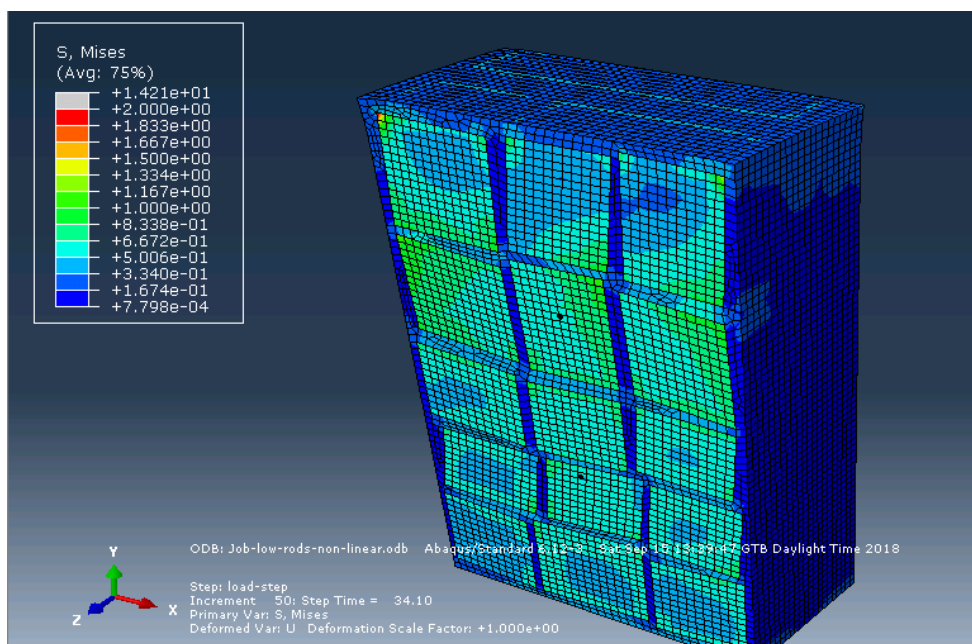
➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Εικόνα 26 : Κατανομή τάσεων Von Mises στην τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

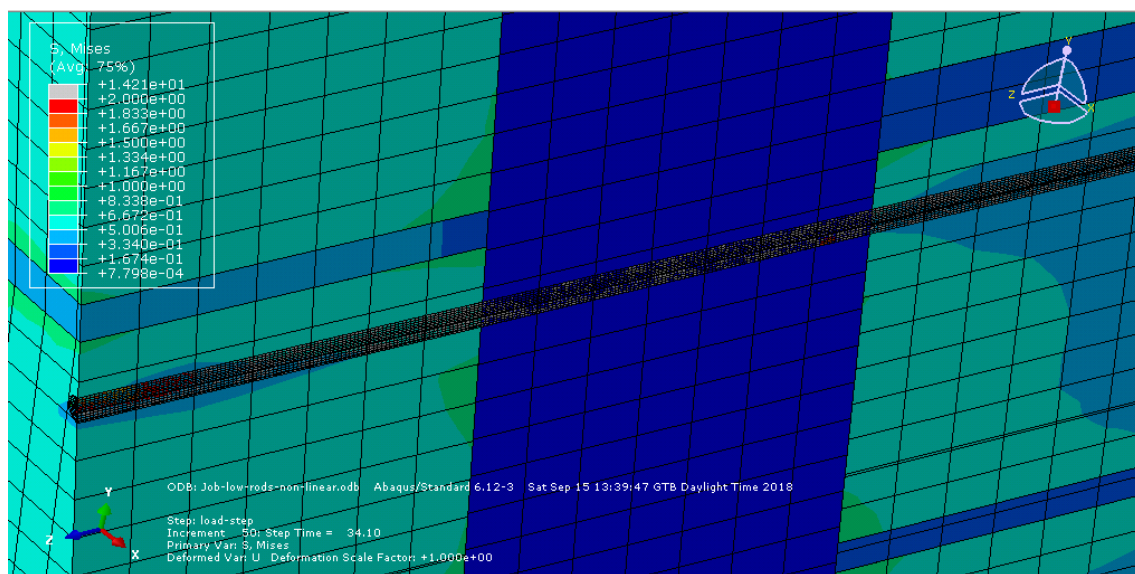
2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



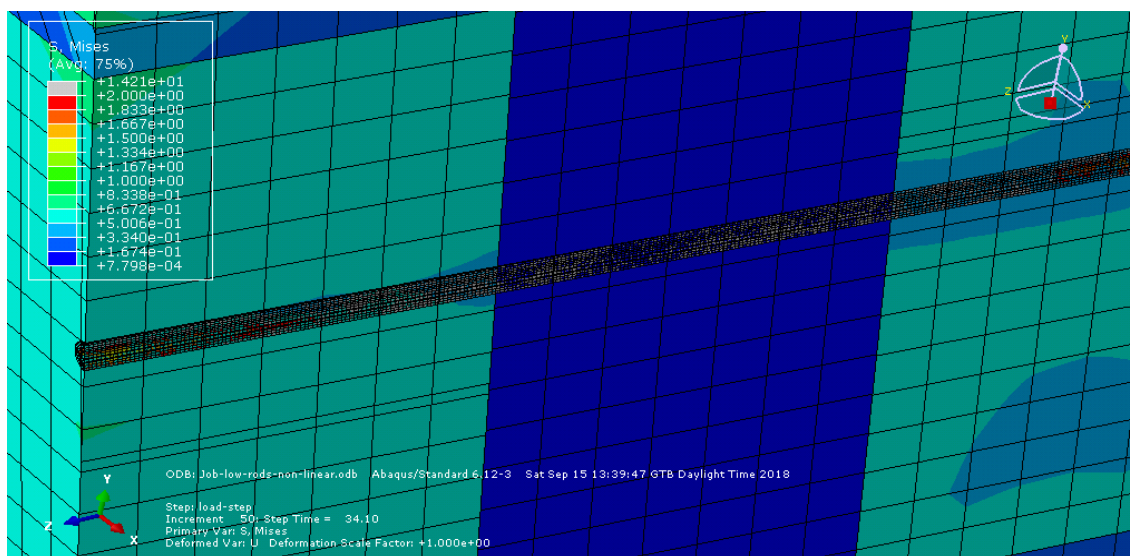
Εικόνα 27 : Κατανομή τάσεων Von Mises στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στα εξωτερικά τοιχώματα της μη ενισχυμένης τοιχοποιίας στην οποία έχει χρησιμοποιηθεί χαμηλή ποιότητα γεμίσματος κυμαίνεται στα 0.004 – 3.6 MPa με την μεγαλύτερη τάση 5.4 MPa να ασκείται στο εσωτερικό μέρος της τοιχοποιίας και πάνω στους λίθους με μία μικρή υποχώρηση του γεμίσματος ενώ μετά την ενίσχυση με τις δύο μεταλλικές ράβδους έχουμε μείωση, με τις τιμές στα τοιχώματα να κυμαίνονται στα 0.0008 – 1.33 MPa. Τέλος, μετά την ενίσχυση οι μέγιστες τάσεις μεγέθους 14 MPa καταπονούν εξ' ολοκλήρου τις ράβδους.

Στις δύο επόμενες εικόνες απεικονίζονται οι τάσεις Von Mises στο εσωτερικό των δύο ράβδων με την πρώτη να είναι η ράβδος που βρίσκεται στο 1/3 και η δεύτερη στα 2/3 της κατασκευής.



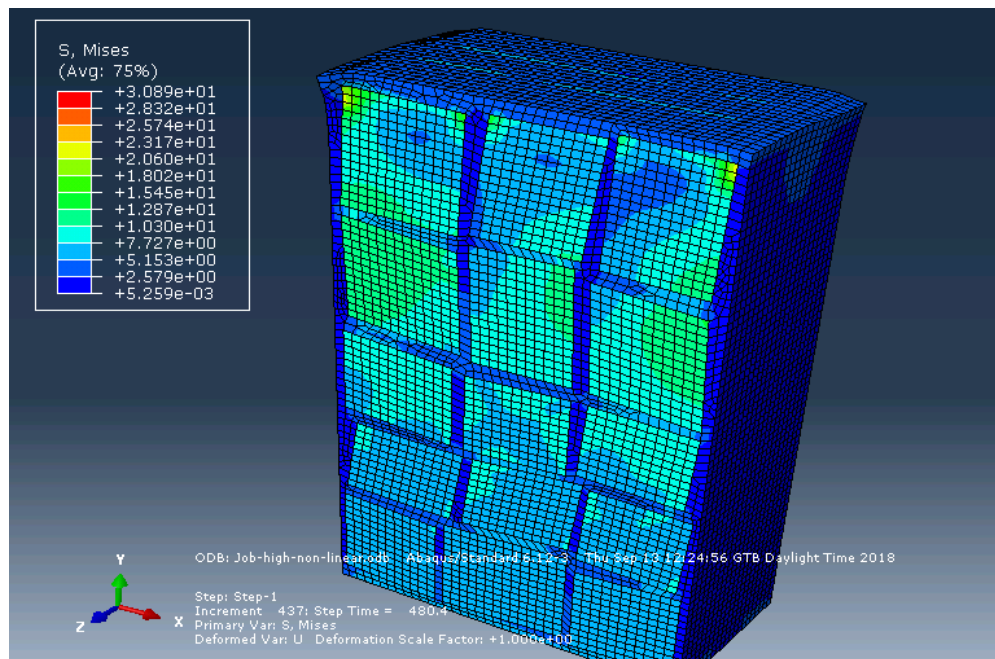
Εικόνα 28: Elements στο εσωτερικό της ράβδου στην θέση 1/3 για χαμηλή ποιότητα γεμίσματος



Εικόνα 29: Elements στο εσωτερικό της ράβδου στην θέση 2/3 για χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

