

«Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας»
«Σεισμική Μηχανική και Αντισεισμικές Κατασκευές (ΣΜΑ)»

Διπλωματική Εργασία

«Διερεύνηση μεθόδων αποκατάστασης του ιερού ναού
Μεταμορφώσεως του Σωτήρος στο ιστορικό κέντρο της
Θεσσαλονίκης μετά από σεισμική διέγερση»

Αρβανιτάκη Τριανταφυλλιά

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Κατάκαλος



Πάτρα, Φεβρουάριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας (Τριανταφυλλιάς Αρβανιτάκη) που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Διερεύνηση μεθόδων αποκατάστασης του ιερού ναού
Μεταμορφώσεως του Σωτήρος στο ιστορικό κέντρο της
Θεσσαλονίκης μετά από σεισμική διέγερση»

Τριανταφυλλιά Αρβανιτάκη

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Κατάκαλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Αριστοτέλειου
Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Ρεπάπης

Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής
Αττικής

Πάτρα, Φεβρουάριος 2026



Ευχαριστίες

«Ευχαριστίες οφείλονται στον επιβλέποντα της διπλωματικής κ. Κωνσταντίνο Κατάκαλο – Αναπλ. Καθ. ΑΠΘ, στον κ. Λάζαρο Μελίδη Πολιτικό μηχανικό – ερευνητή και στην Κωνσταντίνα Παλαιολόγου Πολιτικό Μηχανικό για την καθοδήγηση και την συνδρομή τους, καθώς και στον σύζυγό και στον γιο μου για την υπομονή και την ανοχή που μου έδειξαν όλο αυτό το διάστημα»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη διερεύνηση μεθόδων αποκατάστασης του ιερού βυζαντινού ναού της Μεταμόρφωσης του Σωτήρος που βρίσκεται στη συμβολή των οδών Παλαιών Πατρών Γερμανού και Εγνατίας στη Θεσσαλονίκη καθώς και στη μελέτη σεισμικής αποτίμησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος ναός είχε υποστεί σοβαρές κατά το σεισμό της Θεσσαλονίκης το 1978 καθώς και από προγενέστερους σεισμούς. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις στερέωσης περί το 1981, οι οποίες λαμβάνονται υπόψιν και αναλύονται στην παρούσα μελέτη και διπλωματική εργασία. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ανάλυσης και αποτίμησης του ναού με σύγχρονα εργαλεία (ABAQUS) και μεθόδους. Επίσης θα διερευνηθούν μέθοδοι αποκατάστασης του ναού με σύγχρονα υλικά. Οι έλεγχοι επάρκειας θα πραγματοποιηθούν σύμφωνα με τους σύγχρονους ισχύοντες κανονισμούς. Απώτερος στόχος είναι η βελτίωση της σεισμικής φέρουσας ικανότητας του ναού.

Λέξεις – Κλειδιά

Τοιχοποιία, Τρούλος, Αποτίμηση, Πρόταση, Ενισχύσεις

« Restoration methods for the Holy Church of the Savior in the Historical Center of Thessaloniki after Seismic Activity»

Triantafyllia Arvanitaki

Abstract

The present master thesis refers to the investigation of restoration methods for the Holy Church of the Savior, located at the intersection of Paleon Patron Germanou and Egnatia streets in Thessaloniki, as well as on the study of its seismic assessment. It should be noted that the church suffered significant damage during the 1978 Thessaloniki earthquake, as well as from earlier seismic events. For this reason, structural reinforcement interventions were carried out around 1981, which are taken into consideration in the present study.

The main objective of this thesis is the analysis and seismic assessment of the church using modern tools (ABAQUS) and methodologies. The structural adequacy checks will be performed in accordance with current seismic codes and standards. The ultimate goal is to enhance the seismic load-bearing capacity of the monument.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	iii
Abstract.....	v
Περιεχόμενα	vii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	vii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Δομή της εργασίας.....	1
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	3
2.1 Ιστορικά στοιχεία του ναού	3
2.2 Περιγραφή του μνημείου	
2.3 Υφιστάμενες υλοποιημένες επεμβάσεις στο ναό, φάσεις κατασκευής.....	4
2.4. Περιγραφή των φθορών πριν και μετά την καθαίρεση των νεότερων επιχρισμάτων	
3 Αποτύπωση φέροντος οργανισμού και Παθολογίας του ναού.....	17
3.1 Τρόπος δόμησης τοιχοποιίας και θολοδομίας	17
3.2 Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υφιστάμενων υλικών.....	19
3.3 Εκτίμηση αντοχών υφιστάμενης τοιχοποιίας	20
4 Τεκμηρίωση Δομικών στοιχείων του ναού	21
4.1 Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας.....	
4.2 Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας	
4.3 Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας	

- 4.4 Παράμετροι τοιχοποιίας (Μέτρο ελαστικότητας, Λόγος Poisson).....
- 4.5 Θεμελίωση και έδαφος.....
- 5 Ανάλυση κτιριακού μοντέλου του ναού.....
- 5.1 Προσομοίωση του φέροντος οργανισμού.....
- 5.2 Φορτία
- 5.3 Συνδυασμοί δράσεων
- 6 Σεισμική αποτίμηση και παρουσίαση αποτελεσμάτων για την αρχική μορφή του μνημείου
- 6.1 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το Ίδιο Βάρος (“Job 1”)
- 6.2 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_x+0.3E_z$ (“Job 2”)
- 6.3 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_x-0.3E_z$ (“Job 3”)
- 6.4 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_x+0.3E_z$ (“Job 4”)
- 6.5 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_x-0.3E_z$ (“Job 5”)
- 6.6 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_z +0.3 E_x$ (“Job 6”)
- 6.7 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_z -0.3 E_x$ (“Job 7”)
- 6.8 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_z +0.3 E_x$ (“Job 8”)
- 6.9 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_z -0.3 E_x$ (“Job 9”)
- 6.10 Αποτελέσματα ελέγχων
- 7 Σεισμική αποτίμηση και παρουσίαση αποτελεσμάτων για την μορφή του μνημείου μετά από ενισχύσεις περί το 1936
- 7.1 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το Ίδιο Βάρος (“Job 11”)
- 7.2 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_x+0.3E_z$ (“Job 22”)
- 7.3 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_x-0.3E_z$ (“Job 33”)
- 7.4 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_x+0.3E_z$ (“Job 44”)
- 7.5 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_x-0.3E_z$ (“Job 55”)
- 7.6 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_z +0.3 E_x$ (“Job 66”)
- 7.7 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_z -0.3 E_x$ (“Job 77”)
- 7.8 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_z +0.3 E_x$ (“Job 88”)
- 7.9 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_z -0.3 E_x$ (“Job 99”)
- 7.10 Συμπεράσματα ελέγχων

8 Προτεινόμενες μέθοδοι αποκατάστασης

8.1 Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ez + 0.3 Ex (Job “enisximeno78”)

9 Συμπεράσματα – Προτάσεις αποκατάστασης

Βιβλιογραφία.....

Συνομογραφίες & Ακρωνύμια

ΚΑΔΕΤ Κανονισμός για Αποτίμηση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση μεθόδων αποκατάστασης του ιερού βυζαντινού ναού της Μεταμόρφωσης του Σωτήρος που βρίσκεται στη συμβολή των οδών Παλαιών Πατρών Γερμανού και Εγνατίας στη Θεσσαλονίκη. Προηγείται η σεισμική αποτίμηση του μνημείου και ακολούθως προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι ενισχύσεως της κατασκευής που μειώνουν την τρωτότητα του μνημείου έναντι σεισμού.

1.2 Δομή της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά περιγράφονται τα ιστορικά στοιχεία του ναού της μεταμορφώσεως του Σωτήρος Θεσσαλονίκης καθώς και οι υλοποιημένες επεμβάσεις στερεώσεως του ναού. Ακολουθεί η υπολογιστική εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας και του τρούλου του μνημείου, λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο δόμησης και τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών. Στη συνέχεια, αξιολογούνται τα δεδομένα και οι πληροφορίες που αφορούν την αποτίμηση του μνημείου, εντασσόμενα σε μια Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων (ΣΑΔ) σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ, η οποία επηρεάζει την επιλογή των μεθόδων προσομοίωσης, ανάλυσης και ελέγχων επάρκειας. Διενεργείται σεισμική αποτίμηση της υπάρχουσας κατασκευής μέσω του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης στο πρόγραμμα ABAQUS. Εφαρμόζονται ελαστικές (ισοδύναμες) στατικές αναλύσεις με καθολικό δείκτη συμπεριφοράς (q) και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας για τα δομικά στοιχεία της τοιχοποιίας και του τρούλου. Τέλος, διερευνώνται οι πιθανοί τρόποι αποκατάστασης του μνημείου. Σημειώνεται, ότι η σεισμική αποτίμηση της κατασκευής πραγματοποιείται για τις εξής περιπτώσεις:

- α) Αρχική μορφή μνημείου στη οποία αποτυπώνεται μεν η σημερινή γεωμετρία του ναού με τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών δε της αρχικής φάσης της κατασκευής του ναού κατά την βυζαντινή περίοδο.
- β) Σημερινή γεωμετρία του μνημείου με τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επισκευών που υλοποιήθηκαν περί το 1936 μετά από καθίζηση που υπέστη το

μνημείο, πιθανότατα λόγω κάποιου σεισμού, περί το 1933.

γ) Σημερινή γεωμετρία του μνημείου με τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν μετά το σεισμό του 1978.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Ιστορικά στοιχεία του ναού

Ο ναός της Μεταμόρφωσης του Σωτήρος, ο οποίος βρίσκεται στην συμβολή των οδών Εγνατίας και Παλαιών Πατρών Γερμανού στη Θεσσαλονίκη, δυτικά της αψίδας του Γαλερίου, είναι ένα βυζαντινό κτίσμα που διασώθηκε κυρίως μέσω της προφορικής παράδοσης. Από τα χρόνια της Τουρκοκρατίας, το όνομα του ναού διατηρήθηκε, αν και δεν υπήρξε ποτέ μετατροπή του σε τέμενος. Πιθανώς, αυτό οφείλεται στο μικρό μέγεθός του και στην τοποθεσία του, καθώς βρισκόταν εντός του περιβόλου ιδιωτικής οικίας στην οδό Γαλερίου, μέχρι την τελευταία αναθεώρηση του ρυμοτομικού σχεδίου της περιοχής. Σύμφωνα με τον κ. Τάττη, ο ναός της Μεταμόρφωσης του Σωτήρος περιλαμβάνεται στον κατάλογο των ιερών εκκλησιών της Κοινότητας Θεσσαλονίκης ως εξάρτημα της Ιεράς Εκκλησίας Παναγούδας στην οποία υπάγεται. Στο ίδιο άρθρο αναφέρεται η παράδοση των Θεσσαλονικέων να βαπτίζουν τα παιδιά τους στο ναό αυτό, ιδιαίτερα τα βρέφη οικογενειών που είχαν χάσει προηγουμένως άλλα παιδιά, δίνοντας στα νεοφώτιστα το όνομα του Σωτήρος. Επίσης, πληροφορίες αναφέρουν ότι ο ναός ανακαινίστηκε και διακοσμήθηκε με εικόνες, χάρη σε δωρεά της οικογένειας Κατσαπιάτου από τη Ρουμανία, η οποία διέθετε σπίτι κοντά στο ναύδριο. Αργότερα, το σπίτι αυτό πέρασε στην ιδιοκτησία της οικογένειας Κοπάνου, η οποία το 1936, με δωρεά, απέκτησε την κυριότητα του ναού και του γηπέδου πάνω στο οποίο βρίσκεται, μαζί με τα αφιερώματα και τις εικόνες που φυλάσσονται στον ναό της Παναγούδας. Παλαιότεροι μελετητές έχουν ταυτίσει τον ναό της Μεταμόρφωσης με το μονύδριο του Σωτήρος "του κυρ Κυρού", το οποίο αναφέρεται σε Χρυσόβουλο του Ιωάννη Ε' Παλαιολόγου από το 1364 και σώζεται στη Μονή Βατοπεδίου. Στο Χρυσόβουλο ορίζεται ότι ο θεός του αυτοκράτορα πρωτοστράτωρ κυρ Μανασής ο Ταρχανειώτης θα κατείχε και θα επιστατούσε το μονύδριο μέχρι τον θάνατό του, μετά τον οποίο το μονύδριο θα παραχωρείτο στη Μονή Βατοπεδίου. Ωστόσο, ο Α. Ξυγγόπουλος, ο οποίος δημοσίευσε το μνημείο, απορρίπτει την ταύτιση αυτή και υποστηρίζει ότι πρόκειται για παρεκκλήσιο που ανήκε σε μεγαλύτερο μοναστηριακό συγκρότημα, το οποίο ταυτίζει με τη Μονή του κυρ Ιωήλ, μέρος της οποίας πέρασε στην κατοχή ιδιωτών μετά την Άλωση της Θεσσαλονίκης. Αυτή η άποψη ακολουθήθηκε και από νεότερους ερευνητές. Σχετικά με την αρχιτεκτονική του ναού, η σημερινή του μορφή παρουσιάζει έναν τετραπλεύρο σχεδιασμό, όπου καμία πλευρά δεν είναι παράλληλη ή κάθετη σε σχέση με τις άλλες.

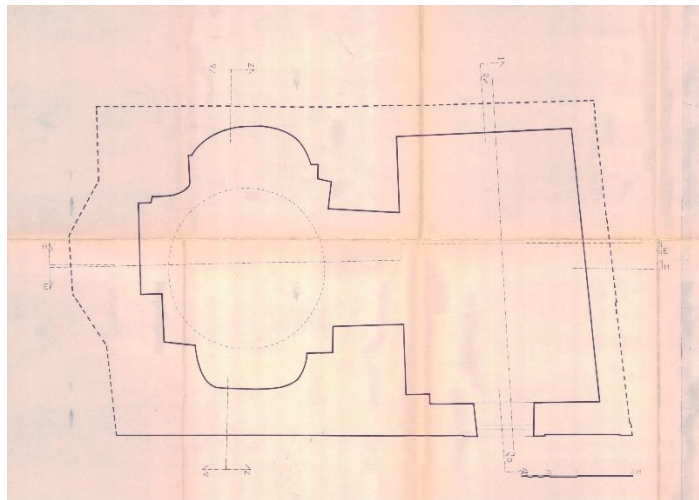
Η απόκλιση από την παραλληλία είναι μικρότερη μεταξύ της βόρειας και της νότιας πλευράς (περίπου 6°), ενώ είναι μεγαλύτερη μεταξύ της δυτικής και της ανατολικής (περίπου 9°). Χαρακτηριστικό είναι ότι η νότια και η ανατολική πλευρά δεν είναι ευθύγραμμες, ενώ η ανατολική πλευρά διαφοροποιείται από τις άλλες λόγω της ημιεξαγωνικής κόγχης του Ιερού. Ο ναός σήμερα αποτελείται από τον κυρίως ναό (το αρχικό κτίσμα) και τον μεταγενέστερο νάρθηκα. Η συνολική επιφάνεια του μνημείου είναι περίπου $9,29\mu. \times 6,04\mu.$, με τον νάρθηκα να έχει ελαφρώς μεγαλύτερο εσωτερικό χώρο από τον κυρίως ναό. Η προσπέλαση στο ναό γίνεται μέσω του νάρθηκα από τη βόρεια πλευρά, ενώ πάνω από την τοξωτή είσοδο υπάρχει μια μαρμάρινη πλάκα που καταγράφει την ιστορική αναστήλωση του ναού το 1936.