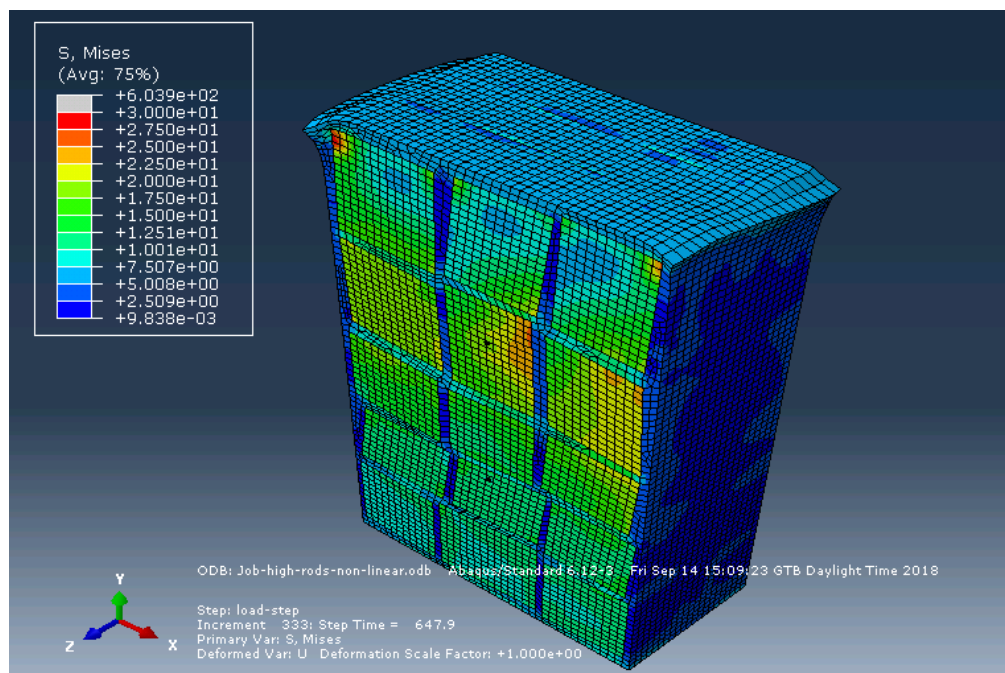
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Εικόνα 30 : Κατανομή τάσεων Von Mises στην τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

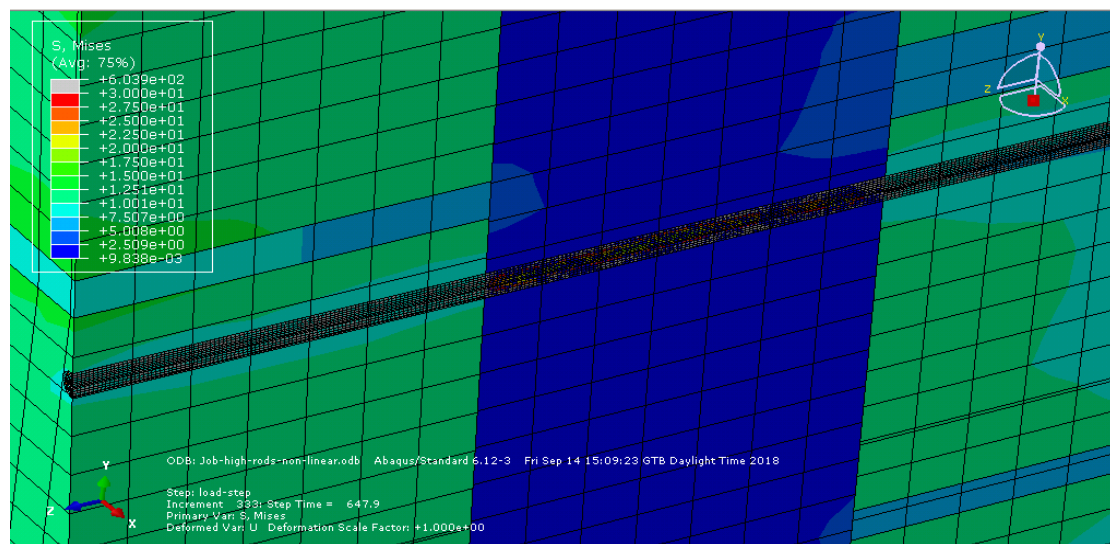
2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



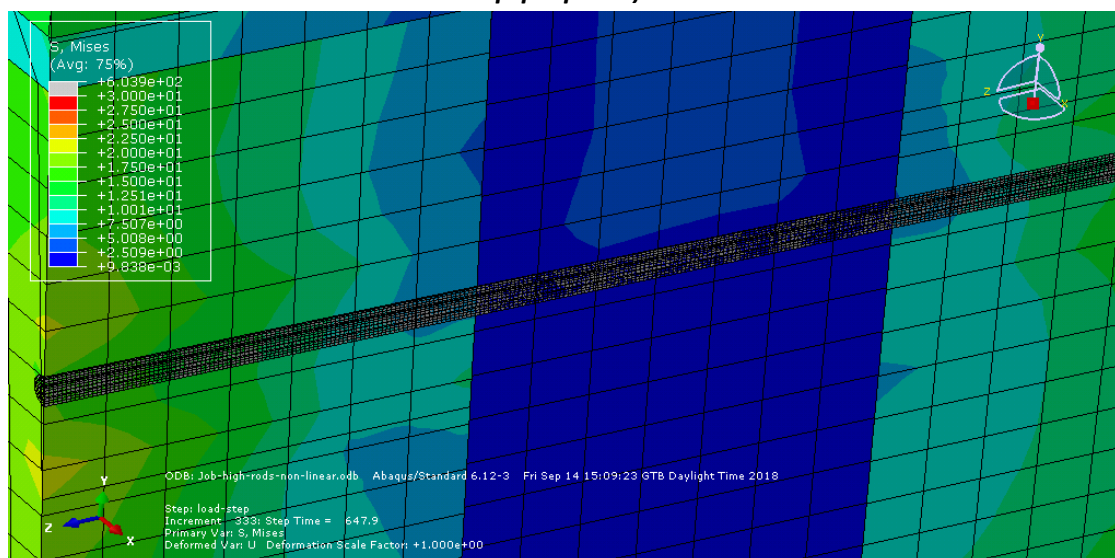
Εικόνα 31 : Κατανομή τάσεων Von Mises στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

Στην περίπτωση της υψηλής ποιότητας γεμίματος παρατηρούμε ότι οι τάσεις στα εξωτερικά μέρη της μη ενισχυμένης τοιχοποιίας είναι 0.005 – 23 MPa με τις μέγιστες τάσεις (31 MPa) να εντοπίζονται σε διάφορα σημεία στο εσωτερικό των λίθων και κοντά στο κονίαμα. Στη συνέχεια αφού ενισχύσαμε την τοιχοποιία με τις ράβδους παρατηρούμε ότι οι τάσεις στα τοιχώματα και ιδιαίτερα στους λίθους μειώνονται στα 27 MPa με τις μέγιστες τάσεις να σημειώνουν σημαντική αύξηση, ακόμα και με το αντίστοιχο μοντέλο της ενισχυμένης τοιχοποιίας με χαμηλής ποιότητας γέμισμα, καθώς ισούνται πια με 603 MPa με κοινό σημείο ότι σημειώνονται στο εσωτερικό των ράβδων με κάποιες μικρές διαφορές στην κατανομή τους ανάλογα την ράβδο.

Στις δύο επόμενες εικόνες απεικονίζονται οι τάσεις Von Mises στο εσωτερικό των δύο ράβδων με την πρώτη να είναι η ράβδος που βρίσκεται στο 1/3 και η δεύτερη στα 2/3 της κατασκευής.



Εικόνα 32: Elements στο εσωτερικό της ράβδου στην θέση 1/3 για υψηλή ποιότητα γεμίματος

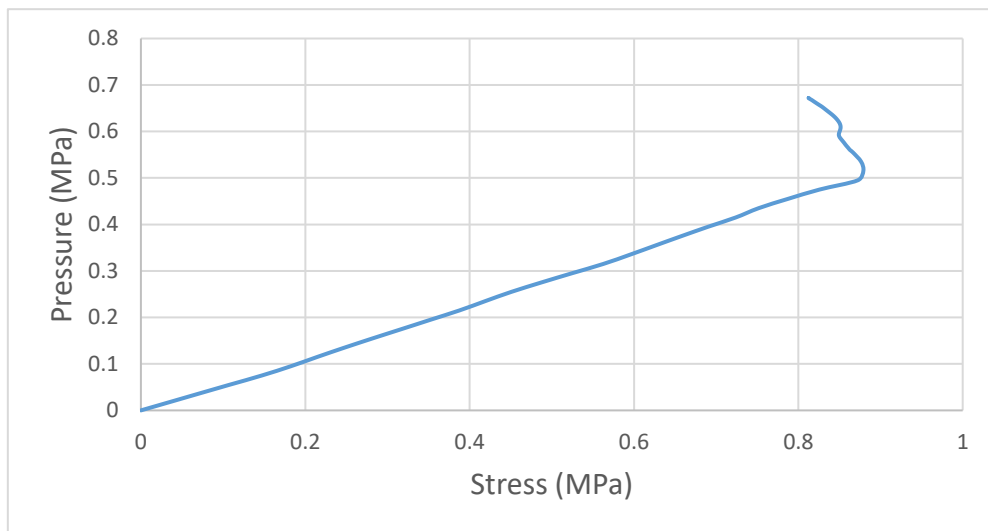


Εικόνα 33: Elements στο εσωτερικό της ράβδου στην θέση 2/3 για υψηλή ποιότητα γεμίματος

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα *Pressure-Von Mises Stress* για κάθε μοντέλο.

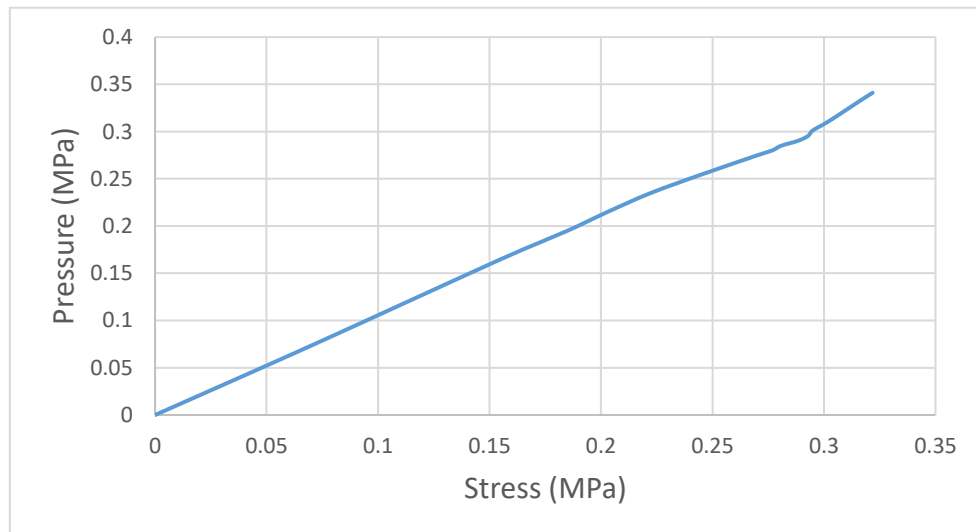
➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 1: Pressure-Stress χαμηλής ποιότητας γεμίματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



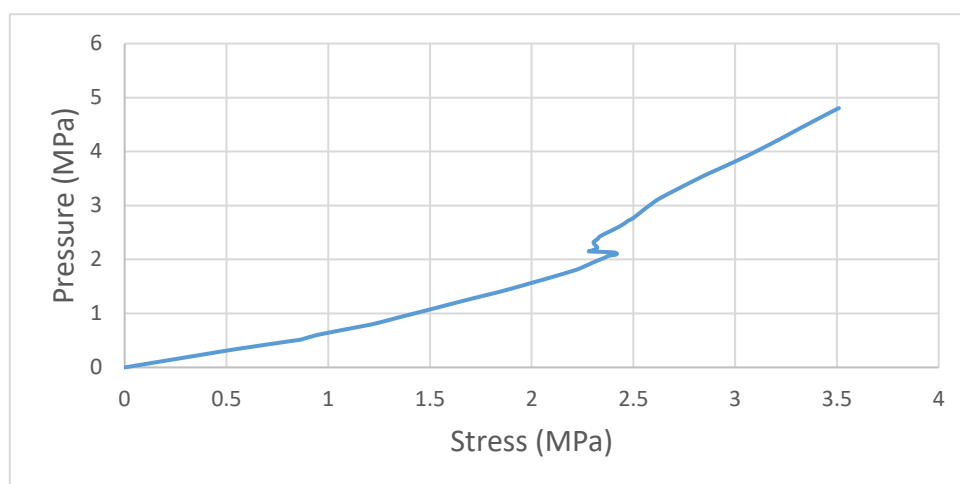
Διάγραμμα 2: Pressure-Stress χαμηλής ποιότητας γεμίματος με ράβδους

Μελετώντας τη συμπεριφορά των μοντέλων στα οποία χρησιμοποιήθηκε χαμηλής ποιότητας γέμισμα όσον αφορά το διάγραμμα Pressure-Stress παρατηρείται ότι πριν την ενίσχυση έχει ασκηθεί μεγαλύτερο ποσοστό της πίεσης, δηλαδή 0.68 MPa από τα

10 MPa που σταδιακά επιβάλλονται στην κατασκευή, από ότι μετά την ενίσχυση (0.34 MPa) με τις τάσεις Von Mises στο συγκεκριμένο στοιχείο του τοίχου να μειώνονται από τα 0.88 MPa στα 0.32 MPa αντίστοιχα.

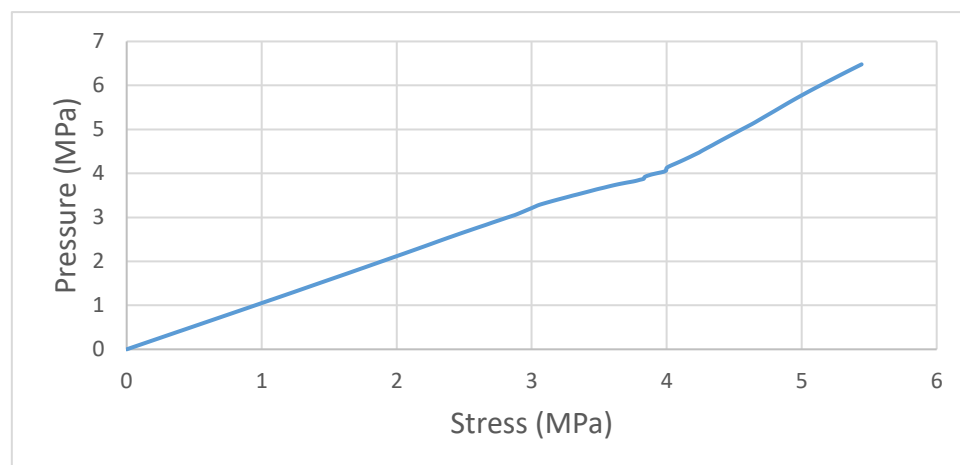
➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 3: Pressure-Stress υψηλής ποιότητας γεμίματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους

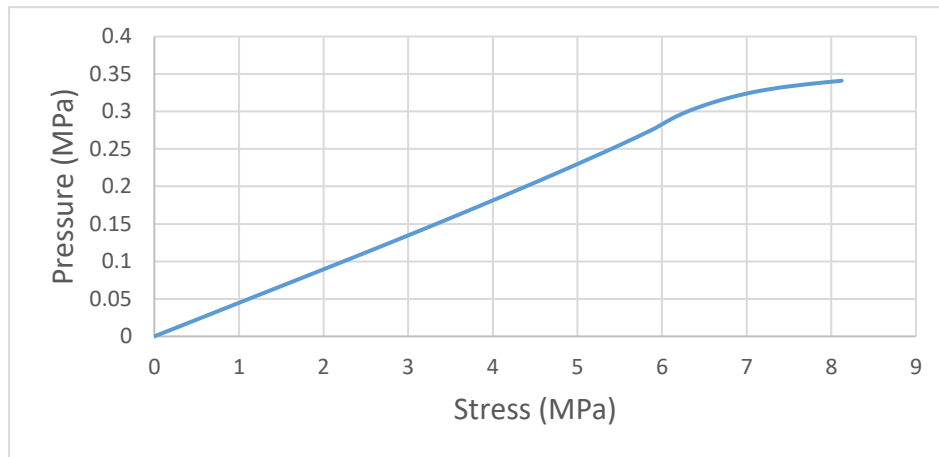


Διάγραμμα 4: Pressure-Stress υψηλής ποιότητας γεμίματος με ράβδους

Όσον αφορά τα μοντέλα με χρήση υψηλής ποιότητας γεμίματος σε αντίθεση με την χαμηλή ποιότητα γεμίματος παρατηρείται μία αύξηση των τάσεων στο επιλεγμένο στοιχείο από τα 3.5 MPa πριν τις ράβδους στα 5.4 MPa μετά την ενίσχυση. Επίσης φαίνεται πως στο ενισχυμένο μοντέλο ασκείται μεγαλύτερο ποσοστό της επιβαλλόμενης πίεσης αυξανόμενο σε σχέση με πριν την ενίσχυση από 48% σε 65%.

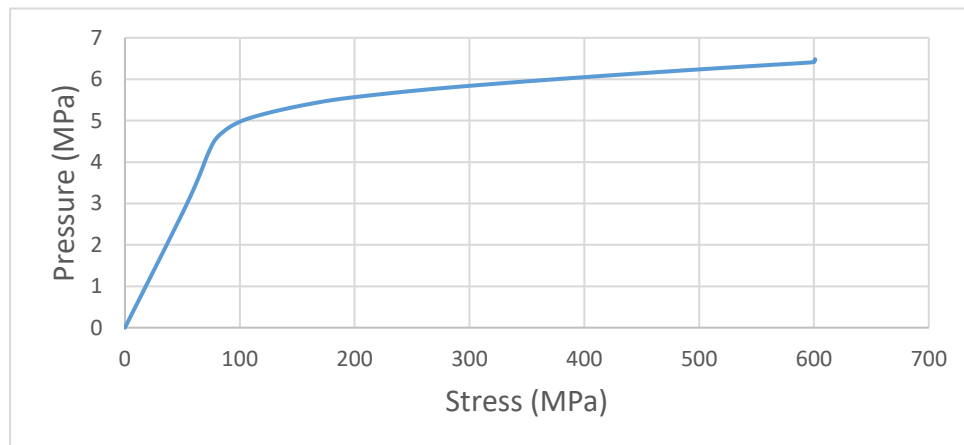
Σε αυτή τη σελίδα απεικονίζονται τα διαγράμματα *Pressure-Von Mises Stress* για το εσωτερικό της ράβδου που βρίσκεται στα 2/3 της τοιχοποιίας ανά ποιότητα γεμίσματος.

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



Διάγραμμα 5: Pressure-Stress χαμηλής ποιότητας γεμίσματος με ράβδους (στο εσωτερικό της ράβδου)

➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**



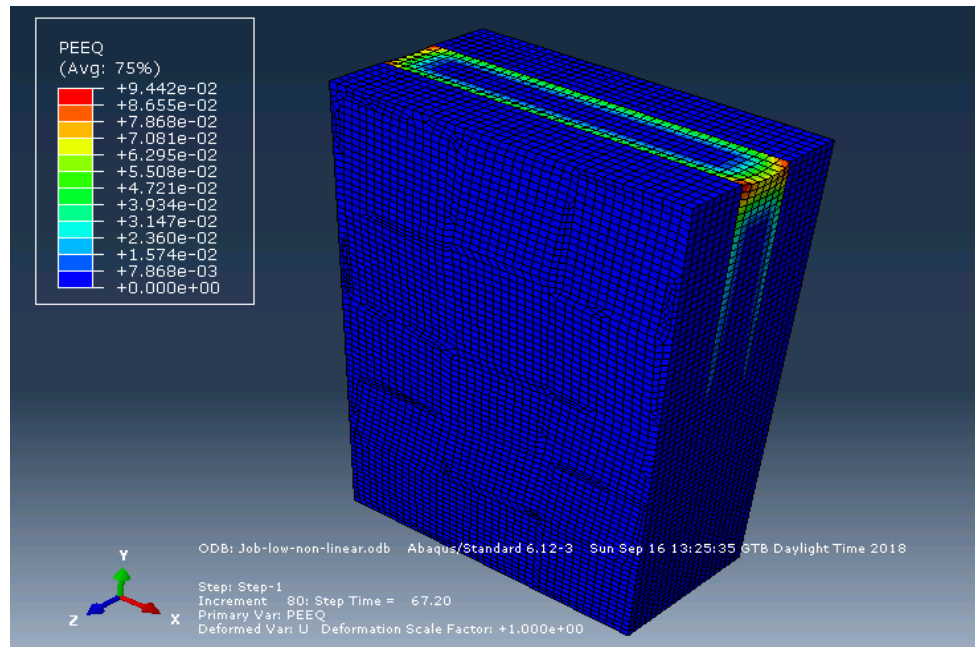
Διάγραμμα 6: Pressure-Stress υψηλής ποιότητας γεμίσματος με ράβδους (στο εσωτερικό της ράβδου)

Τώρα θα εξετάσουμε την συμπεριφορά του έτερου επιλεγμένου στοιχείου αυτή τη φορά στο εσωτερικό της επάνω ράβδου (στοιχείο 49365) ως προς το διάγραμμα Pressure-Stress. Εδώ είναι φανερό ότι με τη χρήση υψηλής ποιότητας καταφέρνουμε να φτάσουμε σε υψηλότερα επίπεδα σταδιακής άσκησης πίεσης χωρίς να τερματιστεί ο αλγόριθμος αφού φτάνουμε μέχρι τα 6.5 MPa από τα 0.34 MPa της χαμηλής ποιότητας και με τις τάσεις στο εν λόγω στοιχείο να ισούνται με 600 MPa φτάνοντας έτσι την μέγιστη τιμή των τάσεων από όλα τα μοντέλα τοιχοποιίας.