2.2 Περιγραφή του μνημείου

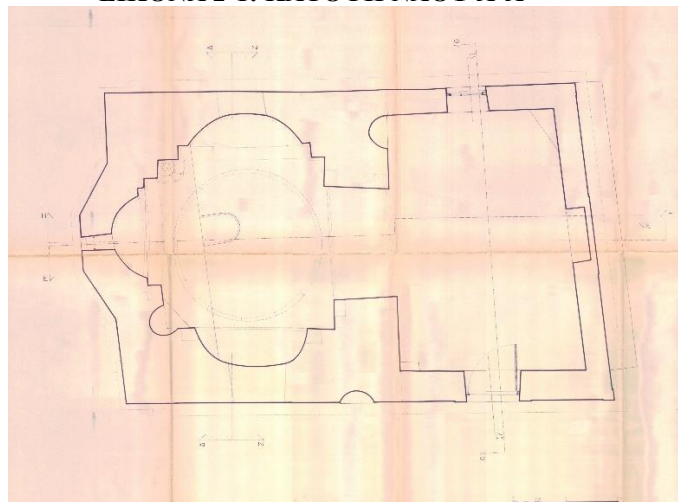
Ο ναός της Μεταμορφώσεως του Σωτήρος παρουσιάζει σήμερα σε κάτοψη την μορφή ενός τετραπλεύρου, με καμία πλευρά να είναι παράλληλη ή κάθετη προς τις άλλες. Η απόκλιση από την παραλληλία είναι μικρότερη μεταξύ της βόρειας και νότιας πλευράς (περίπου 6°), ενώ αυξάνεται στη δυτική και ανατολική πλευρά (περίπου 9°). Επιπλέον, η νότια και η ανατολική πλευρά δεν είναι ευθύγραμμες, με την ανατολική να διαφοροποιείται λόγω της ημιστεγασμένης κόγχης του Ιερού. Το τρέχον σχήμα του κτιρίου περιλαμβάνει τον κυρίως ναό (αρχικό κτίσμα) και τον μεταγενέστερο νάρθηκα. Οι γενικές διαστάσεις του μνημείου είναι περίπου $9,29\mu. \times 6,04\mu.$ (ΕΙΚΟΝΕΣ 2-1,2-2,2-3), με τον κυρίως ναό και τον νάρθηκα να έχουν σχεδόν το ίδιο εμβαδόν εσωτερικού χώρου, ο νάρθηκας βέβαια είναι λίγο μεγαλύτερος. Η πρόσβαση στο ναό γίνεται μέσω του νάρθηκα από τη βόρεια πλευρά του. Πάνω από την τοξωτή είσοδο υπάρχει μια μαρμάρινη πλάκα διαστάσεων $0,38 \times 0,655\mu.$, με την εξής επιγραφή: "ΤΟ ΜΟΝΥΔΡΙΟΝ ΤΟΥΤΟ/ΤΗΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΤΟΥ ΣΩΤΗΡΟΣ/ΕΔΩΡΗΘΗ/ΕΙΣ ΤΟΝ ΙΕΡΟΝ ΝΑΟΝ ΠΑΝΑΓΟΥΔΑΣ/ΥΠΟ ΤΩΝ ΑΔΕΛΦΩΝ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ι. ΚΟΠΑΝΟΥ/ΑΝΕΣΤΥΛΩΘΗ ΔΕ/ΔΑΠΑΝΑΙΣ ΑΥΤΟΥ ΤΟΥ ΝΑΟΥ. ΕΠΙΤΡΟΠΕΥΟΝΤΩΝ/ΜΙΧΑΗΛ Γ. ΛΙΟΝΤΑ/ΚΩΣΤΑΚΗ ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ/ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΚΑΡΑΓΚΟΥΝΙΔΟΥ/ΑΡΙΣΤΕΙΔΟΥ ΒΟΥΛΟΥΒΟΥΤΗ/ΜΗΝΙ ΔΕΚΕΜΒΡΙΩ 1936". Ακριβώς απέναντι από την είσοδο, στη νότια πλευρά του νάρθηκα, ένα τοξωτό παράθυρο λειτουργεί ως η μοναδική πηγή φωτισμού. Ένα ακόμη ψηλό τοξωτό άνοιγμα είχε προγραμματιστεί στη δυτική πλευρά, αλλά έκλεισε πριν ολοκληρωθούν οι εργασίες στο ναό, όπως αποδεικνύεται από την ομοιογένεια του τρόπου και των υλικών

δόμησης, και τελικά πήρε τη μορφή ορθογωνικής κόγχης. Ο νάρθηκας και ο κυρίως ναός συνδέονται μέσω ενός ελεύθερου ανοίγματος πλάτους 2,10 μ., το οποίο καλύπτεται με χαμηλωμένη καμάρα. Οι σιδερένιοι ελκυστήρες που υπάρχουν στις γενέσεις των τόξων μαρτυρούν προηγούμενη επέμβαση σε αυτήν την πλευρά, ή όποια αποτελούσε τη δυτική πρόσοψη του αρχικού τμήματος του ναού. Η ημικυκλική κόγχη δεξιά του ανοίγματος προσδίδει πλαστικότητα στην επιφάνεια πριν την ανέγερση του νάρθηκα, όπως και η αντίστοιχη που υπάρχει στη βόρεια πλευρά. Η επίπεδη επιχρισμένη οροφή καλύπτει τα ξύλινα ζευκτά της στέγης του νάρθηκα. Το αρχικό τμήμα του μνημείου έχει τη μορφή ενός τρίκογχου εγγεγραμμένου ναού με συνεπτυγμένες κεραίες. Οι κόγχες της βόρειας και νότιας πλευράς (χώροι) είναι σχετικά ρηχές. Ιδιαίτερα η βόρεια πλευρά χαρακτηρίζεται από έλλειψη κανονικότητας, τόσο στην κάτοψη όσο και στην ανωδομή, λόγω μεταγενέστερων επισκευών. Η κύρια πηγή φωτισμού του ναού προέρχεται από τα οκτώ μονόλοβα παράθυρα του τρούλου, τα οποία διατρυπούν το ψηλό τύμπανο (2,75 μ.) με σχεδόν ίση αναλογία κενού και πλήρους. Ο φωτισμός συμπληρώνεται από το μικρό μονόλοβο παράθυρο της κόγχης του ιερού και από ένα άνοιγμα στο τύμπανο του βόρειου αψιδώματος. Το κυλινδρικό τύμπανο έχει διάμετρο 2,75 μ. στη βάση και 2,55 μ. στην κορυφή, παρουσιάζοντας κάποια μείωση. Επίσης, οι παρειές των κεραιών του ναού αποκλίνουν από την κατακόρυφο από το ύψος των γενέσεων των τόξων μέχρι τη βάση τους. Εσωτερικά, δύο γείσα περιβάλλουν τον κυρίως ναό: ένα μαρμάρινο στη βάση του τρούλου και ένα πλίνθινο στη γένεση των κογχών. Το γείσο του τρούλου παρουσιάζει πτώση 13 εκ. από την οριζόντια γραμμή στο σημείο της έδρασης στο βόρειο τόξο. Ανάλογες κλίσεις παρατηρούνται και στο τύμπανο του τρούλου, που είναι ορατές εξωτερικά, ιδιαίτερα από τη δυτική πλευρά. Ο χώρος του ιερού ήταν χωρισμένος με εσωτερικό τέμπλο, το οποίο έχει απομακρυνθεί. Ωστόσο, διασώζονται τα ίχνη του στο υπερώο και οι παλαιές δεσποτικές εικόνες του Χριστού και της Παναγίας, μεταβυζαντινής εποχής, είχαν κλαπεί πολύ πριν το μεγάλο σεισμό. Η τράπεζα είναι ενσωματωμένη στην αψίδα. Στο βόρειο τμήμα της ανατολικής πλευράς βρίσκεται η μικρότερη κόγχη της πρόθεσης και στο νότιο μέρος υπάρχει μικρό χωνευτήρι προσαρτημένο στη ΝΑ πλευρά. Εξωτερικά, το κτίσμα παρουσιάζει έντονη και γραφική διαφοροποίηση των επιφανειών του, ιδιαίτερα στα υψηλότερα σημεία του τρούλου. Μια διπλή οδοντωτή ταινία περιβάλλει το μνημείο (κυρίως τον ναό και τον νάρθηκα) με εναλλαγή θέσης και καμπύλης γραμμής. Αυτή η πλαστική διάθεση συνεχίζεται και κορυφώνεται στην περιοχή του τρούλου, όπου τα πολλαπλά

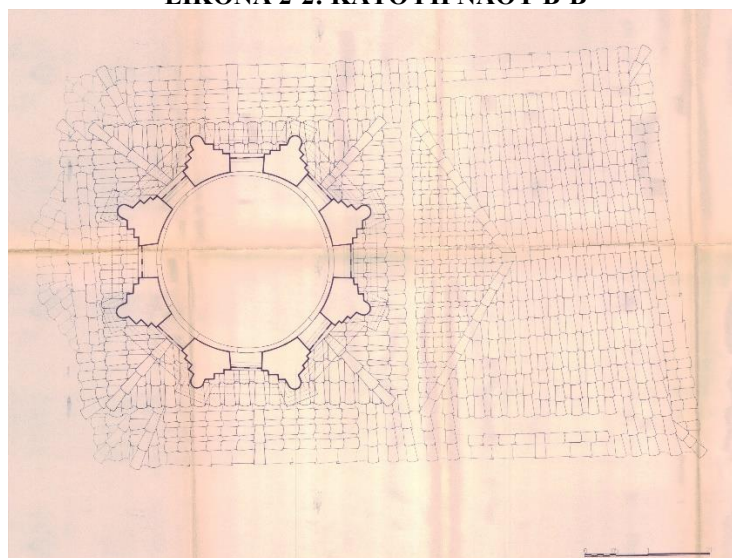
επίπεδα με εσοχή, η τετραγωνική βάση και η οκταγωνική διαμόρφωση του τυμπάνου, οι ημίκιονες και γενικά η έντονη διαφοροποιημένη πλίνθινη τοιχοδομία αναδεικνύει τον βυζαντινό χαρακτήρα του ναού. Στις τρεις από τις 4 πλευρές του ναού τονίζεται η οριζοντιότητα της σύνθεσης, με τον χωρισμό της τοιχοποιίας σε δύο τμήματα και μια συνεχή, περιμετρική λεπτή ταινία από σοβά. Το κάτω τμήμα είναι σοβατισμένο και βαμμένο με κόκκινο πομπηιανό χρώμα, ενώ από πάνω κυριαρχεί η εντύπωση της συνεχούς πλίνθινης τοιχοποιίας, η οποία σε ώριμα τμήματα είναι αληθινή και σε άλλα εικονική, σχηματισμένη δηλαδή πάνω σε λεπτό στρώμα σοβά. Στη βόρεια και νότια πλευρά διαγράφονται εξωτερικά τα τόξα μετώπου, τα τμήματα των οποίων κοσμούνται με πλίνθινο σταυρό. Ιδιαίτερη πλαστικότητα παρουσιάζει το ανατολικό τμήμα του ναού με την ημιεξαγωνική κόγχη, το πλίνθινο τοξοτό υπέρθυρο και τους διαφοροποιημένους σε χαμηλότερο επίπεδο στεγασμένους γωνιαίους πεσσούς. Τα υλικά κατασκευής του ναού είναι κυρίως πέτρα στα χαμηλά μέρη και πλίνθοι διαφόρων κατηγοριών και ποιότητας στα ανώτερα. Μάλιστα, οι οδοντωτές ταινίες του γείσου διατηρούνται σε πολύ καλή κατάσταση. Αντίθετα, οι πλίνθοι του γείσου του τετραγώνου της βάσης του τρούλου, της κόγχης και των τεσσάρων πλευρών (πάχους 4-5 εκ.) παρουσιάζουν απολεπίσεις στις ορατές επιφάνειες. Ιδιαίτερα για τη διαμόρφωση των κυλινδρικών του τρούλλου χρησιμοποιήθηκαν πλίνθοι με κυκλική πλευρά. Σαν συνδετικό υλικό κυριαρχεί η λάσπη, η οποία έχει χάσει την συνεκτική της ικανότητα και δημιουργεί σοβαρά προβλήματα για τη συνοχή της τοιχοδομίας. Μόνο το αρμολόγημα έχει γίνει από ασβεστοκονίαμα σε βάθος 2- 4 εκ. Ο ναός φαίνεται ότι αρχικά είχε τοιχογραφίες, όχι μόνο στον τρούλο, οι οποίες, λόγω μαυρίσματος, δεν ήταν ορατές στους μελετητές, αλλά και στις χαμηλότερες επιφάνειες του κυρίως ναού, όπως δείχνουν δείγματα στη ΒΔ γωνία της κόγχης και στο νότιο εσωρράχιο της δυτικής κεραίας. Οι τοιχογραφίες του τρούλλου είναι αξιόλογες, καθώς το εικονογραφικό τους πρόγραμμα και η τεχνοτροπία τους περιλαμβάνουν θέματα όπως η "Ανάληψη στο ημισφαίριο, προφήτες ανάμεσα στα παράθυρα, θεία λειτουργία στις ποδιές των παραθύρων". Η τεχνική των τοιχογραφιών αυτών είναι του secco και η κατάσταση τους παρουσιάζει προβλήματα συντήρησης.



ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΚΑΤΟΨΗ ΝΑΟΥ Α-Α



ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΚΑΤΟΨΗ ΝΑΟΥ Β-Β



ΕΙΚΟΝΑ 2-3: ΚΑΤΟΨΗ ΝΑΟΥ Γ-Γ

2.3 Υφιστάμενες υλοποιημένες επεμβάσεις στον ναό, φάσεις κατασκευής

Η σημερινή μορφή του ναού (ΕΙΚΟΝΕΣ 2-3 έως 2-11), είναι το αποτέλεσμα διαφόρων προσθηκών και επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν στο αρχικό κτίσμα κατά τη διάρκεια του χρόνου. Παρόλα αυτά, ο κύριος ναός διατηρεί τα χαρακτηριστικά του τρίκογχου εγγεγραμμένου τύπου, ο οποίος είναι γνωστός στη βυζαντινή ναοδομία για μνημεία μικρής κλίμακας. Ορισμένες ατέλειες στα επιμέρους στοιχεία υποδηλώνουν τις αλλοιώσεις που υπήρξαν στο παρελθόν, οι οποίες όμως δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν ακριβώς, καθώς όλες οι επιφάνειες καλύπτονταν από νεότερα επιχρίσματα.



ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ ΝΑΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ ΝΑΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2-6: ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ ΝΑΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2-7: ΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ ΝΑΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2-8: ΝΟΤΙΑ ΟΨΗ ΝΑΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2-9: ΒΟΡΕΙΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΓΩΝΙΑ



ΕΙΚΟΝΑ 2-10: ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΝΑΟΥ (ΙΕΡΟ)



ΕΙΚΟΝΑ 2-11: ΤΡΟΥΛΛΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ

Ανάμεσα στις μορφές που διαφοροποιούνται σε σχέση με τα βυζαντινά πρότυπα, μπορούν να αναφερθούν οι εξής σημαντικές:

Η διαφορετική κάτοψη της κόγχης του βόρειου χορού.

Η διαφορετική διαμόρφωση της ανωδομής της κόγχης του βόρειου χορού σε σύγκριση με αυτή της νότιας.

Η παρουσία ορθογωνικού ανοίγματος σε τμήμα της επιφάνειας στο τεταρτοσφαίριο της βόρειας κόγχης (εικόνες 1.05, 1.06).

Η χαμηλωμένη ημικυλινδρική καμάρα της δυτικής κεραίας.

Τα μειωμένα πλάτη των τόξων μεταξύ του αριστερού τμήματος της άψιδας του Ιερού.

Η παρουσία κοσμήτη σε ύψος ανώτερο των γενέσεων, όπως στο βόρειο χορό .

Η παρουσία σιδηρών ελκυστήρων.

Επίσης διαπιστώθηκε ότι τα τόξα της βόρειας και νότιας κεραίας είχαν αντικατασταθεί με νεότερα, χαμηλωμένα, που στήριζαν τα υπερκείμενα.

Οριζόντια και στο ύψος του κλειδιού κάθε τόξου τοποθετήθηκαν ξύλινα δοκάρια για να ανακουφίζουν τα ευαίσθητα σημεία των τόξων από τα μεγάλα φορτία. Χρησιμοποιήθηκαν ξύλα μεγάλων διατομών στις έδρες των νέων τόξων. Η διαφορετική ελαστικότητα των ξύλινων στοιχείων ήταν η κύρια αιτία των γειτονικών

ρωγμών. Η αιτία και ο χρόνος της καταστροφής δεν είναι γνωστά. Γίνεται η υπόθεση ότι κάποιος σεισμός προκάλεσε την καθίζηση του βόρειου τμήματος του ναού. Ο ΒΑ πεσσός κλίνει προς τα ανατολικά, παρασύροντας τα αντιστηρίγματα των κεραίων και μεγάλα τμήματα από τις παραπλεύρους κόγχες. Ακριβείς μετρήσεις στη στεφάνη του τρούλου και στο επίπεδο του κοσμήτη έδειξαν διαφορά ύψους στα δύο άκρα της διαμέτρου Β-Ν 13 εκ. Επίσης, το πλάτος στην ίδια κατεύθυνση, όπως προέκυψε από το μέγεθος των ρωγμών που μετρήθηκαν από το ύψος του κοσμήτη, διευρύνθηκε κατά 7 εκ. Έτσι, η εύκολα αντιληπτή παραμόρφωση του τρούλου του ναού του Σωτήρα ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα της διαπιστωμένης καθίζησης και όχι ως "κακοτεχνία των βυζαντινών μαστόρων". Η έκταση της καταστροφής στο ΒΑ τμήμα του ναού φαίνεται καθαρά στο τόξο της βόρειας κεραίας. Το ανατολικό μισό τμήμα χωρίστηκε και ακολούθησε την έντονη απόκλιση του ΒΑ πεσσού. Ο πεσσός και το τόξο "μετακινήθηκαν" στη νέα τους θέση και έτσι, τουλάχιστον εσωτερικά, διατήρησαν την αυθεντική τους δόμηση στην μετατοπισμένη τους θέση. Η έκταση των παραμορφώσεων του πεσσού στην εξωτερική του επιφάνεια παραμένει άγνωστη. Οι κατακόρυφες επιφάνειες που διαμορφώνουν τη ΒΑ γωνία ανήκουν στις επισκευές του 1936. Ακολουθεί η ανάλυση των φάσεων του ναού της Μεταμορφώσεως του Σωτήρος. Η διάκριση έγινε με βάση τις διαφορές ή προσθήκες που παρατηρήθηκαν στον ναό, τις διαφορετικές ποιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και τους διάφορους τρόπους δόμησης. Συνολικά αναγνωρίστηκαν πέντε φάσεις στον κυρίως ναό και τρεις στον νάρθηκα. Οι δύο τελευταίες φάσεις κάθε τμήματος αντιστοιχούν απόλυτα. Οι δύο του νάρθηκα δεν σχετίζονται με τη δεύτερη ή την πρώτη του κυρίως ναού, αλλά διαχωρίστηκαν και δεν βρέθηκαν κοινά στοιχεία στα υλικά και τον τρόπο δόμησης με καμία από τις δύο. Η προσθήκη του νάρθηκα πιθανώς έγινε ανάμεσα στην πρώτη και δεύτερη φάση του κυρίως ναού ή μεταξύ της δεύτερης και τρίτης φάσης. Πάντως, είναι σχετικά πρώιμη.