❖ Πλαστική παραμόρφωση – PEEQ

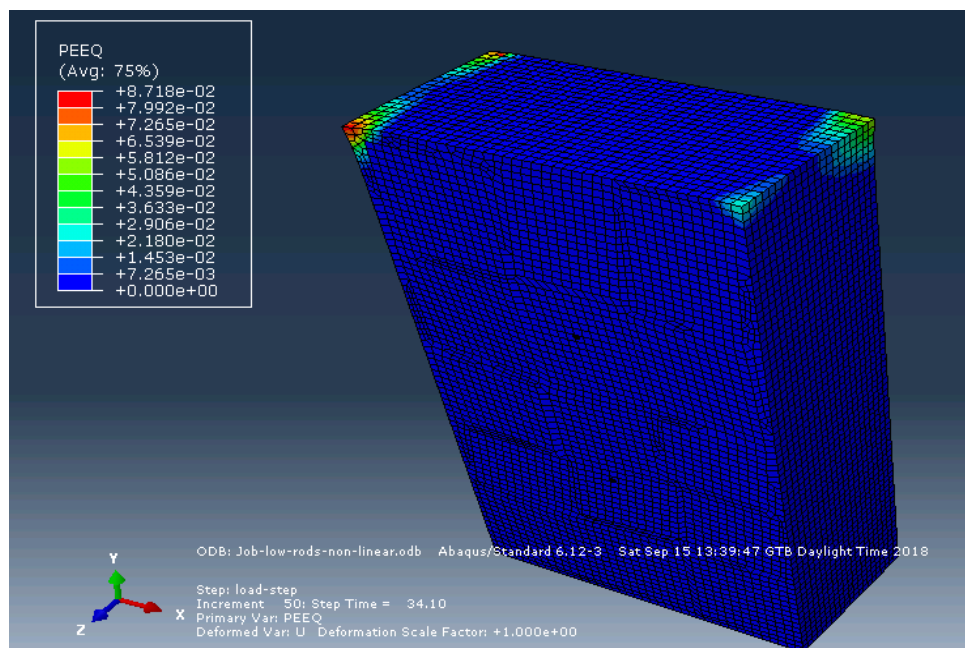
➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

1) **Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους**



Εικόνα 34 : Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης στην τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

2) **Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους**

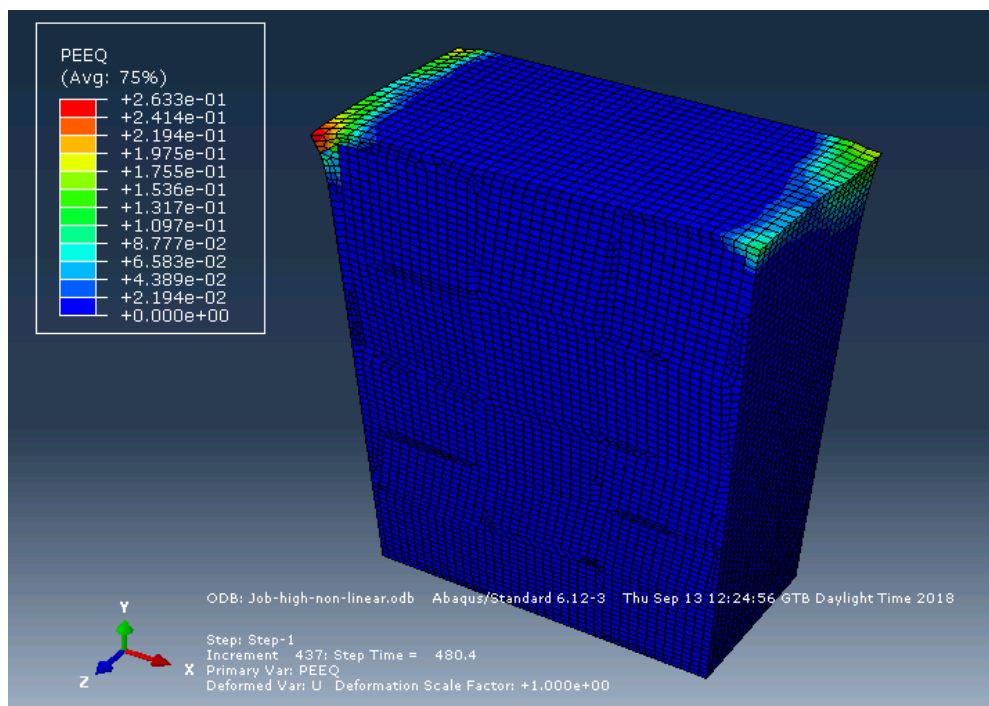


Εικόνα 35: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

Με την χρησιμοποίηση της χαμηλής ποιότητας γεμίσματος πριν την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων είναι φανερό πως η μεγαλύτερη καταπόνηση της τοιχοποιίας και συγκεκριμένα η πλαστική παραμόρφωση απορροφάται σχεδόν εξ ολοκλήρου από το γέμισμα το οποίο υποχωρεί ελαφρώς προς τα κάτω με μέγιστη τιμή 0.094 στα άκρα του γεμίσματος. Από την άλλη πλευρά, με την χρήση των ράβδων φαίνεται πως η μεγαλύτερη παραμόρφωση των στοιχείων της τοιχοποιίας δεν μεταβάλλεται σημαντικά (0.087). Αυτό που αλλάζει όμως είναι ότι συγκεντρώνεται στις γωνίες του επάνω τοιχώματος με έμφαση στην αριστερή πλευρά, γεγονός που ίσως οφείλεται στο ότι οι λίθοι ανά πλευρά έχουν ελαφρώς διαφοροποιημένη γεωμετρία καθώς το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πέτρα, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική αντοχή της κάθε πλευράς.

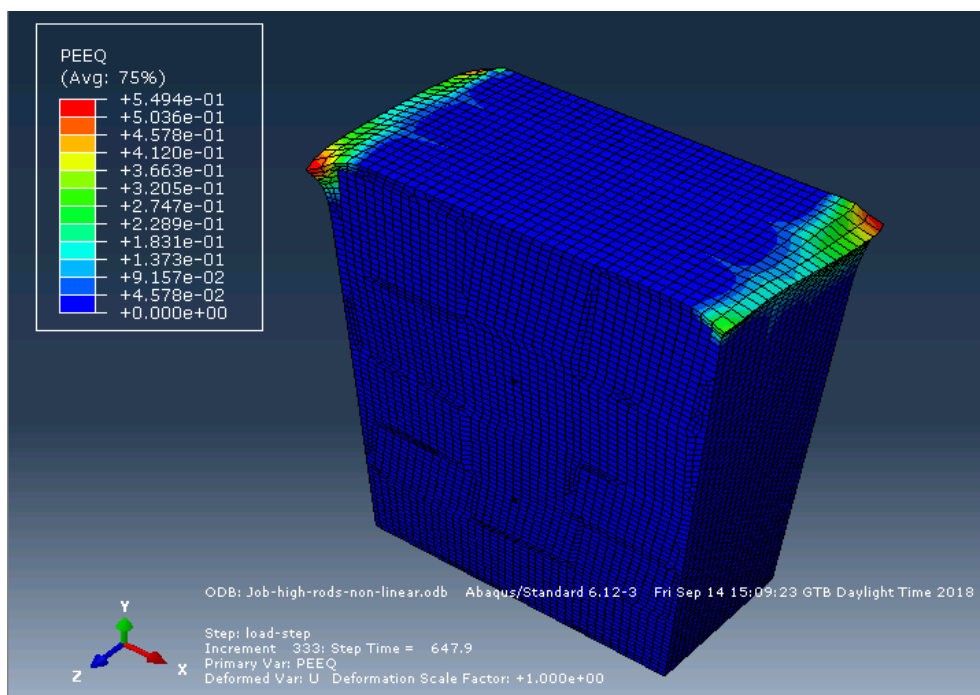
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Εικόνα 36: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης στην τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



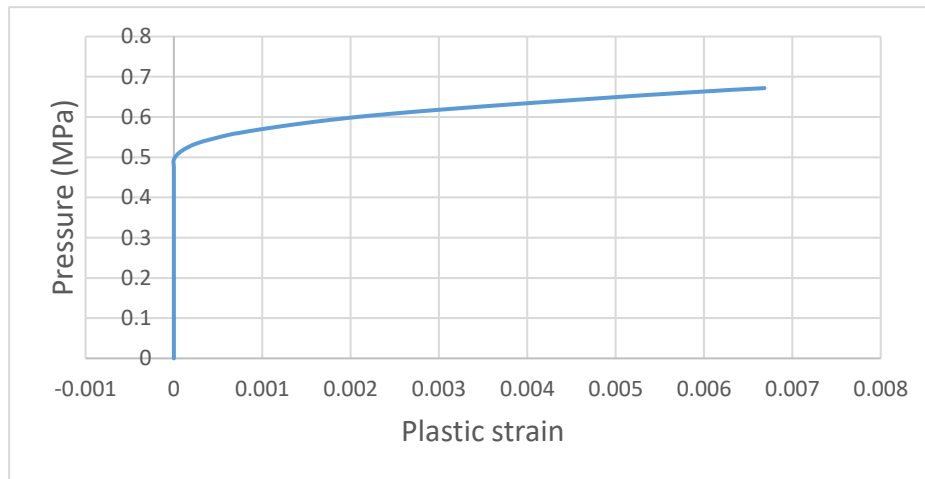
Εικόνα 37: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

Καθώς χρησιμοποιήθηκε η υψηλή ποιότητα γεμίσματος παρατηρούμε μια κοινή συμπεριφορά των δύο μοντέλων όσον αφορά την συγκέντρωση της πλαστικής παραμόρφωσης όπου παρατηρείται κυρίως στις άκρες του επάνω τοιχώματος με τη μέγιστη τιμή να παρατηρείται στα στοιχεία που βρίσκονται στις γωνίες της κατασκευής. Η διαφορά όμως πριν και μετά τη χρήση των ράβδων είναι στις μέγιστες τιμές, με του μη ενισχυμένου μοντέλου να είναι 0.263 και του ενισχυμένου 0.549 όπου και παρατηρούμε πολύ μεγάλη αύξηση σε σχέση με τα αντίστοιχα μοντέλα κατά την χρησιμοποίηση χαμηλής ποιότητας γεμίσματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα *Pressure-Plastic strain* για κάθε μοντέλο.