Αναλυτικά οι φάσεις του ναού έχουν ως εξής:

Πρώτη φάση – Αρχική μορφή: Τα αυθεντικά τμήματα της βυζαντινής φάσης του ναού αναγνωρίζονται εύκολα από το συνδετικό υλικό, το οποίο είναι απλός πηλός σκούρου χρώματος. Τα κάτω τμήματα, κατασκευασμένα κυρίως από πέτρα και λίγα πλίνθοι, ενισχυμένα με ξυλοδεσιές λεπτής διατομής στις κατακόρυφες παρειές της δυτικής κεραίας. Τόξα και θόλοι είναι κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από πλίνθους, όπως και ολόκληρος ο τρούλος. Η χρήση πηλού ως συνδετικού υλικού στην

κατασκευή τόξων και θόλων σε βυζαντινό κτίσμα προκάλεσε μεγάλη έκπληξη. Φάνηκε, ωστόσο, ότι δεν ήταν το μοναδικό παράδειγμα. Πηλός χρησιμοποιήθηκε και στα καθολικά της μονής Βλατάδων, τουλάχιστον στα χαμηλά του τμήματα. Εσωτερικά προστατεύονταν με το υπόστρωμα των τοιχογραφιών, ενώ εξωτερικά περνούσαν άμεσες ενισχυμένες παχιές αρμολογήματα, όπως αυτό που υπάρχει ακόμα στον τοίχο του ναού του Σωτήρα ή και παχύτερες για πιο ορατές αρμούς, όπως στα σωζόμενα τμήματα της νότιας και δυτικής πλευράς. Για την κατασκευή των τεταρτοσφαιρίων δεν χρησιμοποιήθηκαν ξυλότυποι, όπως φαίνεται από το σύστημα δόμησης από τον νότιο χορό και το μικρό σωζόμενο τμήμα της κόγχης του ιερού. Το πάχος των πλίνθων κυμαίνεται από 2,5 έως 3,2 εκ. Η γενική μορφή της κάτοψης δεν παρουσιάζει προβλήματα. Υπήρχαν δύο προσπελάσεις, μία στη δυτική πλευρά, στον άξονα του ναού και μία δευτερεύουσα στο μέσο της νότιας κόγχης η οποία κλείστηκε μεταγενέστερα. Διακρίνονται καθαρά οι είσοδοι της νότιας αυτής κόγχης τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του ναού, οι παρειές και τα ξύλινα ανώφλια. Προβλήματα παρουσιάζει η κύρια είσοδος στη δυτική πλευρά. Το άνοιγμα είναι υπερβολικά μεγάλο για έναν ναό τόσο μικρών διαστάσεων. Υποστηρίζεται ότι υπήρχε μικρή είσοδος, η οποία διευρύνθηκε όταν προστέθηκε ο νάρθηκας. Εν τούτοις, από στοιχεία που προέκυψαν μετά την καθαίρεση των επιχρισμάτων και τις διερευνητικές τομές που ακολούθησαν, οι παρειές του αρχικού ανοίγματος φαίνονται αδιατάρακτες. Το μεγάλο ελεύθερο άνοιγμα θα μπορούσε να δικαιολογήσει την ύπαρξη σύγχρονου νάρθηκα. Τελικά, αποκλείεται η παραπάνω υπόθεση γιατί η δυτική πλευρά του ναού είναι διαμορφωμένη ως εξωτερική, με αυθεντικά αρμολογήματα στο νότιο τουλάχιστον τμήμα της. Επίσης η ΒΔ και ΝΔ γωνία του κυρίως ναού σχηματίζουν ακμή, όπως έδειξε σχετική διερευνητική τομή.

Η βόρεια κόγχη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έπαθε τις μεγαλύτερες ζημιές. Έχει πάνω της τη σφραγίδα όλων των φάσεων του ναού. Θα ήταν υπερβολικό να αναζητηθεί τρίτη είσοδος. Δεν μπορούμε όμως με την ίδια βεβαιότητα να αποκλείσουμε την ύπαρξη κάποιου ανοίγματος παραθύρου. Το γενικό της σχήμα αποκαθίσταται εύκολα από τα σωζόμενα τμήματα και σε αντιπαραβολή με την απέναντι κόγχη. Η κόγχη του ιερού είναι εσωτερικά ημικυκλική, χωρίς κλειστή τράπεζα, και εξωτερικά ημιεξαγωνική. Δεν εντοπίστηκαν στοιχεία παραθύρου στον άξονα της αψίδας. Η διερευνητική τομή στο εξωτερικό επίχρισμα έδειξε ότι η καταστροφή στην κόγχη είχε προχωρήσει χαμηλά. Το σωζόμενο τμήμα εξωτερικά βρίσκεται κάτω από την ποδιά του σημερινού παραθύρου, αποκλείοντας την ύπαρξη αντίστοιχου παραθύρου σε αυτό το ύψος. Δεν υπάρχουν

ενδείξεις για την ύπαρξη σύγχρονου τέμπλου με τον αρχικό ναό, αν και αυτό δεν μπορεί να αποκλειστεί πλήρως. Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση στη μαρμάρινη βάση του μεταγενέστερου τέμπλου, τρίτης φάσης, καθώς και στη στάθμη του αρχικού δαπέδου, το οποίο υπολογίζεται 40-50 εκ. χαμηλότερα του σημερινού. Αυτό προκύπτει από το ελεύθερο ύψος που θα έπρεπε να έχει η νότια είσοδος καθώς και από το επίπεδο της αρχικής πρόθεσης το οποίο βρίσκεται στη θέση του 23 εκ. πιο χαμηλά της μεταγενέστερης υπερυψωμένης.

Στο ύψος γένεσης των τεταρτοσφαιρίων αναπτυσσόταν περιμετρικά του ναού λεπτός πλίνθινος λοξότμητος κοσμήτης. Αυθεντικά τμήματά του διατηρούνται στη νότια πλευρά, καθώς και στο τμήμα της κόγχης του Ιερού που ανάγεται στην πρώτη οικοδομική φάση. Στον βορειοδυτικό πεσσο σώζονται μόνο τα κατώτερα τμήματα της αρχικής διαμόρφωσης, ενώ η λοξότμηση υπέστη μεταγενέστερη απολάξευση. Από τα τέσσερα λοφία της βάσης του τρούλου, μορφολογική αλλοίωση παρατηρείται αποκλειστικά στο βορειοδυτικό. Κατά την επέμβαση επισκευής του αποδόθηκε με ελαφρώς καμπυλωμένη επιφάνεια, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα, τα οποία διατηρούν σχεδόν επίπεδη μορφή. Ο τρούλος διατηρεί το μεγαλύτερο ποσοστό των αυθεντικών του στοιχείων, παρουσιάζει ωστόσο μεταβολές στη γεωμετρία του. Στην αρχική του χάραξη φαίνεται ότι είχε διαμορφωθεί με δύο κέντρα, εξαιτίας της επιμήκυνσης κατά τον άξονα βορρά-νότου. Κατά την αποκατάσταση της αρχικής μορφής επιλέχθηκε η υιοθέτηση ενός μόνο κέντρου. Η διάμετρος στο επίπεδο των κλειδιών των παραθύρων ήταν μικρότερη από εκείνη στο επίπεδο του κοσμήτη, στοιχείο που υποδηλώνει ότι αρχικά οι πεσσοί του τρούλου είχαν ομοιόμορφη κλίση προς το κέντρο. Λόγω καθίζησης, ο τρούλος απέκτησε έντονη κλίση προς τα βορειοανατολικά. Το ανατολικό τμήμα κατακορυφώθηκε, ενώ το διαμετρικά αντίθετο παρουσίασε αυξημένη κλίση προς το κέντρο. Αντίστοιχες παραμορφώσεις διαπιστώνονται και στον θόλο, του οποίου η αρχική μορφή δεν ήταν αυστηρά ημισφαιρική, αλλά προσέγγιζε περισσότερο τη γεωμετρία της απλής καμπύλης. Από τη γραφική ανάλυση προκύπτει καμπύλη τριών κέντρων. Οι τοιχογραφίες του τρούλου διατηρούνται σχεδόν στο σύνολό τους, εμφανίζουν όμως εκτεταμένες ρηγματώσεις και επιφανειακή συσκότιση, με εξαίρεση το τμήμα της ποδιάς του βορειοδυτικού παραθύρου. Σώζονται επίσης δύο σειρές ξύλινων ελκυστήρων, οι οποίοι αποκαταστάθηκαν και επανατοποθετήθηκαν σε λειτουργική θέση. Οι τοιχογραφημένες επιφάνειες στις παρειές των παραθύρων τεκμηριώνουν τη θέση διακοσμητικών θεμάτων που πλέον έχουν χαθεί. Τέλος, αναγνωρίζεται μικρή υπερύψωση στις ποδιές των παραθύρων.

Στα κατώτερα τμήματα του ναού δεν διατηρούνται τοιχογραφίες. Δύο μικρά αποσπάσματα, ένα στο νότιο εσωράχιο της δυτικής κεραίας και ένα στο βόρειο της ανατολικής, καλύπτονται σήμερα

από νεότερες προσθήκες. Ωστόσο, τα σωζόμενα αυτά τμήματα τεκμηριώνουν ότι το σύνολο των εσωτερικών επιφανειών του ναού έφερε τοιχογραφικό διάκοσμο. Τα αυθεντικά εξωτερικά στοιχεία της πρώτης οικοδομικής φάσης είναι σαφώς περιορισμένα. Από τη δυτική πλευρά απουσιάζει ολόκληρο το τμήμα της ανωδομής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κόγχη δεξιά της εισόδου, η οποία διατηρεί το αρχικό της αρμολόγημα σε σχήμα τόξου. Η ανατολική και βόρεια όψη σώζουν μόνο περιορισμένα τμήματα της πρώτης φάσης στα χαμηλότερα σημεία τους. Το τυφλό τόξο της βόρειας πλευράς, καθώς και το τμήμα με τον διακοσμητικό σταυρό, μαρτυρούν την ύπαρξη αντίστοιχων μορφολογικών στοιχείων ήδη από την αρχική φάση κατασκευής. Όπως προκύπτει από τη νότια όψη, στην εξωτερική πλευρά κάθε χορού υπήρχε ένα τυφλό τύμπανο, από το οποίο σήμερα διατηρούνται μόνο οι γενέσεις του νότιου τόξου.

Το γεγονός ότι στο εσωτερικό του ναού διατηρούνται περισσότερα αυθεντικά στοιχεία σε σύγκριση με το εξωτερικό δεν θα πρέπει να προκαλεί εντύπωση. Εφόσον το μνημείο παρέμεινε για μεγάλο χρονικό διάστημα σε ερειπιώδη κατάσταση, είναι εύλογο ότι αρχικά κατέρρευσαν τα γείσα και στη συνέχεια εκτεταμένα τμήματα της εξωτερικής τοιχοποιίας. Παράλληλα, δεν είναι γνωστή η έκταση των καταστροφών που προκάλεσε ο σεισμός του 1933, ούτε οι επιμέρους αλλοιώσεις που επέφεραν τα συνεργεία κατά τις μεταγενέστερες επεμβάσεις εξωραϊσμού. Πιθανόν, στο πλαίσιο των τότε αρχών αποκατάστασης, να απομακρύνθηκαν στοιχεία τα οποία θα μπορούσαν να είχαν διατηρηθεί, με αποτέλεσμα την απώλεια αυθεντικών χαρακτηριστικών και του ιστορικού χαρακτήρα του μνημείου.

Πρώτη φάση του νάρθηκα

Η ακριβής χρονολόγηση της προσθήκης του πρώτου νάρθηκα στη δυτική πλευρά του κυρίως ναού παραμένει άγνωστη. Ο νάρθηκας είχε κάτοψη σε σχήμα τραπεζίου, με τη μεγάλη του βάση παράλληλη προς τη σημερινή οδό Εγνατία, όπου βρισκόταν και η κύρια είσοδος. Η λιθοδομή του ενισχυόταν με ξυλοδεσιές, όπως προκύπτει από δημοσιευμένη φωτογραφία του Tafrafi. Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιήθηκε πηλός, κατά αντιστοιχία με το βυζαντινό τμήμα του ναού.

Σύμφωνα με το σχέδιο του Ξυγγόπουλου, το ύψος του πρώτου νάρθηκα έφθανε έως την τετράγωνη βάση του τρούλου. Το τμήμα αυτό κατεδαφίστηκε το 1936. Σήμερα διατηρείται ο νότιος τοίχος σε όλο του το μήκος έως το ύψος της σύγχρονης εξωτερικής στάθμης, η νοτιοδυτική γωνία στο ίδιο ύψος, καθώς και μικρό τμήμα του βόρειου τοίχου πλησίον της βορειοανατολικής γωνίας.

Δεύτερη φάση του κυρίως ναού

Κατά τη δεύτερη οικοδομική φάση αποφασίστηκε η κατάργηση της νότιας εισόδου του ναού και

ταυτόχρονα η διάνοιξη νέας, ευρύτερης εισόδου στον άξονα της βόρειας κόγχης. Το γέμισμα της νότιας θύρας, καθώς και οι παρειές της νέας βόρειας εισόδου, κατασκευάστηκαν με λάσπη ενισχυμένη με μικρή ποσότητα ασβέστη.

Η εκτεταμένη καταστροφή του ναού φαίνεται ότι σημειώθηκε μετά την επέμβαση αυτή. Είναι εύλογο ότι η διάνοιξη της νέας εισόδου αποδυνάμωσε σημαντικά τον φέροντα οργανισμό, συμβάλλοντας στην ένταση των βλαβών. Κατά την ίδια περίοδο πραγματοποιήθηκαν επισκευές σε τμήματα της δυτικής όψης, οι οποίες ενδέχεται να συνδέονται με την προσθήκη του νάρθηκα.

Τρίτη φάση του κυρίως ναού

Η τρίτη φάση περιλαμβάνει κυρίως στερεωτικές επεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά τη μεγάλη καταστροφή. Φαίνεται ότι χρονικά απέχει σημαντικά από τη δεύτερη φάση, καθώς στο μεταξύ κρίθηκε αναγκαία η ανύψωση της στάθμης του δαπέδου και η υπερύψωση της βόρειας εισόδου.

Οι στατικές λύσεις που εφαρμόστηκαν βασίστηκαν κυρίως στη χρήση ξύλινων στοιχείων, όπως το ξύλινο υποστύλωμα στο βορειοδυτικό λοφίο, οι ξύλινοι δοκοί στη βόρεια και δυτική κεραία, καθώς και ελκυστήρες. Το κατεστραμμένο νοτιοανατολικό λοφίο στερεώθηκε και η εσωτερική του επιφάνεια διαρθρώθηκε με την τεχνική των «κολλητών κεραμιδιών».

Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιήθηκε πηλός με αυξημένη περιεκτικότητα σε ασβέστη, ενώ για τη στερέωση των ξύλινων στοιχείων εφαρμόστηκε μείγμα ασβέστη και άχυρου για καλύτερη πρόσφυση. Στην ίδια φάση εντάσσεται και η πρώτη τεκμηριωμένη κατασκευή τέμπλου, του οποίου η βάση ενσωματώθηκε στο νέο, ανυψωμένο δάπεδο. Παράλληλα υπερυψώθηκε η πρόθεση και κατασκευάστηκε χωνευτήρι σε επαφή με τον νοτιοανατολικό πεσσό.

Τέταρτη φάση

Η τέταρτη φάση ταυτίζεται με την αναστήλωση του 1936. Σύμφωνα με παλαιό πολεοδομικό σχέδιο της Θεσσαλονίκης και με φωτογραφικό υλικό του Tafrafi, η πρόσβαση στον ναό γινόταν αρχικά από την οδό Γαλερίου, μέσω προσκτίσματος στη βόρεια πλευρά, και όχι απευθείας. Η δυτική πλευρά του παλαιού νάρθηκα ακολουθούσε την οικοδομική γραμμή του μικρού αυτού δρόμου.

Η διάνοιξη της διαγωνίου οδού (σημερινή Π.Π. Γερμανού), στο πλαίσιο εφαρμογής του σχεδίου Hebrard, καθόρισε σε μεγάλο βαθμό τη μετέπειτα τύχη του μνημείου. Η βορειοδυτική γωνία του νάρθηκα προεξείχε στο πεζοδρόμιο και η δυτική του όψη τέμνε σχεδόν κάθετα τον άξονα της νέας οδού. Ως αποτέλεσμα, ο παλαιός νάρθηκας κατεδαφίστηκε και αντικαταστάθηκε από τον σημερινό, ορθογωνικής μορφής και ενταγμένο στο νέο πολεοδομικό σχέδιο. Πιθανόν ο σεισμός

του 1933 να αποτελέσει την αφορμή για την επέμβαση αυτή. Με την αναστήλωση, το μνημείο μεταβλήθηκε ουσιαστικά ως προς τον χαρακτήρα του. Η δυτική και η βόρεια όψη απέκτησαν κύρια σημασία, ενώ η είσοδος που οδηγούσε απευθείας στον κυρίως ναό καταργήθηκε. Διατηρήθηκε μία μόνο πρόσβαση από την οδό Εγνατία, μέσω του νέου νάρθηκα. Η πρόθεση για μορφολογική και λειτουργική ενοποίηση του συγκροτήματος είναι εμφανής.

Στο εξωτερικό επιχειρήθηκε μίμηση της απλής πλίνθινης τοιχοποιίας της Παναγίας των Χαλκέων, η οποία είχε ήδη αναστηλωθεί. Δεν αποκλείεται μάλιστα να εργάστηκαν τα ίδια συνεργεία και στα δύο μνημεία. Χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένες πλίνθοι ενιαίας ποιότητας για τις κύριες εξωτερικές όψεις, ενώ στο εσωτερικό αξιοποιήθηκε υλικό δεύτερης χρήσης, όπως ανακυκλωμένα τούβλα και λίθοι. Ως συνδετικό υλικό εφαρμόστηκε μείγμα χόματος και τσιμέντου για τις τοιχοποιίες και τσιμεντοκονίαμα με ασβέστη για τα τόξα.

Οι εξωτερικές παρειές του δυτικού και του βόρειου τοίχου, καθώς και της ημιεξαγωνικής αψίδας του ιερού, ανακατασκευάστηκαν με ομοιόμορφους πλίνθους. Με το ίδιο υλικό αποδόθηκαν τα τυφλά τόξα των χορών, το τετράγωνο της βάσης του τρούλου και οι οδοντωτές ταινίες του.

Στις δευτερεύουσες όψεις, νότια και ανατολική, για λόγους οικονομίας χρησιμοποιήθηκε λιθοδομή. Στη συνέχεια όμως οι επιφάνειες επιχρίστηκαν και αρμολογήθηκαν με ιδιαίτερη επιμέλεια, ώστε να αποδίδουν την εντύπωση ενιαίας πλινθόκτιστης τοιχοποιίας, γεγονός που ενέχει τον κίνδυνο εσφαλμένης αναγνώρισης των επιφανειών ως αυθεντικών.

Για να αντιμετωπιστεί το αισθητικό ζήτημα που θα δημιουργούσε η εσωτερική αρμολόγηση, το κατώτερο τμήμα του εσωτερικού καλύφθηκε με ενιαίο επίχρισμα, δημιουργώντας την εντύπωση διζωνικής τοιχοποιίας. Όλα τα τμήματα της ανωδομής του τρούλου ανήκουν στη φάση αυτή, ενώ στο εσωτερικό δεν πραγματοποιήθηκαν ουσιαστικές μεταβολές στη δομή της τοιχοποιίας του κυρίως ναού. Ανακατασκευάστηκε μεγάλο τμήμα της κόγχης του ιερού, συμπεριλαμβανομένου του παραθύρου. Παράλληλα διαστρώθηκε νέο δάπεδο και τοποθετήθηκε νέο τέμπλο για την επανέκθεση των παλαιών εικόνων.

Μεταξύ των στερεωτικών επεμβάσεων ιδιαίτερη σημασία έχει η ενίσχυση της σύνδεσης του τρούλου με τη βάση του μέσω σκυροδέματος (beton), καθώς και η εφαρμογή περιμετρικού σενάζ (chainage) στον νάρθηκα, το οποίο τον συνέδεσε στατικά με τη δυτική πλευρά του κυρίως ναού.

Πέμπτη φάση

Η πέμπτη φάση υπήρξε σχετικά ήπια ως προς τις επιπτώσεις της στο μνημείο και χαρακτηρίζεται ως πλήρως αναστρέψιμη. Κατασκευάστηκε η Τράπεζα και συμπληρώθηκαν με διάτρητα τούβλα οι εσοχές στις παρειές της δυτικής κεραίας και του βόρειου χορού. Επιπλέον, τροποποιήθηκε η διαμόρφωση της κόγχης στη δυτική πλευρά του νάρθηκα, η οποία διατηρήθηκε μόνο στο ανώτερο

τμήμα της. Ο χώρος του ιερού επιστρώθηκε με τσιμεντοκονία, ενώ η οροφή του νάρθηκα καλύφθηκε με ψευδοροφή κατασκευασμένη από μεταλλικό πλέγμα.

2.4. Περιγραφή των φθορών πριν και μετά την καθαίρεση των νεότερων επιχρισμάτων

Ο ναΐσκος της Μεταμορφώσεως του Σωτήρος υπέστη ιδιαίτερη καταπόνηση από τον σεισμό, όπως καταδεικνύεται από τις πολυάριθμες ρωγμές και φθορές που καταγράφηκαν και τεκμηριώθηκαν τόσο σχεδιαστικά όσο και φωτογραφικά στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες όλων των πλευρών του. Η λεπτομερής περιγραφή της τεκμηρίωσης έχει ως εξής:

2.4.1. Ρηγματώσεις πριν από την καθαίρεση των επιχρισμάτων

Βόρεια πλευρά

Εξωτερική όψη: Στο οκταγωνικό τύμπανο παρατηρούνται διαμπερείς ρωγμές, ιδίως στα τόξα και τα καμπύλα γείσα με τις οδοντωτές ταινίες των τριών παραθύρων. Οι ρωγμές φαίνεται να συνεχίζονται κάτω από τα κεραμίδια του τρούλλου. Σημαντική είναι η τριπλή κατακόρυφη ρωγμή μεταξύ του μεσαίου και δεξιού παραθύρου, ενώ πλέγμα ρηγματώσεων εντοπίζεται γύρω από το τυμπάνωμα του βόρειου “χορού” και το νεωτερικό παράθυρο. Τριχοειδείς ρωγμές και μία συνεχής οριζόντια ρωγμάτωση παρατηρούνται σε ύψος 0,20–0,50 μ. από το έδαφος, ενώ κατακόρυφες ρωγμές εμφανίζονται στη βόρεια πλευρά της ημιεξαγωνικής κόγχης του ιερού και στον αρμό βόρειου–δυτικού τοίχου.

Εσωτερικό: Οι ρωγμές των τόξων τυμπαροθόρων αντιστοιχούν σε αυτές της εξωτερικής όψης και διακλαδίζονται σε πλέγματα ρηγματώσεων στο τύμπανο του τρούλλου, ενώ εμφανίζονται και κάτω από τις ποδιές των παραθύρων. Αντίστοιχες διαμπερείς ρωγμές εντοπίζονται στο τύμπανο του “χορού” και διασκορπισμένες τριχοειδείς ρωγμές παρατηρούνται στην κόγχη του ιερού. Μία οριζόντια τριχοειδής ρωγμή καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του νάρθηκα πάνω από την είσοδο.

Ανατολική πλευρά

Εξωτερική όψη: Διαμπερείς ρωγμές εντοπίζονται στα τρία τόξα των παραθύρων και στο νότιο τμήμα της τοιχοδομής, από το ύψος της διπλής οδοντωτής ταινίας της κόγχης του Ιερού μέχρι 1,5 μ. από το έδαφος. Τριχοειδείς ρωγμές σημειώνονται επίσης στη βόρεια πλευρά της κόγχης του Ιερού, ενώ υπάρχουν και παλαιότερες ρωγμές που προϋπήρχαν του σεισμού.

Εσωτερικό: Διαμπερείς ρωγμές ξεκινούν από τα δύο άκρα των παραθύρων και επεκτείνονται

προς την κορυφή του τρούλλου. Το τύμπανο και ο ουρανός του τρούλλου εμφανίζουν πλέγματα παλαιών και νέων τριχοειδών ρωγμών, ενώ παρόμοια πλέγματα καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια της κόγχης του Ιερού.

Νότια πλευρά

Εσωτερική όψη: Διαμπερείς ρωγμές παρατηρούνται στα τόξα των παραθύρων, καθώς και χαμηλότερα από πλίνθινο ημικύκλιο ανάμεσα στο αριστερό και μεσαίο παράθυρο του τρούλλου. Πλέγματα τριχοειδών ρωγμών εμφανίζονται στο νάρθηκα και στον κυρίως ναό, ενώ ισχυρή οριζόντια ρωγμάτωση διατρέχει το νότιο τμήμα της εισόδου του κυρίως ναού, συνεχίζοντας σε διαμπερή καμπύλο ρωγμή στη νότια πλευρά του νάρθηκα.

Δυτική πλευρά

Εξωτερική όψη: Διαμπερείς ρωγμές εμφανίζονται στα τρία παράθυρα του τρούλλου, με ιδιαίτερη έμφαση στο μεσαίο και αριστερό. Ρηγματώσεις καταγράφονται και στο τόξο του τυφλού αψιδώματος.

Εσωτερική όψη νάρθηκα: Πλέγματα ρηγματώσεων και τριχοειδείς ρωγμές καλύπτουν τις περιοχές από τις ποδιές των παραθύρων μέχρι την αψίδα πάνω από την είσοδο, καθώς και το τύμπανο και τον ουρανό του τρούλλου. Ισχυρές διαμπερείς οριζόντιες και κατακόρυφες ρωγμές εμφανίζονται ιδιαίτερα πάνω από την είσοδο, ενώ μεμονωμένες διαμπερείς κατακόρυφες ρωγμές εντοπίζονται στη βορειοδυτική γωνία του νάρθηκα.

2.4.2. Φθορές και επεμβάσεις μετά την καθαίρεση των νεότερων επιχρισμάτων

Μετά την απομάκρυνση των νεότερων επιχρισμάτων (της περιόδου του μεσοπολέμου και μεταγενέστερα) στις εσωτερικές επιφάνειες, με εξαίρεση το τύμπανο και τον τρούλλο, όπου διατηρούνται αξιόλογες τοιχογραφίες, διαπιστώθηκε η κατάσταση του φέροντος οργανισμού και οι προηγούμενες επεμβάσεις.

Βόρεια πλευρά: Οι εμφανείς ρηγματώσεις που παρατηρούνταν πριν την καθαίρεση δεν παρατηρούνται πλέον.

Ανατολική πλευρά: Στην κόγχη του Ιερού εμφανίζεται κατακόρυφη ρωγμή στην ένωση παλαιάς και μεταγενέστερης τοιχοποιίας, ενώ διαγώνιες ρωγμές επεκτείνονται προς τον κοσμήτη του τρούλλου.

Νότια πλευρά: Στην κόγχη εμφανίζονται δύο συμμετρικές κατακόρυφες ρωγμές και πρόσθετες μικρές ρωγμές στο τεταρτοσφαίριο και στο κλειδί του τόξου. Κατακόρυφες ρωγμές παρατηρούνται σε όλο το ύψος των πεσσών και στις ενώσεις με τα τύμπανα των κεραίων.

Στο νότιο νάρθηκα εντοπίζεται μόνο μία μικρή κατακόρυφη ρωγμή.

Δυτική πλευρά: Οι ρηγματώσεις παραμένουν σημαντικές στα τόξα διαφορετικών φάσεων, στις συναρμογές υλικών διαφορετικής ελαστικότητας, στα κλειδιά τόξων και καμαρών λόγω στατικής ανεπάρκειας, σε κατακόρυφους αρμούς σύγχρονων ή παλαιών τμημάτων και σε ευαίσθητες περιοχές του φέροντος οργανισμού (βάσεις τοίχων, τύμπανα τρούλλου, ημισφαίρια θόλου, γωνίες κτιρίου). Πιο συγκεκριμένα:

- α) Ρηγματώσεις που ακολουθούν τις συρραφές τόξων διαφορετικών οικοδομικών φάσεων.
- β) Ρηγματώσεις που οφείλονται στη διαφορετική ελαστικότητα των συνεργαζόμενων υλικών, όπως ξύλου και πλινθοδομής ή ξύλου και επιχρίσματος.
- γ) Ρηγματώσεις στα κλειδιά των τόξων και των καμαρών, οι οποίες οφείλονται στη στατική ανεπάρκεια για την απορρόφηση οριζόντιων ωθήσεων (οι ρηγματώσεις εμφανίζονται και στις δύο πλευρές του κλειδιού).
- δ) Ρηγματώσεις που εμφανίζονται πάνω σε κατακόρυφους δομικούς αρμούς σύγχρονων ή παλαιότερων τμημάτων.
- ε) Ρηγματώσεις σε ιδιαίτερα ευαίσθητες για σεισμό περιοχές του φέροντος οργανισμού, όπως η βάση των τοίχων, η βάση του τυμπάνου του τρούλλου, η βάση του ημισφαιρίου του θόλου και οι γωνίες του κτιρίου.

2.5. Συνολική αποτίμηση οικοδομικών φάσεων του ναού

Η ανάλυση των διαδοχικών οικοδομικών φάσεων του μνημείου επιτρέπει την κατανόηση όχι μόνο της ιστορικής του εξέλιξης, αλλά και της μεταβαλλόμενης αντίληψης περί επεμβάσεων σε ιστορικές κατασκευές. Η στρωματογραφική ανάγνωση της τοιχοποιίας και των μορφολογικών στοιχείων αποκαλύπτει διακριτά στάδια κατασκευής, καταστροφών και αποκαταστάσεων, τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν με βάση σύγχρονες θεωρητικές αρχές προστασίας της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς.

1. Αυθεντικότητα και ιστορική στρωματογραφία

Η αρχική φάση συγκροτεί τον πυρήνα της αυθεντικότητας του μνημείου, τόσο ως προς τα υλικά όσο και ως προς τη γεωμετρική και τυπολογική του οργάνωση. Τα επόμενα στάδια δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται αποκλειστικά ως αλλοιώσεις, αλλά ως ιστορικά στρώματα που μαρτυρούν τη διαχρονική χρήση και προσαρμογή του κτηρίου. Ωστόσο, ιδίως κατά την αναστήλωση του 1936, η επιδίωξη μορφολογικής ομογενοποίησης οδήγησε σε μερική απώλεια της αναγνωρισιμότητας των φάσεων. Η μίμηση της βυζαντινής πλινθοδομής και η εκτεταμένη

ανακατασκευή όψεων δυσχεραίνουν τη σαφή διάκριση μεταξύ αυθεντικού και νέου υλικού, γεγονός που αντίκειται στη σύγχρονη αρχή της διακριτότητας των επεμβάσεων.

2. Αρχή της ελάχιστης επέμβασης

Οι πρώιμες στερεωτικές παρεμβάσεις (τρίτη φάση), με χρήση ξύλινων στοιχείων και παραδοσιακών τεχνικών, φαίνεται να εντάσσονται περισσότερο στη λογική της ελάχιστης επέμβασης, καθώς επιδίωκαν τη διατήρηση του υφιστάμενου δομικού συστήματος χωρίς ριζική ανακατασκευή του. Αντίθετα, η τέταρτη φάση χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες αντικαταστάσεις και αναδιαμορφώσεις, που υπερέβησαν το όριο της απλής στερέωσης.

Η κατασκευή νέου νάρθηκα προσαρμοσμένου στο πολεοδομικό σχέδιο και η αναδιαμόρφωση των κύριων όψεων συνιστούν παρεμβάσεις μεγάλης κλίμακας, με ουσιαστική μεταβολή της αρχικής μορφής και χωρικής αντίληψης του μνημείου.

3. Συμβατότητα υλικών και δομική συμπεριφορά

Ιδιαίτερη σημασία έχει η αξιολόγηση της συμβατότητας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε φάση.

- Στις αρχικές φάσεις, τα συνδετικά υλικά (πηλός και ασβέστης) παρουσίαζαν μηχανικές ιδιότητες συμβατές με την ιστορική τοιχοποιία, επιτρέποντας σχετική παραμορφωσιμότητα και «αναπνοή» του δομικού συστήματος.
- Στην αναστήλωση του 1936 εισήχθησαν τσιμεντοκονιάματα και σκυρόδεμα, υλικά υψηλότερης αντοχής και δυσκαμψίας, τα οποία μεταβάλλουν την κατανομή τάσεων και τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε σεισμική δράση.

Η ασυμβατότητα αυτή ενδέχεται να οδηγήσει σε συγκεντρώσεις τάσεων στα όρια παλαιού και νέου υλικού, αυξημένη ρηγμάτωση ή προβλήματα εγκλωβισμού υγρασίας. Από στατική άποψη, η χρήση περιμετρικών σενάζ και σκυροδέματος στη βάση του τρούλου βελτίωσε τη συνοχή του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα αλλοίωσε τον αρχικό τρόπο λειτουργίας του φέροντος οργανισμού.

4. Αναστρεψιμότητα και επεμβατικότητα

Η πέμπτη φάση χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αναστρεψιμότητας, καθώς οι περισσότερες επεμβάσεις (συμπληρώσεις με διάτρητα τούβλα, ψευδοροφή, επιφανειακές διαμορφώσεις) μπορούν να αφαιρεθούν χωρίς σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού. Αντίθετα, οι εκτεταμένες ανακατασκευές της τέταρτης φάσης είναι πρακτικά μη αναστρέψιμες.

Η σύγχρονη θεωρία αποκατάστασης δίνει προτεραιότητα σε λύσεις που μπορούν να αναθεωρηθούν στο μέλλον, εφόσον νέα δεδομένα προκύψουν. Υπό αυτό το πρίσμα, οι

επεμβάσεις του 20ού αιώνα αντανακλούν την τότε επικρατούσα αντίληψη περί «αισθητικής αποκατάστασης», παρά μια αυστηρά επιστημονική και αναστρέψιμη προσέγγιση.

5. Συνολική αποτίμηση

Το μνημείο αποτελεί σήμερα σύνθετο κατασκευαστικό και ιστορικό σύνολο, στο οποίο συνυπάρχουν:

- ο αυθεντικός βυζαντινός πυρήνας,
- οι μεταγενέστερες λειτουργικές προσαρμογές,
- οι εμπειρικές στερεωτικές επεμβάσεις,
- και η εκτεταμένη αναστήλωση του 1936.

Η αποκατάσταση της αναγνωσιμότητας της ιστορικής στρωματογραφίας, η διερεύνηση της δομικής συμπεριφοράς των ετερογενών υλικών και η αποφυγή περαιτέρω μη συμβατών επεμβάσεων αποτελούν βασικές προτεραιότητες για οποιαδήποτε μελλοντική παρέμβαση.

Συνεπώς, κάθε νέα πρόταση πρέπει να εδράζεται:

- στην τεκμηριωμένη διάγνωση της παθολογίας,
- στη χρήση συμβατών και κατά το δυνατόν αναστρέψιμων υλικών,
- στον σεβασμό της αυθεντικότητας και της ιστορικής συνέχειας,
- και στη σαφή διάκριση νέων και παλαιών στοιχείων.
- Μόνον υπό αυτές τις προϋποθέσεις μπορεί να διασφαλιστεί η δομική επάρκεια και η ιστορική ακεραιότητα του μνημείου στο μέλλον.