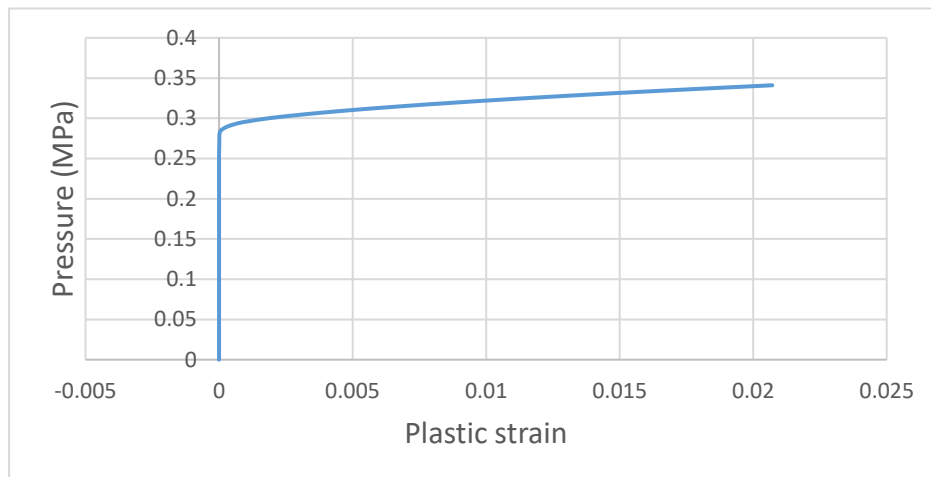
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 7: *Pressure-Plastic strain* χαμηλής ποιότητας γεμίσματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους

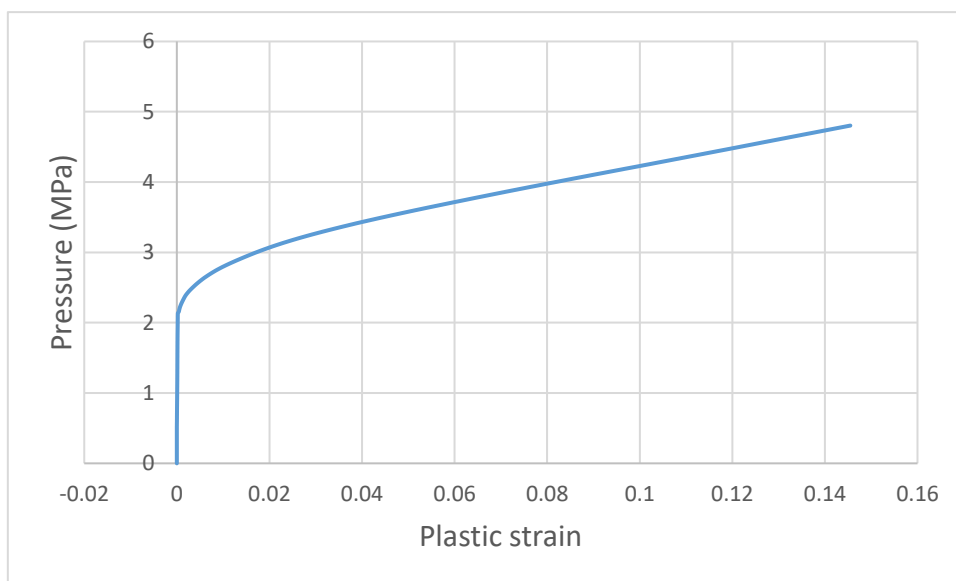


Διάγραμμα 8: *Pressure-Plastic strain* χαμηλής ποιότητας γεμίσματος με ράβδους

Στα παραπάνω διαγράμματα *Pressure-Plastic strain* φαίνεται πως πριν την ενίσχυση ασκείται στην τοιχοποιία μεγαλύτερη πίεση ίση με 0.68 MPa απ' ότι αφού ενισχύθηκε όπου έχουμε 0.34 MPa με την πλαστική παραμόρφωση στο στοιχείο που μελετάμε να αυξάνεται αρκετά από 0.0068 πριν την ενίσχυση σε 0.021 μετά την τοποθέτηση ράβδων.

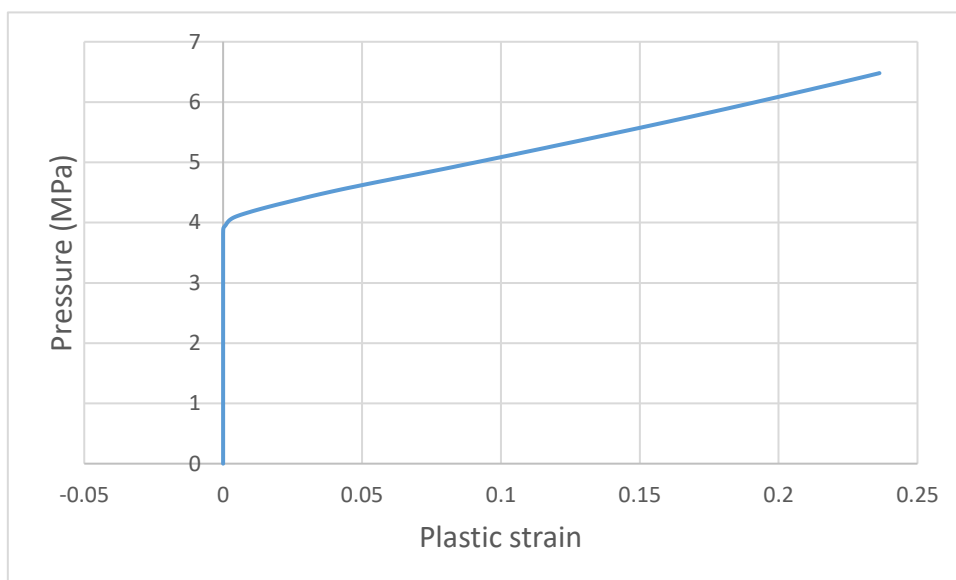
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 9: Pressure-Plastic strain υψηλής ποιότητας γεμίσματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



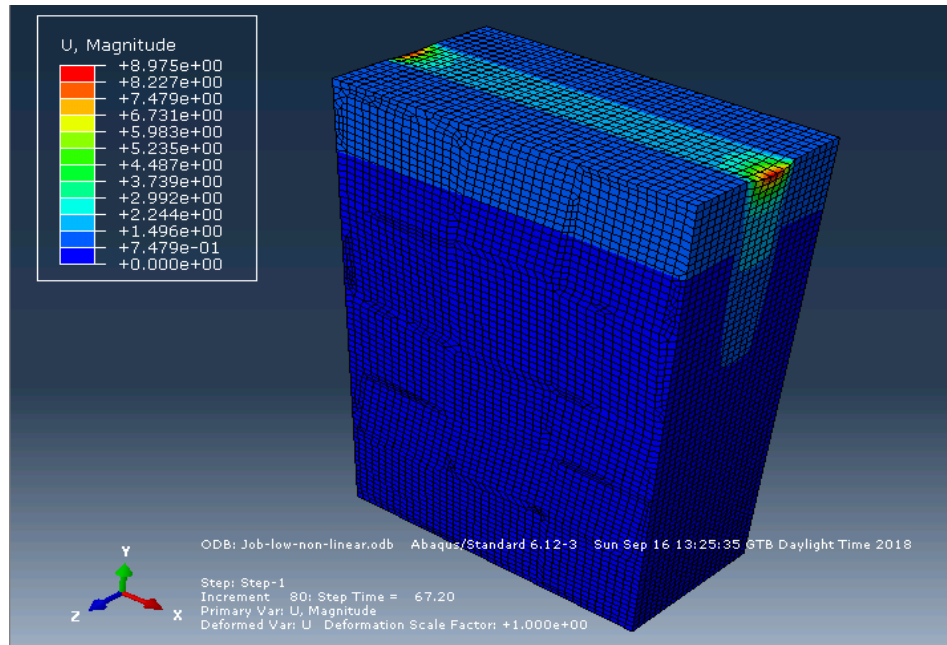
Διάγραμμα 10: Pressure-Plastic strain υψηλής ποιότητας γεμίσματος με ράβδους

Όσον αφορά την εξέταση των διαγραμμάτων Pressure-Plastic strain κατά την χρήση υψηλής ποιότητας γεμίσματος φαίνεται πως πριν την ενίσχυση η σταδιακά επιβαλλόμενη πίεση φτάνει τα 4.8 MPa για να πάρουμε μέγιστη παραμόρφωση 0.142 στο στοιχείο που μελετάμε, ενώ αφού τοποθετήσουμε τις δύο μεταλλικές ράβδους έχουμε μέγιστη πίεση 6.5 MPa με διπλασιασμό της παραμόρφωσης στα 0.24.