2.6. Βασικές διατάξεις ΚΑΔΕΤ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθοριστικής σημασίας είναι η συμμόρφωση με τις προβλέψεις του ΚΑΔΕΤ (Κανονισμός Αποτίμησης και Δομητικών Επεμβάσεων σε Τοιχοποιία). Ο κανονισμός αυτός θέτει το θεσμικό και τεχνικό πλαίσιο για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών από τοιχοποιία και τον σχεδιασμό επεμβάσεων αποκατάστασης και ενίσχυσης, ιδίως σε σεισμογενές περιβάλλον όπως η πόλη της Θεσσαλονίκης.

2.6.1. Αντικείμενο και πεδίο εφαρμογής

Ο ΚΑΔΕΤ αφορά την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία και τον καθορισμό των αναγκαίων επεμβάσεων για τη βελτίωση της δομικής τους συμπεριφοράς έναντι σεισμικών και λοιπών δράσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται:

- στη συστηματική διερεύνηση της υφιστάμενης κατάστασης,
- στον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών,
- στην αναγνώριση των δομικών ασυνεχειών και των κατασκευαστικών φάσεων,
- στην τεκμηρίωση της σεισμικής τρωτότητας.

Στην περίπτωση ιστορικού ναού, όπως ο Ι.Ν. Μεταμορφώσεως του Σωτήρος, η εφαρμογή του κανονισμού προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες του μνημειακού χαρακτήρα και συνδυάζεται με τις αρχές προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς.

2.6.2. Στάδια αποτίμησης

Σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ, η διαδικασία αποτίμησης περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια:

2.6.2.1. Συλλογή και αξιολόγηση δεδομένων

Περιλαμβάνει:

- ιστορική και αρχειακή έρευνα,
- καταγραφή προηγούμενων επεμβάσεων,
- γεωμετρική αποτύπωση και τεκμηρίωση ρωγμών,
- διερεύνηση οικοδομικών φάσεων και τυχόν προσθηκών.

Για μνημειακές κατασκευές, η φάση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς οι διαφορετικές δομικές φάσεις επηρεάζουν ουσιαδώς τη μηχανική συμπεριφορά του συνόλου.

2.6.2.2. Καθορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών

Ο κανονισμός προβλέπει τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων της τοιχοποιίας (αντοχή σε θλίψη, διάτμηση, εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας), μέσω:

- επιτόπιων δοκιμών,
- εργαστηριακών ελέγχων,

- βιβλιογραφικών τιμών με κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας.

Η αξιοπιστία των δεδομένων κατατάσσεται σε επίπεδα γνώσης (χαμηλό, μέσο, υψηλό), τα οποία επηρεάζουν τους επιμέρους συντελεστές μείωσης αντοχών.

2.6.2.3. Διαμόρφωση υπολογιστικού προτύπου

Το στατικό προσομοίωμα πρέπει να αντανακλά:

- τη γεωμετρία και τις ασυνέχειες της τοιχοποιίας,
- την ύπαρξη θόλων, τρούλλου και καμαρών,
- τη συνεργασία τοιχοποιίας και τυχόν ξύλινων στοιχείων,
- την αλληλεπίδραση μεταξύ επιμέρους δομικών τμημάτων.

Για ναούς με τρούλλο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη μετάβαση φορτίων από το τύμπανο προς τα υποκείμενα τόξα και πεσσούς.

2.6.3. Στάθμες επιτελεστικότητας

Ο ΚΑΔΕΤ υιοθετεί τη λογική των επιπέδων επιτελεστικότητας (performance levels), τα οποία συσχετίζουν τη σεισμική δράση με το αποδεκτό επίπεδο βλάβης. Ενδεικτικά:

- Περιορισμός βλαβών,
- Σημαντικές βλάβες χωρίς κατάρρευση,
- Αποφυγή κατάρρευσης.

Για μνημεία υψηλής ιστορικής και πολιτιστικής αξίας, ο στόχος συνήθως διαμορφώνεται αυστηρότερα, με έμφαση στον περιορισμό βλαβών και στη διατήρηση της αυθεντικότητας.

2.6.4. Αρχές σχεδιασμού επεμβάσεων

Ο κανονισμός θέτει βασικές αρχές που διέπουν τις επεμβάσεις:

- **Αναστρεψιμότητα**, όπου είναι εφικτό.
- **Συμβατότητα υλικών**, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ασυμβατότητας και νέες ρηγματώσεις.
- **Ελαχιστοποίηση επέμβασης**, με προτίμηση σε ήπιες τεχνικές.

- **Βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς** και όχι μόνο τοπική ενίσχυση.

Οι επεμβάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν ενέματα, αποκατάσταση αρμών, τοποθέτηση ελκυστήρων, ενίσχυση θόλων ή βελτίωση της διαφραγματικής λειτουργίας, πάντα κατόπιν τεκμηριωμένης αποτίμησης.

2.6.5. Ιδιαιτερότητες εφαρμογής σε ιστορικό ναό

Στην υπό μελέτη περίπτωση, η εφαρμογή των διατάξεων του ΚΑΔΕΤ οφείλει να λάβει υπόψη:

- τη σύνθετη γεωμετρία (τρούλλος, καμάρες, κόγχες),
- τις διαδοχικές οικοδομικές φάσεις,
- τις υφιστάμενες ρηγματώσεις από προηγούμενες σεισμικές διεγέρσεις,
- τον μνημειακό χαρακτήρα και την παρουσία τοιχογραφιών.

Η τελική επιλογή μεθόδου αποκατάστασης οφείλει να προκύπτει από ισορροπία μεταξύ δομικής επάρκειας, σεισμικής ασφάλειας και προστασίας της αυθεντικότητας του μνημείου.

3 Τεκμηρίωση φέροντος οργανισμού και Παθολογίας του Ναού

3.1. Τρόπος δόμησης τοιχοποιίας και θολοδομίας του ιστορικού Ναού

Ο Ιερός Ναός Μεταμορφώσεως του Σωτήρος αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα βυζαντινής εκκλησιαστικής αρχιτεκτονικής, με σύνθετη δομική οργάνωση και ιδιαίτερη κατασκευαστική επιμέλεια. Η κατανόηση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας και του τρούλου είναι καθοριστική τόσο για την ερμηνεία της παθολογίας του μνημείου όσο και για τον σχεδιασμό των κατάλληλων επεμβάσεων αποκατάστασης.

3.1.1. Τοιχοποιία φερόντων τοίχων

Η φέρουσα τοιχοποιία του ναού συνίσταται σε μικτή κατασκευή λίθων και πλίνθων, με χρήση πηλοκονιάματος και ασβεστοκονιάματος ως συνδετικού υλικού. Η τοιχοδομία παρουσιάζει επιμελημένη διάταξη, με οριζόντιες ζώνες πλίνθων που λειτουργούν ως στρώσεις εξομάλυνσης και βελτίωσης της συνεργασίας των υλικών. Οι πλίνθοι παρεμβάλλονται μεταξύ ακανόνιστων ή ημιλαξευμένων λίθων, δημιουργώντας ένα σύστημα που συνδυάζει θλιπτική αντοχή και σχετική πλαστιμότητα.

Σε ορισμένα τμήματα παρατηρείται η τεχνική της κρυμμένης πλίνθου, όπου οι πλίνθοι

ενσωματώνονται στο σώμα της τοιχοποιίας με εμφανή μόνο τα άκρα τους στην όψη. Η πρακτική αυτή αφενός εξυπηρετεί αισθητικούς σκοπούς, αφετέρου συμβάλλει στη βελτίωση της μηχανικής συνοχής του τοίχου.

Το πάχος των τοίχων είναι σημαντικό, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής φέρουσα ικανότητα για την παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων του τρούλου και των θόλων, καθώς και των οριζόντιων ωθήσεων που αναπτύσσονται κατά τη σεισμική διέγερση. Οι γωνίες και οι περιοχές έδρασης των τόξων και καμαρών ενισχύονται με επιμελέστερη λιθοδομή, στοιχείο που καταδεικνύει συνειδητή στατική αντιμετώπιση των κρίσιμων περιοχών. Για τον συγκεκριμένο ναό στο μοντέλο οι τοιχοποιίες προσομοιώθηκαν ως δίστρωτες με διάτονα λιθοσώματα.

3.1.2. Τόξα, καμάρες και μεταφορά φορτίων

Η μετάβαση από τον τετραγωνικό ή σταυροειδή πυρήνα του ναού στη βάση του τρούλου επιτυγχάνεται μέσω τόξων και καμαρών που λειτουργούν ως ενδιάμεσο σύστημα μεταφοράς φορτίων. Τα τόξα δομούνται κυρίως από πλίνθους, τοποθετημένες ακτινικά, με ιδιαίτερη επιμέλεια στο κλειδί, όπου συγκεντρώνονται σημαντικές θλιπτικές και οριζόντιες δυνάμεις.

Οι καμάρες συνεργάζονται με τους πεσσούς και τους φέροντες τοίχους, μεταφέροντας τα φορτία του υπερκείμενου τυμπάνου και του τρούλου προς τη θεμελίωση. Η μορφολογία και η γεωμετρία τους επηρεάζουν άμεσα τη στατική συμπεριφορά του μνημείου, ιδίως υπό σεισμικές δράσεις, όπου αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις σε περιοχές που η τοιχοποιία εμφανίζει περιορισμένη αντοχή.

3.1.3. Δόμηση του τρούλου

Ο τρούλος εδράζεται σε κυλινδρικό ή πολυγωνικό τύμπανο, το οποίο φέρει ανοίγματα (παράθυρα) για τον φωτισμό του εσωτερικού. Το τύμπανο δομείται με εναλλαγές λίθων και πλίνθων, ενώ τα τόξα των παραθύρων κατασκευάζονται από πλινθοδομή, εξασφαλίζοντας καλύτερη κατανομή των θλιπτικών τάσεων.

Η καμπύλη επιφάνεια του τρούλου διαμορφώνεται από ομόκεντρες σειρές πλίνθων, τοποθετημένων

με ελαφρά κλίση ώστε να ακολουθούν τη γεωμετρία του ημισφαιρίου. Το κονίαμα λειτουργεί όχι μόνο ως συγκολλητικό μέσο αλλά και ως υλικό εξομάλυνσης των τοπικών ανωμαλιών, συμβάλλοντας στη συνολική μονολιθικότητα της κατασκευής.

Στη βάση του τρούλου αναπτύσσονται σημαντικές οριζόντιες ωθήσεις, οι οποίες

παραλαμβάνονται

από τα υποκείμενα τόξα και τους φέροντες τοίχους. Η επάρκεια της συνεργασίας αυτών των στοιχείων είναι κρίσιμη για τη συνολική στατική ισορροπία του μνημείου.

3.1.4. Κατασκευαστικές φάσεις και δομικές ασυνέχειες

Η διερεύνηση της τοιχοποιίας καταδεικνύει πιθανές διαφοροποιήσεις στην τεχνική δόμησης, οι οποίες συνδέονται με μεταγενέστερες επεμβάσεις ή επισκευές. Οι διαφοροποιήσεις αυτές εντοπίζονται:

σε αλλαγές του μεγέθους ή της ποιότητας των λίθων και πλίνθων,

στη σύσταση και υφή των κονιαμάτων,

σε κατακόρυφους αρμούς που υποδηλώνουν προσθήκες.

Οι δομικές ασυνέχειες που προκύπτουν από τις διαφορετικές οικοδομικές φάσεις επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά του μνημείου, καθώς δημιουργούν ζώνες μειωμένης συνεργασίας και πιθανής συγκέντρωσης τάσεων.

3.1.5. Στατική λειτουργία υπό σεισμική δράση

Η παραδοσιακή τοιχοποιία λειτουργεί ικανοποιητικά υπό θλιπτικές καταπονήσεις, ωστόσο εμφανίζει περιορισμένη αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση. Σε συνθήκες σεισμικής διέγερσης, οι οριζόντιες επιταχύνσεις προκαλούν: ανάπτυξη ρηγματώσεων στα κλειδιά των τόξων, αποκόλληση τμημάτων του τυμπάνου, ρηγματώσεις στη ζώνη έδρασης του τρούλου.

Η κατανόηση του τρόπου δόμησης καθίσταται συνεπώς απαραίτητη για τη διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων ενίσχυσης, οι οποίες θα σέβονται τη μορφολογία και τα αυθεντικά υλικά του μνημείου.

3.2. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υφιστάμενων υλικών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα είναι για την τοιχοποιία του ναού η λιθοδομή και πλινθοδομή κατά περίπτωση, το ξύλο για την στέγη, η οπτοπλινθοδομή για τον τρούλο, τα τόξα, το τύμπανο, τα σφαιρικά τρίγωνα. Οι λαμβανόμενες ιδιότητές τους είναι οι εξής (ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1):

	Λιθοδομή	Οπτοπλινθοδομή	Ξύλο
Ίδιο βάρος (KN/m³)	25	18	6
Mass Denisty (tonne/mm³)	2.5E-09	1.8E-09	6E-10
Μέτρο ελαστικότητας (Mpa)	1130	1091	8000
Λόγος Poisson	0.20	0.20	0.30

Πίνακας 3-1: Θεωρούμενες ιδιότητες υλικών

4 Μηχανικές ιδιότητες υλικών

4.1. Εκτίμηση - Υπολογισμός αντοχών φέρουσας τοιχοποιίας

4.1.1. Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

Λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή, ο Κ.Α.Δ.Ε.Τ. κατατάσσει την τοιχοποιία σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο δόμησής της. Ειδικότερα, διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- Μονόστρωτη τοιχοποιία: Αποτελεί την απλούστερη μορφή κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή η τοιχοποιία χαρακτηρίζεται από σχετικά περιορισμένη ανισοτροπία.
- Δίστρωτη τοιχοποιία: Αποτελείται από εξωτερική και εσωτερική παρειά. Ο μηχανισμός αστοχίας και η θλιπτική αντοχή εξαρτώνται από τον βαθμό συνεργασίας και σύνδεσης μεταξύ των δύο στρώσεων. Όταν υπάρχουν διάττονα λιθοσώματα, θεωρείται ότι εξασφαλίζεται επαρκής σύνδεση. Αντίθετα, σε τοιχοποιίες χωρίς μπατικούς λίθους, η κατασκευή είναι περισσότερο ευάλωτη: συνεπώς, η αποτίμηση της αντοχής πραγματοποιείται με διαφορετική μεθοδολογία, λαμβάνοντας υπόψη τη θλιπτική αντοχή κάθε στρώσης διακριτά.
- Τρίστρωτη τοιχοποιία: Περιλαμβάνει δύο εξωτερικές παρειές, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ενδιάμεση στρώση υλικού πληρώσεως, το οποίο συνήθως παρουσιάζει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Για τον Ναό Μεταμορφώσεως του Σωτήρος και με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία που περιεγράφηκαν χρησιμοποιήσαμε για τις επιλύσεις του μοντέλου τις εξής περιπτώσεις:

- A) Θλιπτική αντοχή δίστρωτης τοιχοποιίας χωρίς διάττονα λιθοσώματα
- B) Θλιπτική αντοχή οπτοπλινθοδομής με υψηλή ποιότητα δόμησης

4.1.1.1. Θλιπτική αντοχή δίστρωτης τοιχοποιίας με διάττονα λιθοσώματα

Η θλιπτική αντοχή της λιθοδομής f_{wc} (σε MPa) σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ (§6.2.5, Σ6.5) και τον EN1996-1-1 (§3.7.2 (2)), εκφράζεται συναρτήσει της αντοχής των λιθοσωμάτων και του κονιάματος μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$f_{wc} = \xi \left[\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc} - f_0} + \lambda f_{mc} \right]$$

όπου:

Συντελεστής f_0

Ο όρος f_0 (σε MPa) αποτελεί διορθωτικό συντελεστή που λαμβάνει υπόψη τον βαθμό λάξευσης και την ποιότητα κατεργασίας των λίθων. Οι τιμές του προσδιορίζονται ως εξής:

$$f_0 = \begin{cases} 0.00 \text{ MPa} & \text{για λαξευτή λιθοδομή} \\ 0.50 - 1.00 \text{ MPa} & \text{για λιθοδομή από ημικανονικούς λίθους} \\ 1.50 - 2.50 \text{ MPa} & \text{για αργολιθοδομή} \end{cases}$$

Η επιλογή της επιμέρους τιμής εντός των ανωτέρω ορίων εξαρτάται από την ποιότητα δόμησης.

Συντελεστής ξ

Ο συντελεστής ξ (με $\xi \leq 1$) λαμβάνει υπόψη τη δυσμενή επιρροή του πάχους και του όγκου των αρμών κονιάματος στη συνολική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\xi = \frac{1}{1 + 3.5k - k_0}$$

όπου:

$$k = \frac{V_m}{V_w} \text{ με } k \geq 0.30$$

και:

- V_m = όγκος κονιάματος,
- V_w = συνολικός όγκος τοιχοποιίας,
- $k_0 = 0.30$.

Πεδίο Εφαρμογής της Σχέσης

Η ανωτέρω σχέση θεωρείται ότι ισχύει για:

$$25 \leq f_{bc} \leq 75 \text{ MPa}$$

$$0.5 \leq f_{mc} \leq 2.5 \text{ MPa}$$

όπου:

- f_{bc} = μέση θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων,
- f_{mc} = μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος.

Επισημαίνεται ότι οι αντοχές αυτές αποτελούν μέσες τιμές, οι οποίες έχουν προκύψει από περιορισμένο αριθμό δοκιμίων.

Συντελεστής λ

Ο συντελεστής λεκφράζει τον βαθμό συνάφειας μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος και επηρεάζει τη συνεργασία των δύο υλικών υπό θλιπτική καταπόνηση. Οι τιμές του καθορίζονται ανάλογα με την επιφανειακή υφή των λίθων ως εξής:

$$\lambda = \begin{cases} 0.50 & \text{για τραχείς λίθους} \\ 0.10 & \text{για πολύ λείους λίθους} \end{cases}$$

Για την περίπτωση μας λαμβάνουμε $f_0 = 2,5 \text{ MPa}$, $\lambda = 0,4$, $\kappa = 0,3$, $\xi = 1$, $f_{bc} = 25 \text{ MPa}$ (μετρ. ισχυρό), $f_{mc} = 0,3 \text{ MPa}$

οπότε προκύπτει:

$$f_{wc} = 0,953 \text{ MPa.}$$

4.1.1.2. Θλιπτική αντοχή οπτοπλινθοδομής με υψηλή ποιότητα δόμησης

Θλιπτική Αντοχή Οπτοπλινθοδομής Υψηλής Ποιότητας Δόμησης (κατά Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

Σύμφωνα με τον Κ.Α.Δ.Ε.Τ., η θλιπτική αντοχή οπτοπλινθοδομής υψηλής ποιότητας δόμησης f_{wc} (σε MPa) προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις, ανάλογα με τη σχετική τιμή της αντοχής των λιθοσωμάτων και του κονιάματος:

Για $f_{bc} > f_{mc}$:

$$f_{wc} = [f_{mc} + 0.4(f_{bc} - f_{mc})](1 - 0.8\sqrt[3]{a})$$

Για $f_{bc} < f_{mc}$:

$$f_{wc} = f_{bc}(1 - 0.83\sqrt[3]{a})$$

όπου:

- f_{wc} : θλιπτική αντοχή οπτοπλινθοδομής (MPa),
- f_{bc} : θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων (MPa),
- f_{mc} : θλιπτική αντοχή συνδετικού κονιάματος (MPa),
- $a = \frac{t_{jm}}{h_{bm}}$: λόγος του μέσου πάχους των οριζόντιων αρμών κονιάματος t_{jm} προς το μέσο ύψος των λιθοσωμάτων h_{bm} .

Ο συντελεστής $(1-0.83^3/a)$ αποτυπώνει τη δυσμενή επίδραση του σχετικού πάχους των οριζόντιων αρμών κονιάματος στη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας, λαμβάνοντας υπόψη ότι η αύξηση του λόγου αοδηγεί σε μείωση της συνολικής αντοχής.

Για την περίπτωση μας λαμβάνουμε $f_{bc} = 7 \text{ Mpa}$, $f_{mc} = 0,2 \text{ Mpa}$ και $a = 0,625$ από τις ερήμην τιμές των πινάκων του ΚΑΔΕΤ που παρατίθενται ακολούθως για οπτόπλινθους συμπαγείς πλακοειδείς και για πηλοκονίαμα αντίστοιχα, οπότε προκύπτει:

$$f_{wc} = 0,917 \text{ Mpa.}$$




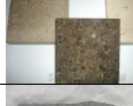

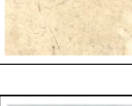
Είδος τεχνητού λιθοσώματος	Ερήμην τιμή αντοχής σε θλίψη (MPa)
Οπτόπλινθοι συμπαγείς πλακοειδείς	7,0
Οπτόπλινθοι συμπαγείς με ή χωρίς σκάφη ~ 6/9/19 cm	10,0
Οπτόπλινθοι με οριζόντιες οπές	3,0
Οπτόπλινθοι με κατακόρυφες οπές	4,0
Τσιμεντόλιθοι	2,0


Πίνακας 4-1. : Ερήμην Τιμές Θλιπτικής Αντοχής Τεχνητών Λιθοσωμάτων – Κ.Α.Δ.Ε.Τ.

Κονιάματα δόμησης	Εύρος τιμών θλιπτικής αντοχής (MPa)	Ερήμην τιμές για τη θλιπτική αντοχή (MPa)
Πηλοκονιάματα	0,1 – 0,5	0,2
Ασβεστοπηλοκονιάματα	0,2 – 0,7	0,3
Ασβεστοκονιάματα	0,3 – 2,0	0,4
Αβεστοκονιάματα που περιέχουν ποζολάνη και πηλό	0,7 – 2,5	0,8
Ασβεστοποζολανικά κονιάματα	0,9 – 4,0	1,0
Ασβεστοκονιάματα με θραυστό κεραμικό και πιθανή χρήση ποζολάνης (κουρασάνια)	1,0 – 5,0	1,5
Ασβεστοτσιμεντοκονιάματα	2,0 – 10,0	2,0
Τσιμεντοκονιάματα	5,0 – 15,0	5,0

Πίνακας 4-2: Ερήμην Τιμές Θλιπτικής Αντοχής Κονιαμάτων – Κ.Α.Δ.Ε.Τ.

Πίνακας Π3.2: Ενδεικτικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών συνηθέστερων πετρωμάτων και ερήμην τιμές λιθοσωμάτων με βάση την επί τόπου οπτική παρατήρηση, εξέταση και κατάταξη του λιθοσώματος στις κατηγορίες του Πίνακα Π3.1 από τον Μηχανικό.

ΠΕΤΡΩΜΑ	Φαινόμενη πυκνότητα ρ (gr/cm ³)	Αντοχή σε θλίψη (ΜΡα)	Αντοχή σε εφελκυσμό (ΜΡα)	Μέτρο ελαστικότητας Ε, (GPa)	Ενδεικτικές υφές πετρωμάτων	Ερήμην τιμή αντοχής σε θλίψη (ΜΡα)
Γρανίτης	2,60 – 2,82	16 – 434	3 - 40	10 - 77		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Διορίτης	2,50 – 3,03	64 – 333	5 - 50	29 – 107		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Πορφυρίτης	2,50 – 2,80	173 – 250	12 - 13	65 – 76		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Ηφαιστειακός τόφος	1,80 – 2,11	6– 300	1 - 40	2 – 55		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25 Ασθενές: 5
Αργιλικός σχιστόλιθος	1,60 – 2,90	34 – 503	0,7 - 23	2 – 90		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Δολομίτης	2,40 – 2,87	45 – 410	3 - 13	23 – 90		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25

Μάρμαρο	2,64 – 3,02	38 – 280	2 - 29	24 – 103		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Ασβεστόλιθοι	2,4– 2,70	18 -197	3,5 - 14	10.5-87.0		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25 Ασθενές: 18
Τραβερτίνης	2,40 – 2,54	18 – 68	4 - 10	4 – 45		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25 Ασθενές : 18
Σερπεντίνης	2,61 – 2,80	70 - 250	16 - 19	45 - 65		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Ψαμμίτες (λ.χ. λιθαρενίτες)	2,50 – 2,80	35-140	5 - 16	13 - 54		Ισχυρό: 50 Μετρ. Ισχυρό: 25
Πωρόλιθοι (πορώδεις ψαμμίτες (π.χ. βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι, ασβεστομαργαϊκοί ψαμμίτες) ή απολιθωματοφόροι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, κλ.π.).	1,57 - 2,45	1-25	1,8 - 10	-		Ασθενές: 5 Πολύ Ασθενές: 1

Πίνακας 4-3: Ερήμην Τιμές Θλιπτικής Αντοχής Λιθοσωμάτων – Κ.Α.Δ.Ε.Τ.

4.2. Παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας της τοιχοποιίας παρουσιάζουν σημαντική διασπορά, καθώς επηρεάζονται από πληθώρα παραμέτρων, όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνιστώντων υλικών (λιθοσώματα και κονιάμα), το μέγεθος και τη γεωμετρία των λιθοσωμάτων, το πάχος και τον όγκο των αρμών κονιάματος, καθώς και το επίπεδο της επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσης. Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας, το οποίο αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη θλιπτική τάση ίση με το 30% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας f_{wc} , λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται ενδεικτικά μεταξύ:

$$E_{wc} = (300 \text{ ως } 1200) f_{wc}$$

Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή πολλαπλασιασμού αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές της θλιπτικής αντοχής.

Σύμφωνα με τον Κ.Α.Δ.Ε.Τ., ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας της τοιχοποιίας μπορεί να πραγματοποιηθεί βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$E_{wc} = 1300 \left(1 - \frac{f_{wc}}{5} \right) f_{wc} \pm 140 f_{wc}^2 \text{ (MPa)}$$

Η ανωτέρω σχέση εφαρμόζεται για εύρος τιμών:

$$1 \text{ MPa} \leq f_{wc} \leq 3.0 \text{ MPa}$$

όπου:

- E_{wc} : μέτρο ελαστικότητας τοιχοποιίας (MPa),
- f_{wc} : θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας (MPa).

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί εμπειρική σχέση, προσαρμοσμένη σε πειραματικά δεδομένα, και αποτυπώνει τη μη γραμμική συσχέτιση μεταξύ θλιπτικής αντοχής και δυσκαμψίας της τοιχοποιίας.

4.2.1. Τέμνον μέτρο ελαστικότητας δίστρωτης τοιχοποιίας με διάτονα λιθοσώματα

Εφαρμόζοντας τον παραπάνω τύπο για την περίπτωση της δίστρωτης τοιχοποιίας χωρίς διάτονα λιθοσώματα έχουμε τις τιμές :

$$E_{wc} = 1129,92 \text{ Mpa} \text{ ή } E_{wc} = 875,62 \text{ Mpa}$$

Στην επίλυση του μοντέλου λάβαμε την τιμή $E_{wc} = 1130 \text{ Mpa}$

4.2.2. Τέμονν μέτρο ελαστικότητας οπτοπλινθοδομής με υψηλή ποιότητα δόμησης

Εφαρμόζοντας τον τύπο του ΚΑΔΕΤ για το τέμονν μέτρο ελαστικότητας για την περίπτωση της τοιχοποιίας οπτοπλινθοδομής με υψηλή ποιότητα δόμησης έχουμε τις τιμές :

$$E_{wc} = 1091,19 \text{ Mpa} \text{ ή } E_{wc} = 855,75 \text{ Mpa}$$

Στην επίλυση του μοντέλου λάβαμε την τιμή $E_{wc} = 1091 \text{ Mpa}$

4.2.3. Λόγος Poisson

Ο λόγος του Poisson, ο οποίος περιγράφει τη σχέση μεταξύ της εγκάρσιας και διαμήκους παραμόρφωσης ενός υλικού υπό φόρτιση, μπορεί να εκτιμηθεί για την τοιχοποιία μέσω της θλιπτικής αντοχής της. Σύμφωνα με την ημι-εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τους Tassios & Chronopoulos (1986), ο λόγος του Poisson ν δίνεται από τη σχέση:

$$\nu = 0,5 - 0,1 f_{wc}^{1/4}$$

όπου:

- f_{wc} είναι η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας (σε MPa),
- ν ο λόγος του Poisson, ο οποίος μειώνεται όσο αυξάνει η θλιπτική αντοχή του υλικού.

Η σχέση αυτή βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα και παρέχει έναν πρακτικό τρόπο εκτίμησης του λόγου του Poisson για διάφορους τύπους τοιχοποιίας, χωρίς να απαιτείται πλήρης πειραματική ανάλυση. Η εξίσωση δείχνει ότι για πολύ χαμηλές θλιπτικές αντοχές η τιμή του ν πλησιάζει το μέγιστο θεωρητικό όριο 0,5, ενώ για υψηλότερες αντοχές ο λόγος μειώνεται ελαφρώς, αντανακλώντας τη μικρότερη πλευρική παραμόρφωση υπό θλίψη.

Κατά την μοντελοποίηση λήφθηκε η τιμή $\nu = 0,2$ καθώς για οπτοπλινθοδομές, η συνηθέστερη τιμή του λόγου του Poisson ν είναι 0,20. Για το ξύλο λαμβάνεται η τιμή $\nu = 0,3$

4.3. Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας

Αντοχή σε Διατμητική Ολίσθηση – Βιβλιογραφία & Κ.Α.Δ.Ε.Τ.

Για τον αρχικό, σχεδόν ευθύγραμμο κλάδο της καμπύλης αστοχίας της τοιχοποιίας, είναι γενικά αποδεκτό το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Coulomb, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_u = f_{ws} = f_{wso} + \mu \sigma_n$$

όπου:

f_{wso} η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας υπό μηδενική θλιπτική τάση (συνοχή),

μ ο φαινόμενος συντελεστής τριβής,

σ_n η θλιπτική τάση στη διατομή.

Στη βιβλιογραφία, οι τιμές του συντελεστή τριβής μ κυμαίνονται συνήθως από 0,4 έως 0,7. Το τμήμα αυτό της καμπύλης είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς αντιστοιχεί στη συνήθη περιοχή των ορθών τάσεων λειτουργίας της τοιχοποιίας.

Η παραπάνω σχέση υιοθετείται από τον Κ.Α.Δ.Ε.Τ. (Κανονισμό Αντισεισμικής Δομικής Ενίσχυσης Τοιχοποιίας), όπου σημειώνεται ότι, σε έλλειψη ακριβέστερων στοιχείων, ο συντελεστής τριβής μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 0,40. Παρ' όλα αυτά, συνιστάται η χρήση κατάλληλης, ενδεχομένως αυξημένης τιμής του συντελεστή τριβής, ιδιαίτερα για κατασκευές μεγάλης ιστορικής και αρχιτεκτονικής αξίας, βάσει της βιβλιογραφίας.

Η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας υπό μηδενική θλιπτική τάση (συνοχή) μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Σε κάθε περίπτωση, η διατμητική αντοχή δεν μπορεί να λαμβάνεται μεγαλύτερη από:

$$\tau_u \leq 0,065 f_{bc}$$

όπου f_{bc} η μέση θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων. Στην περίπτωση μας τα όρια για την διατμητική αντοχή λήφθηκαν ως : -0,1 **Mpa** και 0,1 **Mpa** για την περίπτωση των επιλύσεων του μοντέλου για την αρχική φάση του ναού καθώς και για την μεταγενέστερη φάση επεμβάσεων στον ναό περί το 1936, ενώ για την επίλυση μετά τις επεμβάσεις του 1978 τα όρια της διατμητικής αντοχής λαμβάνονται ως -0,2 **Mpa** και 0,2 **Mpa**.

4.4. Θεμελίωση και έδαφος

Για την θεμελίωση του ναού της Μεταμορφώσεως του Σωτήρος δεν βρέθηκαν στοιχεία από τυχόν διερευνητικές τομές. Το πάχος θεμελίωσης θεωρήθηκε ότι είναι το ίδιο με της ανωδομής. Το έδαφος λήφθηκε ως κατηγορίας Β στην συγκεκριμένη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

4.5. Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας

Η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται από τη γωνία εφαρμογής της τάσης. Στην παρούσα ανάλυση υπολογίζεται για οριζόντιο, κατακόρυφο και τυχαίο γωνιακό εφελκυσμό,

σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις §§6.3 και 6.4 του Κ.Α.Δ.Ε.Τ.

4.5.1 Οριζόντιος εφελκυσμός ($\theta = 0^\circ$)

Σύμφωνα με τα σχόλια της §6.4(β) του Κ.Α.Δ.Ε.Τ., και σε έλλειψη ακριβέστερων στοιχείων, όταν η θλιπτική αντοχή του κονιάματος δεν υπερβαίνει τα 2,0 MPa, η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπό οριζόντιο εφελκυσμό είναι περίπου:

$$f_0 \approx 0,10 \text{ MPa}$$

4.5.2 Κατακόρυφος εφελκυσμός ($\theta = 90^\circ$)

Για κατακόρυφο εφελκυσμό, σύμφωνα με τη §6.3 του Κ.Α.Δ.Ε.Τ., η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας εκτιμάται περίπου στο ήμισυ της οριζόντιας τιμής. Το μέγεθος αυτό αντικατοπτρίζει τη συνάφεια μεταξύ κονιάματος και λιθοσωμάτων:

$$f_{90} = 0,50 \cdot f_0 \approx 0,05 \text{ MPa}$$

4.5.3 Εφελκυσμός υπό τυχαία γωνία θ

Η εφελκυστική αντοχή υπό γωνία θ προσδιορίζεται γραφικά από καμπύλη που συνδέει την οριζόντια με την κατακόρυφη αντοχή. Η καμπύλη αυτή αποτελεί τμήμα έλλειψης, όπου τα μήκη των ημιαξόνων αντιστοιχούν στις αλγεβρικές τιμές του οριζόντιου και κατακόρυφου εφελκυσμού. Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής υπό γωνία θ δίνεται από το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος που τέμνει την έλλειψη για τη συγκεκριμένη γωνία.

Η εξίσωση της έλλειψης γράφεται ως εξής:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

όπου:

$$a = f_0, b = f_{90}$$

$$x = f_\theta \cos \theta, y = f_\theta \sin \theta$$

Για παράδειγμα, για γωνία $\theta = 45^\circ$, με βάση τις προηγούμενες τιμές $a = 0,10 \text{ MPa}$ και $b = 0,05 \text{ MPa}$, έχουμε:

$$x = f_{45} \cos 45^\circ = 0,707 f_{45}$$

$$y = f_{45} \sin 45^\circ = 0,707 f_{45}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση της έλλειψης:

$$\frac{(0,707 f_{45})^2}{0,10^2} + \frac{(0,707 f_{45})^2}{0,05^2} = 1$$

$$f_{45} = \sqrt{0,10 \cdot 0,05} \approx 0,071 \text{ MPa}$$

Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπό γωνία 45°.

4.5.4. Παραδοχές για την υφιστάμενη εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας

Για την περίπτωση του πηλοκονιάματος ως συνδετικό υλικό η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας κατά την επίλυση του μοντέλου ελήφθη $f_{wt} = 0,1 \text{ Mpa}$ ενώ στην περίπτωση του ασβεστοκονιάματος ελήφθη $f_{wt} = 0,2 \text{ Mpa}$ σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές του ΚΑΔΕΤ. Στην περίπτωση των μελλοντικών επεμβάσεων αναστήλωσης με χρήση τσιμεντοκονιάματος η τιμή της εφελκυστικής αντοχής τοιχοποιίας λαμβάνεται $f_{wt} = 0,4 \text{ Mpa}$.