❖ Μετατοπίσεις - U

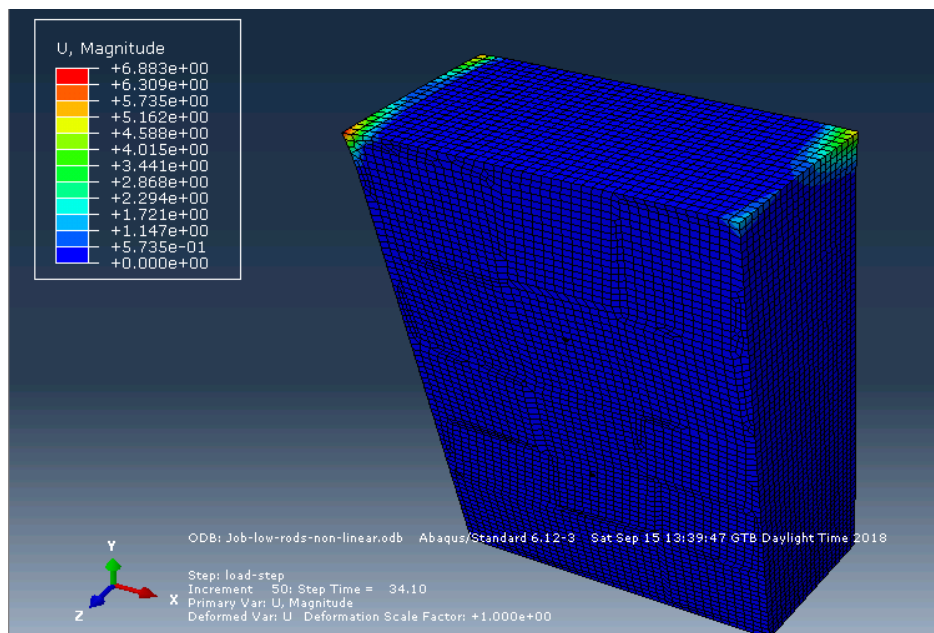
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Εικόνα 38: Κατανομή μετατοπίσεων στην τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους

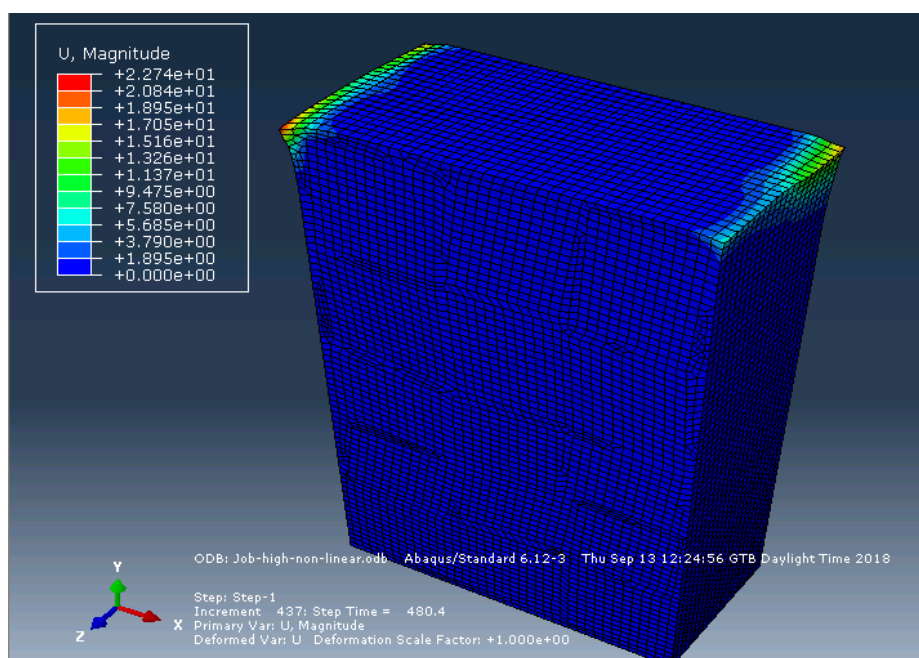


Εικόνα 39: Κατανομή μετατοπίσεων στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίσματος

Μελετώντας τις τοιχοποιίες με χρήση χαμηλής ποιότητας γεμίσματος φαίνεται πως πριν την ενίσχυση οι μετατοπίσεις στα εξωτερικά τοιχώματα κυμαίνονται στα 0.748-2.99 mm με τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις να συγκεντρώνονται στο γέμισμα και πιο συγκεκριμένα στον κεντρικό τομέα των δύο ακραίων πλευρών του με μέγιστη τιμή τα 8.975 mm. Αντίθετα καθώς ενισχύθηκε ο τοίχος με τις ράβδους οι μετατοπίσεις στα τοιχώματα παίρνουν πολύ μικρές τιμές έως 0.5 mm με τις μεγαλύτερες τιμές της μετατόπισης να αλλάζουν κατανομή πάνω στο μοντέλο και να συγκεντρώνονται στις γωνίες του επάνω τοιχώματος με μειωμένη μέγιστη μετατόπιση τα 6.883 mm σε σχέση με πριν την ενίσχυση ,στα στοιχεία που βρίσκονται στα άκρα του επάνω τοιχώματος.

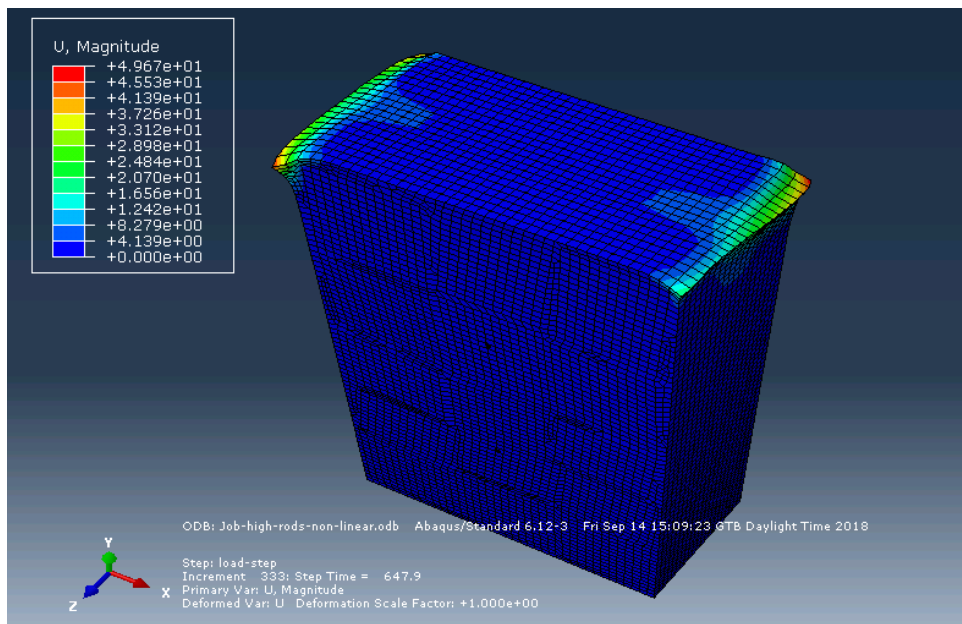
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Εικόνα 40: Κατανομή μετατοπίσεων στην τοιχοποιία με υψηλή ποιότητα γεμίσματος

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



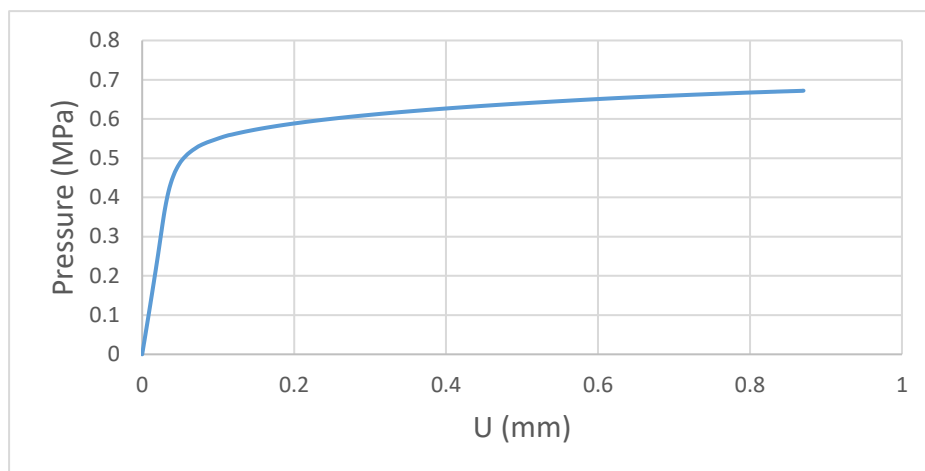
Εικόνα 41: Κατανομή μετατοπίσεων στην ενισχυμένη με δύο ράβδους τοιχοποιία με χαμηλή ποιότητα γεμίματος

Με την χρησιμοποίηση υψηλής ποιότητας γεμίματος ενώ η τοιχοποιία δεν είναι ενισχυμένη με ράβδους βλέπουμε ότι οι μετατοπίσεις στα εξωτερικά τοιχώματα είναι 1.895 με 3.79 mm με τις μεγαλύτερες τιμές 9.47-20.84 mm να εντοπίζονται σε όλο το πλάτος του επάνω τοιχώματος το οποίο και φαίνεται να παραμορφώνεται προς τα έξω με μέγιστη τιμή στις γωνίες τα 22.74 mm. Μετά την τοποθέτηση ενίσχυσης, η κατανομή των μετατοπίσεων φαίνεται να παραμένει η ίδια με την διαφορά να έγκειται στο εύρος των τιμών. Πιο συγκεκριμένα η ελάχιστη τιμή στα τοιχώματα είναι 4.1 mm παρουσιάζοντας μικρή αύξηση και η μέγιστη τιμή είναι 49.67 mm δηλαδή έχουμε διπλασιασμό των μέγιστων μετατοπίσεων που παρατηρούνται στα άκρα του επάνω τοιχώματος της τοιχοποιίας.

Μετέπειτα παρουσιάζονται τα διαγράμματα *Pressure-U* για κάθε μοντέλο.