5 Ανάλυση κτιριακού μοντέλου του ναού

5.1. Μεθοδολογία Ανάλυσης σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης για την αποτίμηση της κατασκευής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΔΕΤ.

Σύμφωνα με την §5.1.1 του ΚΑΔΕΤ, η μέθοδος ανάλυσης επιλέγεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα, τη στάθμη γνώσης των υλικών και της κατασκευής, καθώς και τη σπουδαιότητα του κτιρίου. Ο Κανονισμός επιτρέπει τη χρήση απλοποιημένων μεθόδων, υπό την προϋπόθεση ότι η συμπεριφορά της κατασκευής μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά μέσω αυτών. Ειδικότερα, σύμφωνα με το εδάφιο γ) της §5.1.3 του ΚΑΔΕΤ, η ισοδύναμη στατική ανάλυση δύναται να εφαρμοστεί όταν η κατασκευή είναι κανονική σε κάτοψη και καθ' ύψος, τα διαφράγματα μπορούν να θεωρηθούν επαρκώς άκαμπτα στο επίπεδό τους και δεν αναμένεται σημαντική συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών στη σεισμική απόκριση. Στις περιπτώσεις αυτές, η σεισμική δράση μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ισοδύναμων οριζόντιων στατικών φορτίων, τα οποία κατανέμονται καθ' ύψος του φορέα σύμφωνα με τη μάζα και τη δυναμική του χαρακτηριστική συμπεριφορά. Με βάση τα παραπάνω, και δεδομένης της σχεδόν κανονικής κάτοψης του ναού, επιλέχθηκε η εφαρμογή της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης ως επαρκούς και σύμφωνης με τις απαιτήσεις του ΚΑΔΕΤ μεθόδου σεισμικής αποτίμησης.

5.2. Προσομοίωση του φέροντος οργανισμού

Αρχικά έγινε το τρισδιάστατο μοντέλο του ναού στο λογισμικό Autocad στο οποίο υλοποιήθηκαν απλοποιητικές παραδοχές σχετικά με τη γεωμετρία του φορέα. Ο φορέας σχεδιάστηκε συμμετρικός ως προς τον οριζόντιο άξονα (Εικόνες 5-1 έως 5-8).

Η αριθμητική προσομοίωση του φέροντος οργανισμού του Ιερού Ναού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα υπολογιστικά εργαλεία για την ανάλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων μηχανικής.

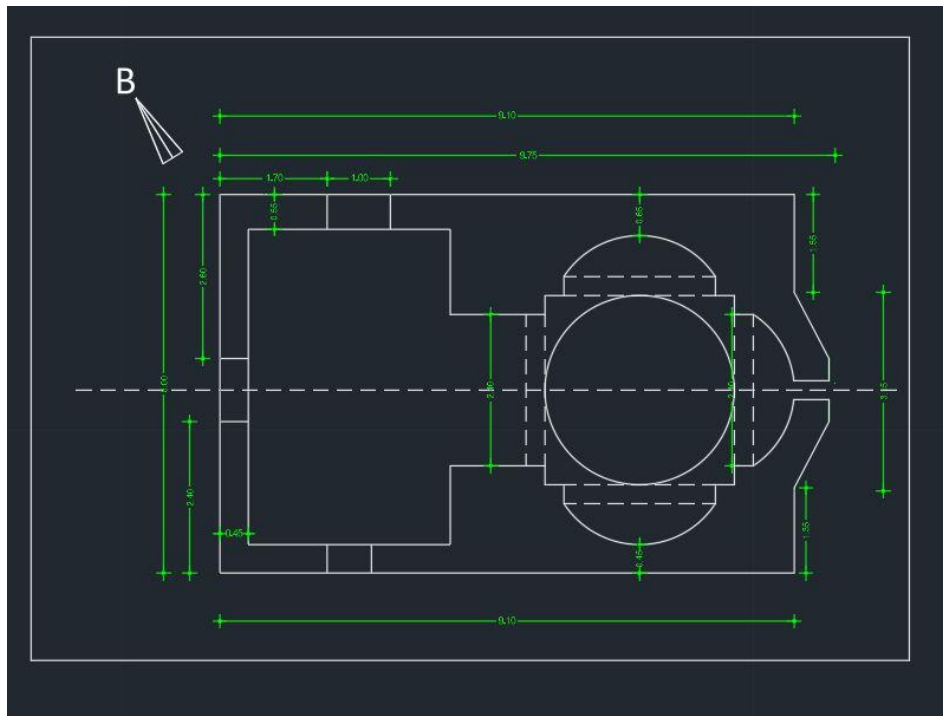
Το Abaqus βασίζεται στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM) και παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων γεωμετριών, ετερογενών υλικών και μη γραμμικής συμπεριφοράς, χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην περίπτωση ιστορικών κατασκευών από τοιχοποιία. Η συμπεριφορά τέτοιων δομικών συστημάτων είναι έντονα μη γραμμική, με ανάπτυξη ρωγμών, απώλεια δυσκαμψίας και πιθανή θραύση υπό σεισμική δράση.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το αριθμητικό προσομοίωμα περιλαμβάνει:

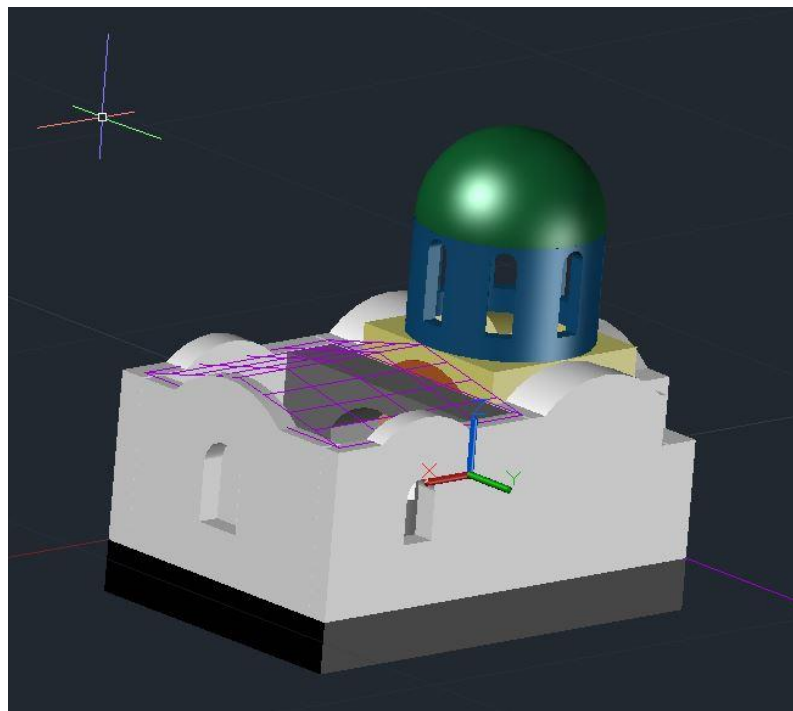
- Τη γεωμετρική αποτύπωση του φέροντος οργανισμού (τοιχοποιίες, θόλοι, τόξα, τρούλος, εσωτερικά διαφράγματα).
- Τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, θλιπτική, εφελκυστική και διατμητική αντοχή).
- Τη διακριτοποίηση του φορέα σε κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία (solid στοιχεία)
- Την επιβολή συνοριακών συνθηκών και σεισμικών φορτίσεων σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιλογή κατάλληλου προσομοιώματος υλικού για την τοιχοποιία, ώστε να αποδοθεί ρεαλιστικά η εφελκυστική αστοχία και η ανάπτυξη ρωγμών, φαινόμενα που κυριαρχούν στη σεισμική απόκριση μνημειακών κατασκευών.

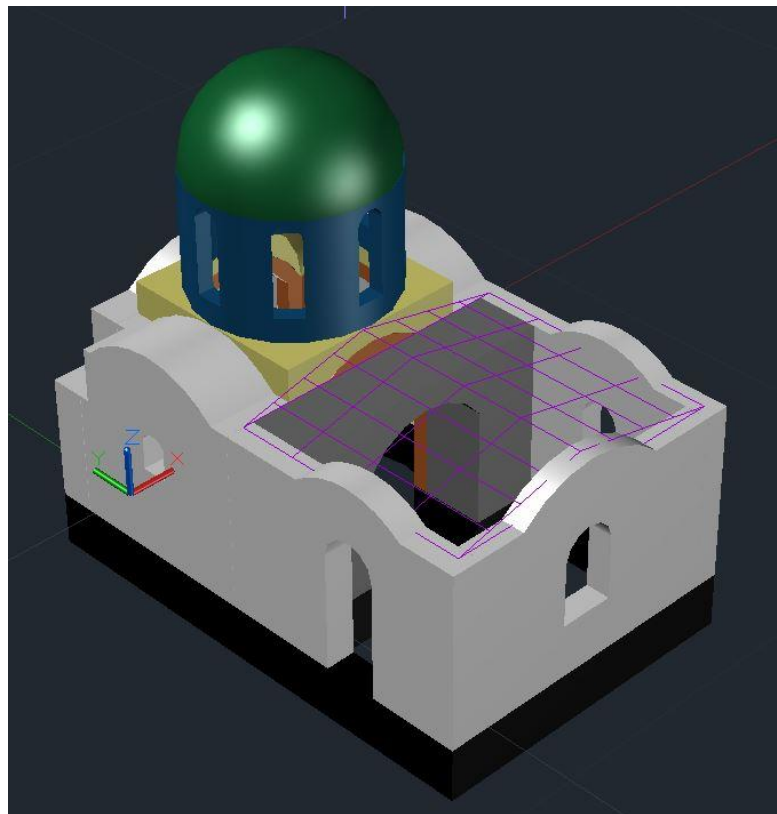
Η χρήση του Abaqus επιτρέπει την εκτέλεση τόσο γραμμικών στατικών αναλύσεων όσο και μη γραμμικών δυναμικών ή ψευδοστατικών αναλύσεων, παρέχοντας πλήρη εικόνα της κατανομής τάσεων, παραμορφώσεων και μηχανισμών αστοχίας.



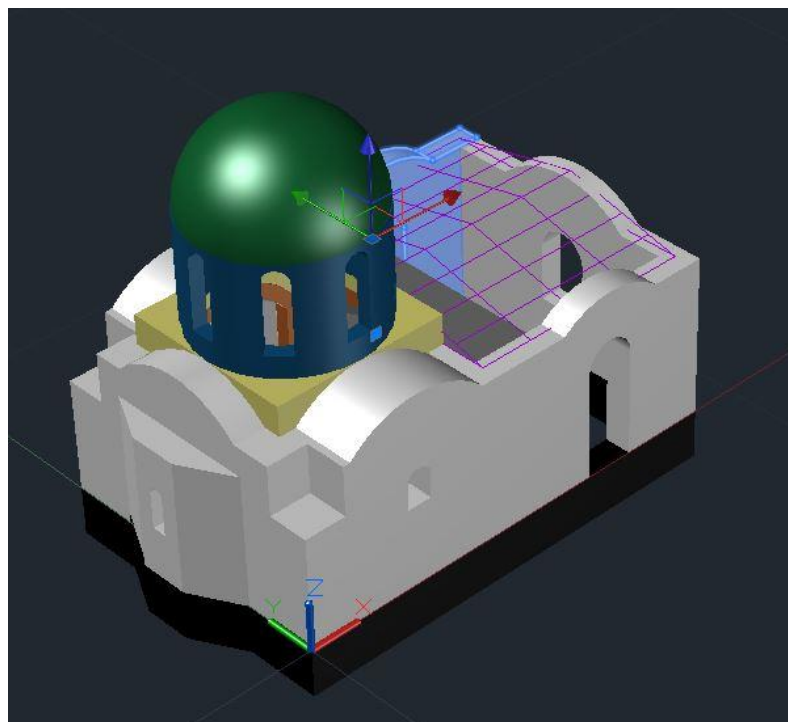
ΕΙΚΟΝΑ 5-1: ΚΑΤΟΨΗ ΝΑΟΥ Γ-Γ



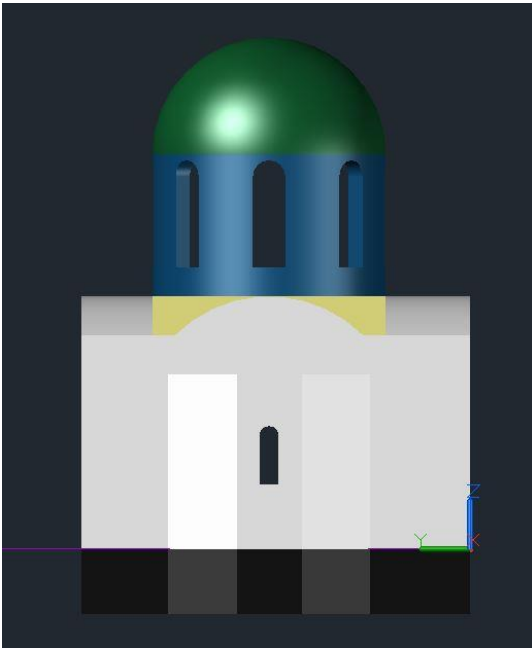
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: 3D MODEL (ΝΔ ΟΨΗ)



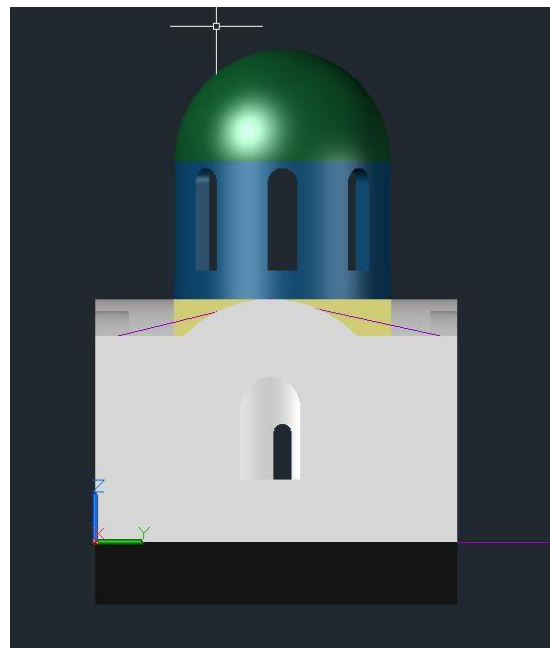
ΕΙΚΟΝΑ 5-3: 3D MODEL (BA ΟΨΗ)



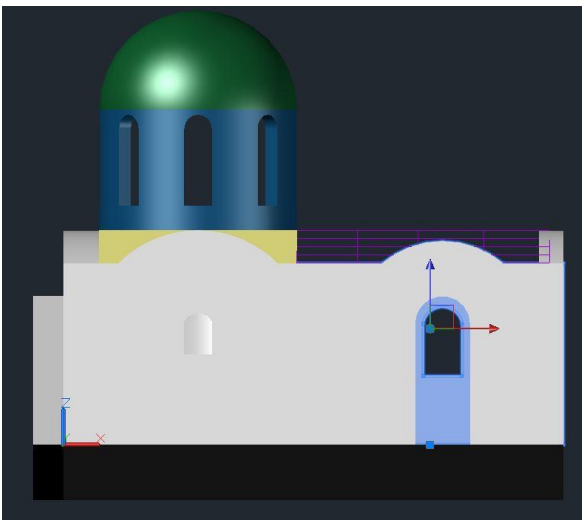
ΕΙΚΟΝΑ 5-4: 3D MODEL (BA ΟΨΗ)



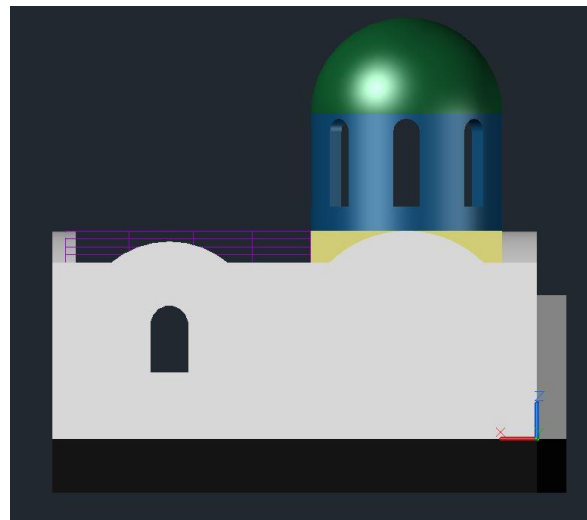
ΕΙΚΟΝΑ 5-5: 3D MODEL (ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-6: 3D MODEL (ΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-7: 3D MODEL (ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-8: 3D MODEL (ΝΟΤΙΑ ΟΨΗ)

5.3. Διαδικασία μοντελοποίησης στο Abaqus

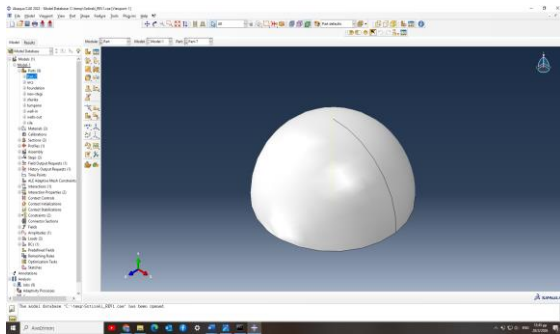
(Part → Property → Assembly → Step → Load → Mesh → Job)

Η ανάπτυξη του αριθμητικού προσομοιώματος στο Abaqus ακολουθεί μια συγκεκριμένη και δομημένη διαδικασία, η οποία οργανώνεται σε διαδοχικά στάδια στο περιβάλλον Abaqus/CAE. Τα βασικά βήματα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται ακολούθως.