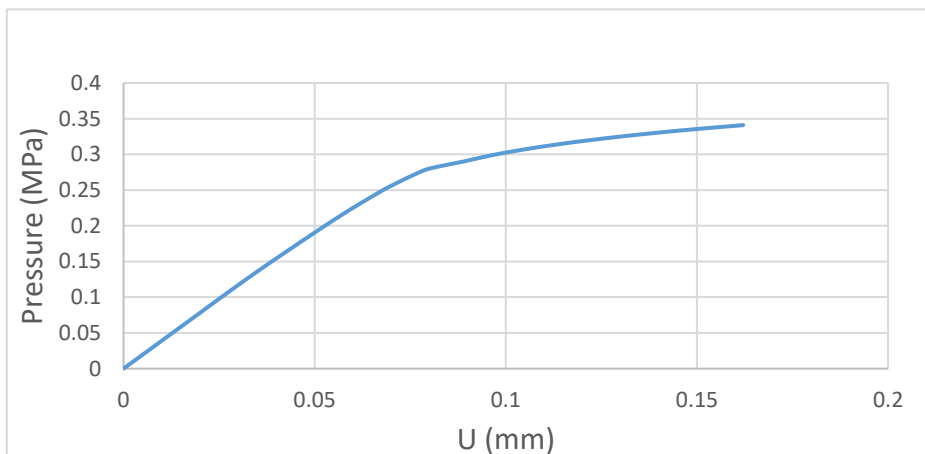
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 11: *Pressure-U* χαμηλής ποιότητας γεμίματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους

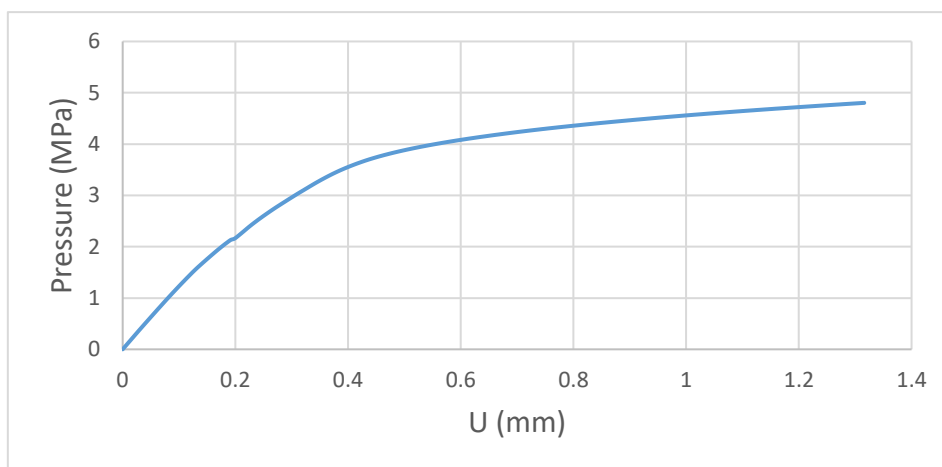


Διάγραμμα 12: *Pressure-U* χαμηλής ποιότητας γεμίματος με ράβδους

Τα παραπάνω διαγράμματα *Pressure-U* που απεικονίζουν τις μετατοπίσεις, στο επιλεγμένο σημείο αυτή τη φορά του επάνω τοιχώματος (node 1777) για χαμηλή ποιότητα γεμίματος, δείχνουν ότι όταν το μοντέλο τοιχοποιίας δεν είναι ενισχυμένο με τις δύο μεταλλικές ράβδους το ποσοστό πίεσης που ασκείται στο σημείο αυτό είναι μόλις το 6.8% της συνολικά επιβαλλόμενης πίεσης των 10 MPa προκαλώντας μετατόπιση 0.83 mm. Στη συνέχεια και μετά την ενίσχυση το ποσοστό πίεσης μειώνεται στο 3.4% της σταδιακά επιβαλλόμενης πίεσης οδηγώντας έτσι σε ακόμη μικρότερη μετατόπιση της τάξης των 0.16 mm.

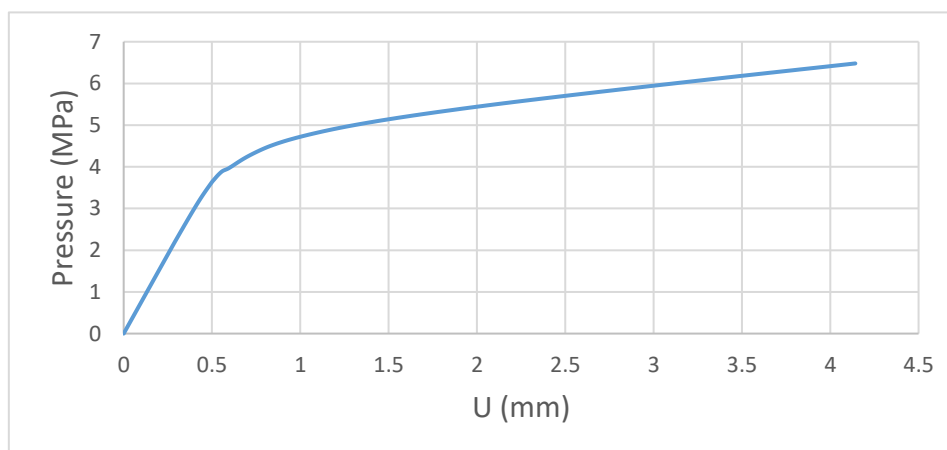
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 13: Pressure-U υψηλής ποιότητας γεμίσματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



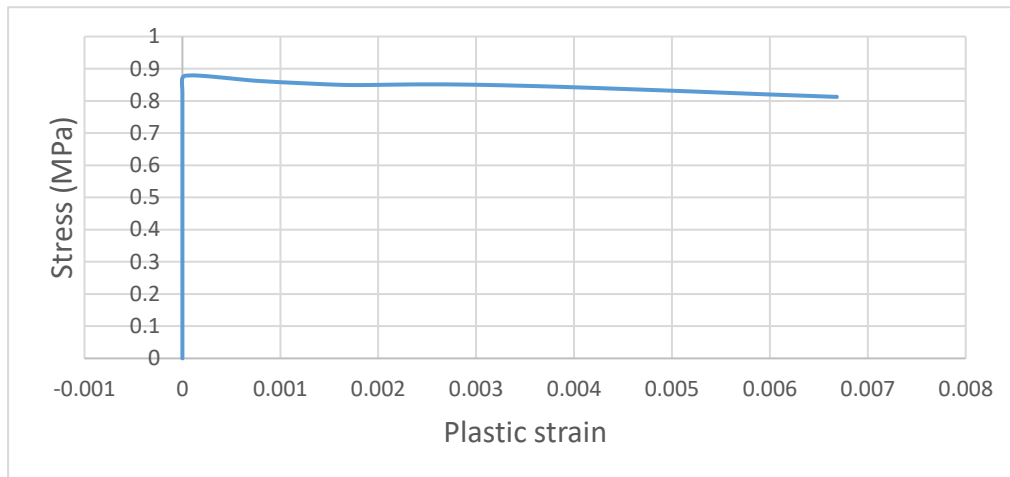
Διάγραμμα 14: Pressure-U υψηλής ποιότητας γεμίσματος με ράβδους

Εξετάζοντας τα διαγράμματα Pressure-U για την υψηλή ποιότητα γεμίσματος βλέπουμε ότι πριν την τοποθέτηση ράβδων, όπως και στα προηγούμενα μετρούμενα μεγέθη, η πίεση που ασκείται στην τοιχοποιία είναι περίπου 4.8 MPa με την μέγιστη μετατόπιση του σημείου να είναι 1.3 mm. Μετά την ενίσχυση η πίεση αυξάνεται με μέγιστη τιμή τα 6.5 MPa προκαλώντας αυξημένη μετατόπιση στα 4.2 mm.

Τέλος στις επόμενες εικόνες απεικονίζονται τα διαγράμματα *Von Mises Stress-Plastic strain*, για το στοιχείο 5936 το οποίο βρίσκεται στο επάνω εξωτερικό τοίχωμα όπως δείξαμε και προηγουμένως.

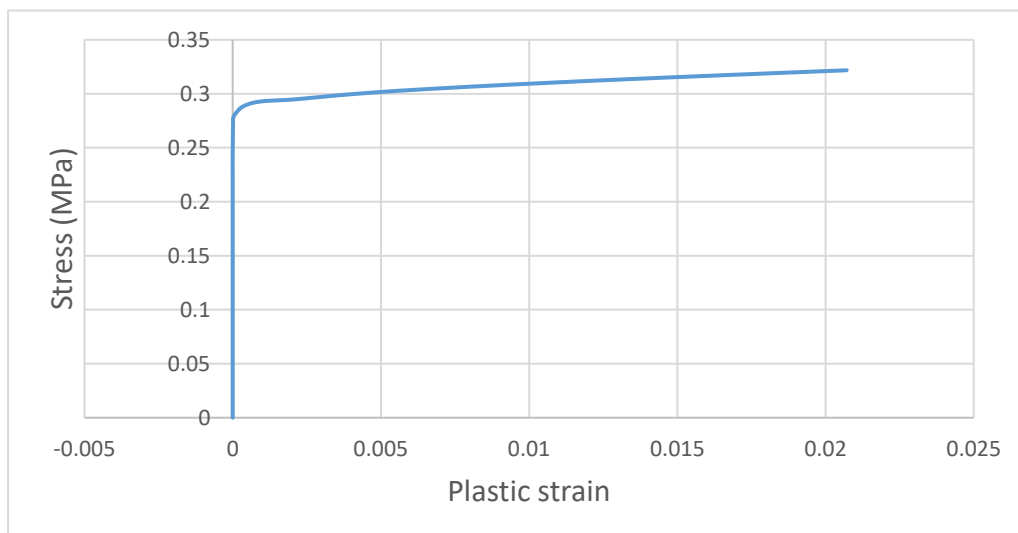
➤ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 15: *Stress-Plastic strain* χαμηλής ποιότητας γεμίσματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



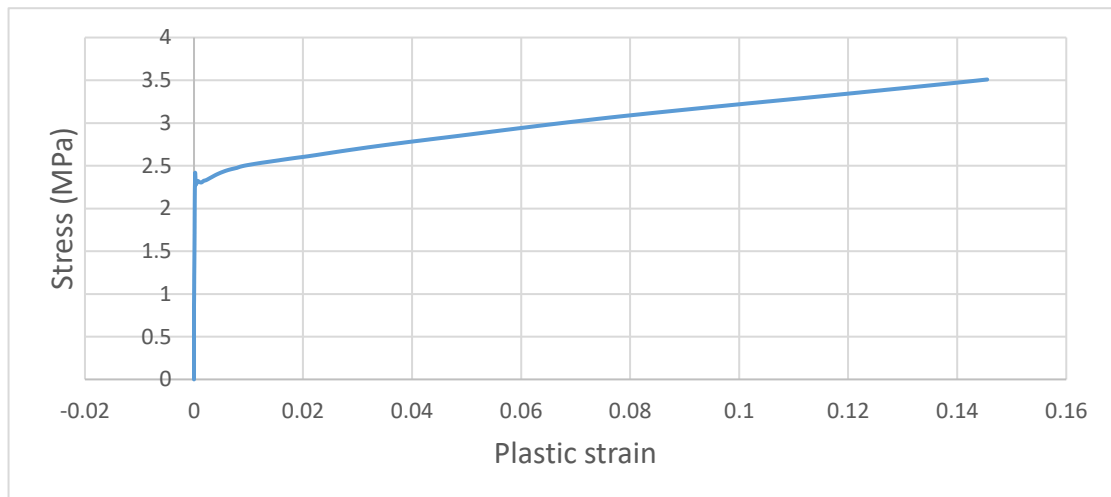
Διάγραμμα 16: *Stress-Plastic strain* χαμηλής ποιότητας γεμίσματος με ράβδους

Στα διαγράμματα *Stress-Plastic strain* με χρήση χαμηλής ποιότητας γεμίσματος παρατηρούμε ότι το μοντέλο εισέρχεται στην πλαστική περιοχή και στις δύο

περιπτώσεις όταν φτάνει στην μέγιστη τάση του και πιο συγκεκριμένα πριν την ενίσχυση αν και ασκείται στο μοντέλο μεγαλύτερη πίεση ίση με 0.88 MPa σε σχέση με τα 0.33 MPa της μετέπειτα ενίσχυσης η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται από τα 0.0078 mm στα 0.021 mm.