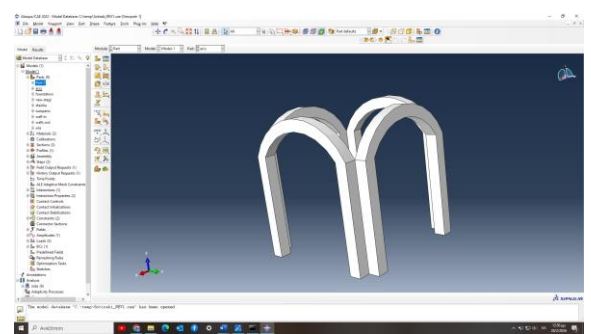
5.3.1 Part

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η γεωμετρική μοντελοποίηση του φέροντος οργανισμού. Δημιουργούνται τα επιμέρους δομικά στοιχεία (τοιχοποιίες, θόλοι, τόξα, τρούλος κ.λπ.) ως τρισδιάστατα παραμετρικά σώματα (3D deformable solids).

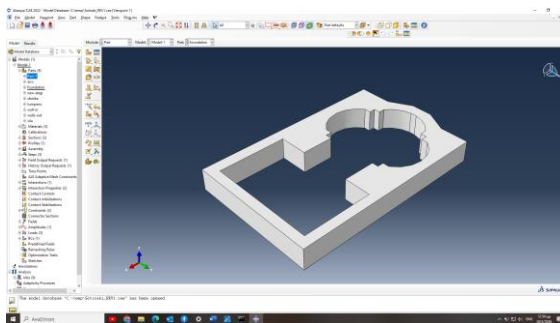
Η ακρίβεια της γεωμετρίας εξαρτάται από το επίπεδο λεπτομέρειας που επιδιώκεται και τον σκοπό της ανάλυσης (γραμμική ή μη γραμμική). Για το μοντέλο του Ναού χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα parts (ΕΙΚΟΝΕΣ 5-9 ΕΩΣ 5-16):



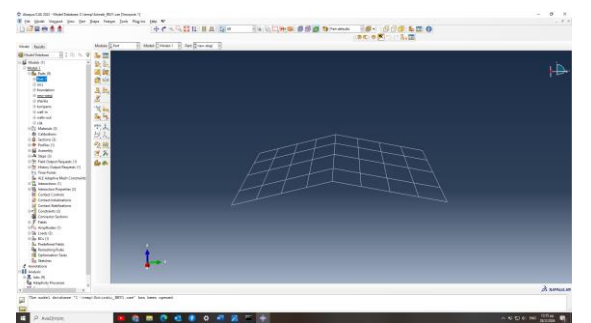
ΕΙΚΟΝΑ 5-9: “PART7” (ΤΡΟΥΛΛΟΣ)



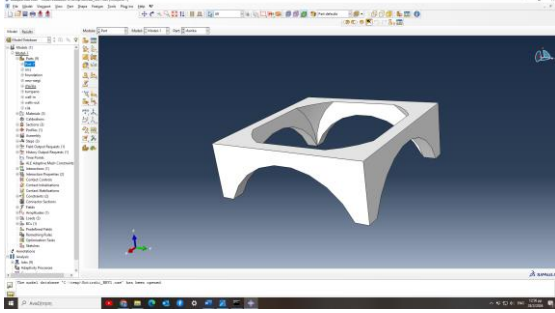
ΕΙΚΟΝΑ 5-10: “ARCS” (ΤΟΞΑ)



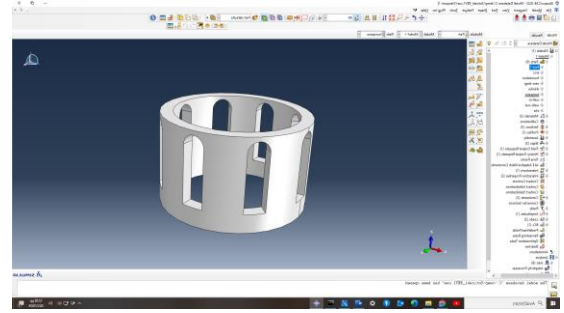
ΕΙΚΟΝΑ 5-11: “FOUNDATION” (ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ)



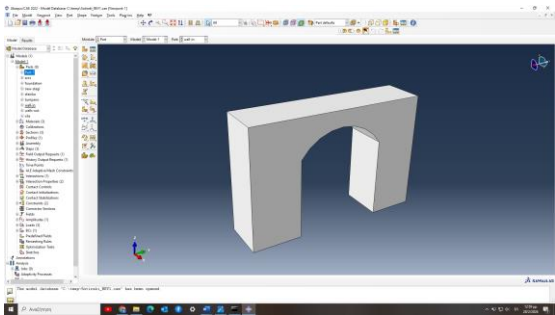
ΕΙΚΟΝΑ 5-12: “NEW STEGI” (ΣΤΕΓΗ)



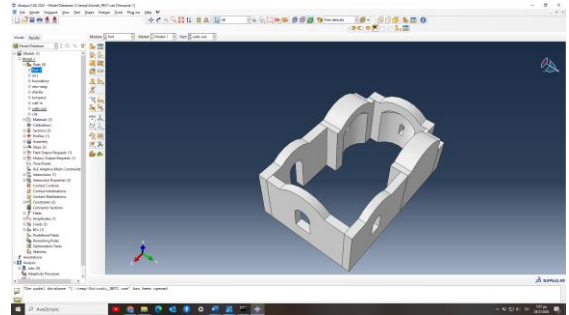
ΕΙΚΟΝΑ 5-13: “ΣΦΑΙΡΙΚΑ” (ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΤΡΙΓΩΝΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-14: “ΤΥΜΡΑΝΟ” (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-15: “WALL-IN” (ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-16: “WALLS-OUT” (ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ
ΤΟΙΧΟΙ)

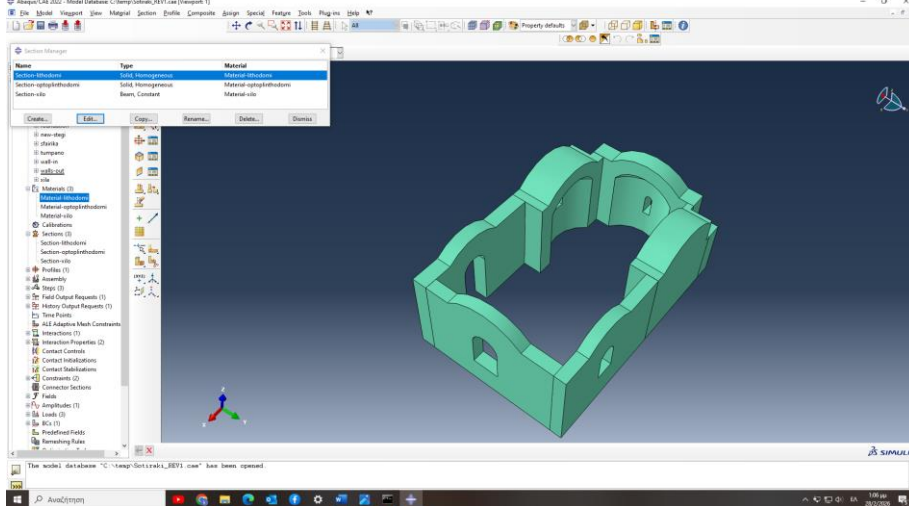
5.3.2. Property

Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών (ΕΙΚΟΝΑ 5-17) και οι διατομές.

Περιλαμβάνει:

- Ορισμό ελαστικών ιδιοτήτων (E , ν)
- Καθορισμό αντοχών (θλιπτική, εφελκυστική, διατμητική)
- Επιλογή κατάλληλου προσομοιώματος υλικού (π.χ. ελαστικό, μη γραμμικό, damage plasticity για τοιχοποιία)

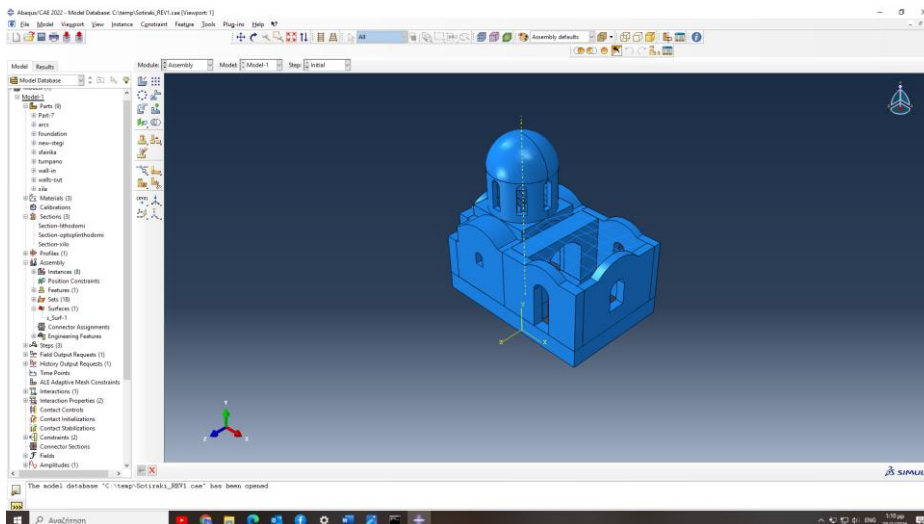
Στη συνέχεια γίνεται η αντιστοίχιση (section assignment) των ιδιοτήτων στα γεωμετρικά μέρη.



ΕΙΚΟΝΑ 5-17: “LITHODOMI, OPTOPLINTHODOMI,XYLO” (MATERIALS)

5.3.3. Assembly

Στο βήμα αυτό συναρμολογούνται όλα τα επιμέρους μέρη σε ενιαίο μοντέλο. Καθορίζεται η σχετική τους θέση στο χώρο και ορίζονται πιθανές αλληλεπιδράσεις (interactions), όπως επαφές ή συνδέσεις μεταξύ επιμέρους στοιχείων (ΕΙΚΟΝΑ 5-18).



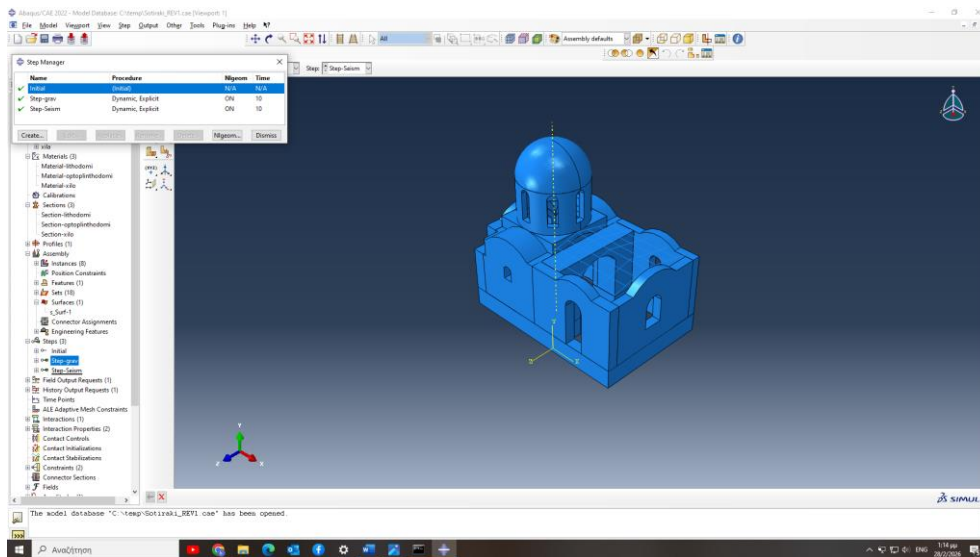
ΕΙΚΟΝΑ 5-18: “ASSEMBLY”

5.3.4. Step

Εδώ ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης:

- Γραμμική στατική
- Μη γραμμική στατική

Στο ίδιο στάδιο καθορίζονται οι παράμετροι ολοκλήρωσης, η διάρκεια φόρτισης (σε δυναμική ανάλυση) και τα κριτήρια σύγκλισης (ΕΙΚΟΝΑ 5-19).



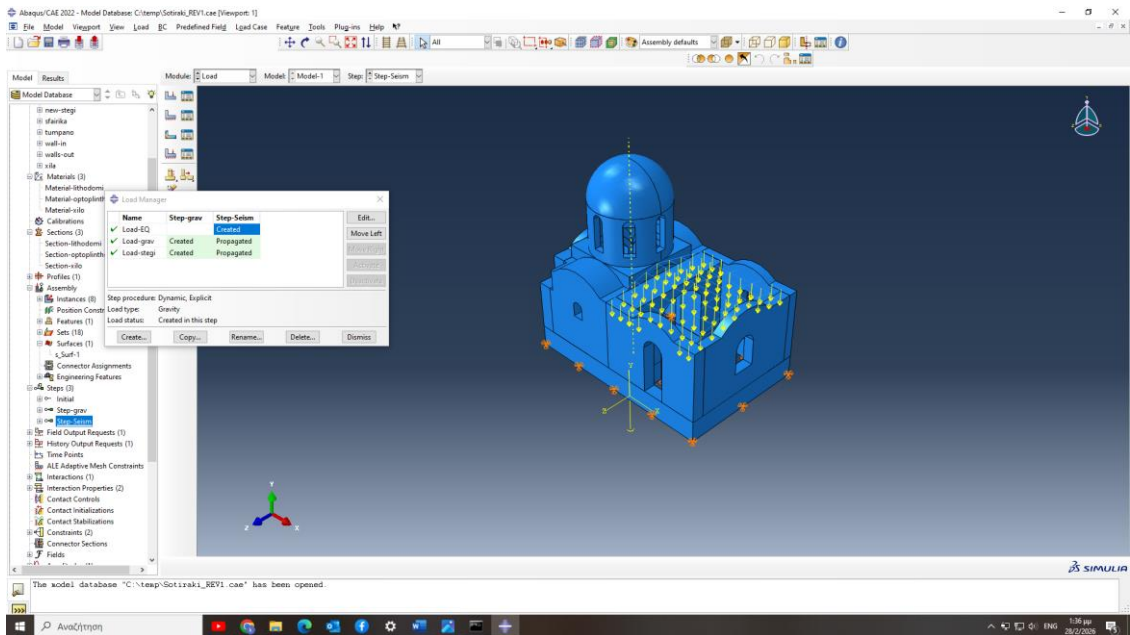
ΕΙΚΟΝΑ 5-19: “INITIAL,STEP-GRAV,STEO-SEISM” (STEPS)

5.3.5. Load

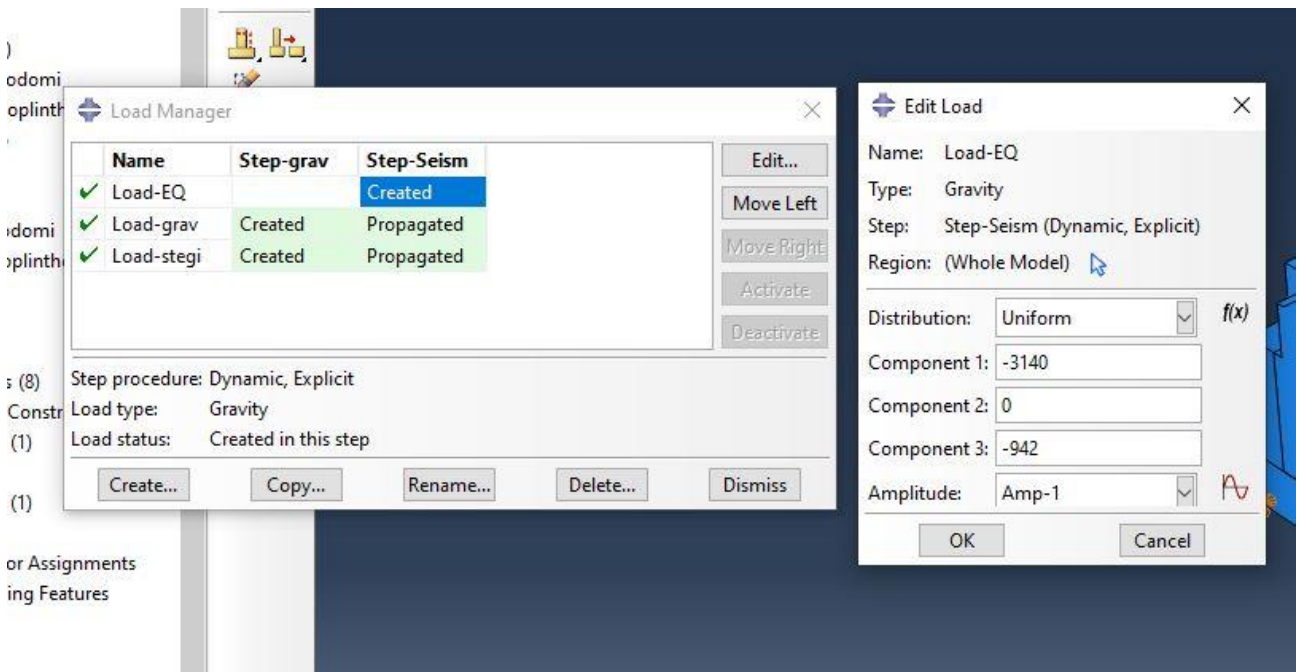
Εφαρμόζονται:

- Συνοριακές συνθήκες (π.χ. πάκτωση στη βάση)
- Βαρύτητα (self-weight)
- Σεισμικές δράσεις (ισοδύναμες οριζόντιες φορτίσεις ή επιβαλλόμενες επιταχύνσεις)