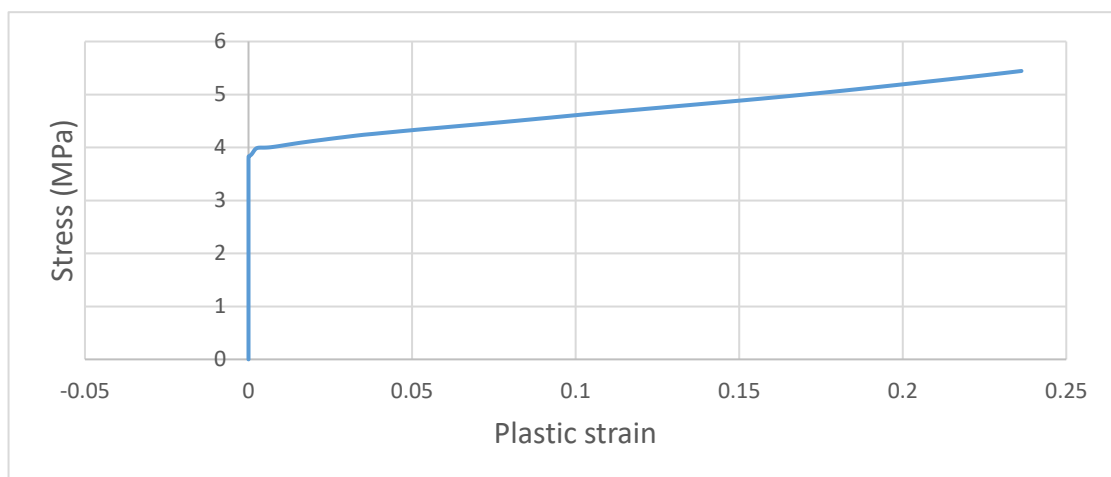
➤ **ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ**

1) Τοιχοποιία πριν την ενίσχυση με ράβδους



Διάγραμμα 17: Stress-Plastic strain υψηλής ποιότητας γεμίματος χωρίς ενίσχυση

2) Τοιχοποιία μετά την ενίσχυση με 2 μεταλλικές ράβδους



Διάγραμμα 18: Stress-Plastic strain υψηλής ποιότητας γεμίματος με ράβδους

Στην υψηλή ποιότητα γεμίματος (όπου και εδώ η εισαγωγή στην πλαστική περιοχή γίνεται όταν έχουμε τις μέγιστες τιμές των τάσεων) είναι φανερό πως πριν την ενίσχυση η πίεση φτάνει έως τα 2.4 MPa με τιμή πλαστικής παραμόρφωσης ίση με 0.143 ενώ μετά την τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων η επιβαλλόμενη πίεση είναι περίπου 5.5 MPa με αύξηση στην παραμόρφωση και τιμή 0.24.

5.2 Συμπεράσματα διαγραμμάτων μη γραμμικής ανάλυσης

Εξετάζοντας συνολικά τα διαγράμματα Pressure-Stress και Pressure-Plastic strain στο στοιχείο του εξωτερικού επάνω τοιχώματος αλλά και από το διάγραμμα Pressure-U στον κόμβο στο επάνω τοίχωμα παρατηρούμε μια κοινή συμπεριφορά των μοντέλων τοιχοποιίας ανεξαρτήτως από το μέγεθος που μετράται (τάσεις Von Mises, πλαστική παραμόρφωση, μετατοπίσεις). Πιο συγκεκριμένα κατά τη χρησιμοποίηση χαμηλής ποιότητας γεμίματος ο αλγόριθμος εκτελεί λιγοστά βήματα καθώς πριν την ενίσχυση με τις δύο μεταλλικές ράβδους ασκείται το 6.8% της σταδιακά επιβαλλόμενης πίεσης των 10 MPa ενώ μετά την ενίσχυση το ποσοστό της πίεσης φτάνει μόλις το 3.4%. Μάλιστα σε αυτή την περίπτωση γεμίματος παρατηρείται μία περίεργη συμπεριφορά του υλικού καθώς μετά την ενίσχυση η πλαστική παραμόρφωση και οι μετατοπίσεις λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τα μοντέλα πριν την ενίσχυση ενώ μάλιστα ο αλγόριθμος έχει εκτελέσει λιγότερα βήματα. Εξάιρεση αποτελούν τα διαγράμματα για τις τάσεις Von Mises όπου πριν την ενίσχυση έχουμε μεγαλύτερες τιμές από ότι μετά την ενίσχυση με την εκτέλεση περισσότερων βημάτων.

Αντιθέτως με τη χρησιμοποίηση της υψηλής ποιότητας γεμίματος βλέπουμε ότι πριν την ενίσχυση στην τοιχοποιία ασκείται το 48% της πίεσης που ιδανικά θέλουμε να ασκήσουμε, ενώ αφού ενισχύθηκε η τοιχοποιία το ποσοστό πίεσης αυξάνεται στο 65% δηλαδή από 4.8 MPa σε 6.5 MPa με αύξηση και στις μέγιστες τιμές του κάθε μεγέθους πριν να τερματιστεί ο αλγόριθμος. Επίσης, εξετάζοντας τα διαγράμματα Stress-Plastic strain παρατηρούμε ότι τα μοντέλα συμπεριφέρονται με τρόπο όμοιο με τα προαναφερθέντα διαγράμματα όπου στην χαμηλή ποιότητα γεμίματος ενώ οι τάσεις αυξάνονται, οι τιμές της πλαστικής παραμόρφωσης μειώνονται αρκετά εν αντιθέσει με την υψηλή ποιότητα όπου η αύξηση στις τάσεις προκαλεί όπως είναι λογικό και αύξηση στις παραμορφώσεις.

Έτσι, φαίνεται πως η χρήση χαμηλής ποιότητας γεμίματος δεν είναι αξιόπιστη ως προς την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων καθώς τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων φαίνεται να μην απαντούν ξεκάθαρα ως προς την χρησιμότητα των μεταλλικών ράβδων στην γενική αντοχή των μοντέλων τοιχοποιίας. Η υψηλή ποιότητα γεμίματος και ειδικά το ενισχυμένο με ράβδους μοντέλο από την άλλη πλευρά, μας βοηθά να εξάγουμε κρίσιμα και πιο ακριβή συμπεράσματα ως προς την χρησιμότητα των ράβδων αφού η τοποθέτησή τους φαίνεται να επιδρά θετικά στον αλγόριθμο, καθώς τερματίζεται αργότερα συγκριτικά με την απουσία ενίσχυσης και έχοντας τρέξει το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης σε ποσοστό 65%, άρα επιδρά θετικά και στην συνολική αντοχή της κατασκευής.

Εν κατακλείδι και όσον αφορά την υψηλή ποιότητα γεμίσματος, παρόλο που ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει, λόγω της τιμής της ασκούμενης πίεσης των 10 MPa, παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα Pressure-Plastic strain για το στοιχείο στο επάνω τοίχωμα, ότι με την χρήση των μεταλλικών ράβδων επιτυγχάνεται η καθυστέρηση στην πλαστική παραμόρφωση σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα για το μη ενισχυμένο μοντέλο αφού πριν την ενίσχυση ξεκινά η παραμόρφωση στα 2.3 MPa ενώ μετά την ενίσχυση στα 4.1 MPa. Βέβαια στα διαγράμματα Pressure-Stress και Pressure-U δεν σημειώνονται σημαντικές διαφορές ως προς τις τάσεις και τις μετατοπίσεις, γεγονός που οφείλεται πιθανώς στον αριθμό των ράβδων καθώς με την χρήση περισσότερων μεταλλικών ράβδων και σε άλλα σημεία της τοιχοποιίας θα παρατηρούσαμε μεγαλύτερες διαφορές και μείωση στις τιμές αυτών των μεγεθών που ασκούνται στο επιλεγμένο στοιχείο και στον κόμβο του επάνω τοιχώματος.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R.A., Silva, D.V., Oliveira & P.B., Lourenço, On the strengthening of three-leaf stone masonry walls, ISISE, University of Minho, Guimarães, Portugal, Structural Analysis of Historic Construction – D’Ayala & Fodde (eds) © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46872-5
- [2] M. R., Valluzzi, F., da Porto and C., Modena, Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls , Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università di Padova, Padova, Italy, *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, Vol. **37**, April 2004, pp 184-192
- [3] D.V., Oliveira, R.A., Silva, E., Garbin, P.B., Lourenço, Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research
- [4] Tirupathi, R., Chandrupatla, Ashok, D., Belegundu, Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία Τρίτη Αμερικανική Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος , 2005
- [5] Σταυρουλάκης Γεώργιος, Ε., Εκπαιδευτικό υλικό προπτυχιακού μαθήματος Υπολογιστικής Μηχανικής του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και διοίκησης
- [6] SolidWorks, <https://en.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>
- [7] Abaqus 6.12 Getting Started With Abaqus, Interactive Edition, SIMULIA
- [8] Abaqus 6.14 Documentation, SIMULIA
- [9] Von Mises Yield Criterion, https://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion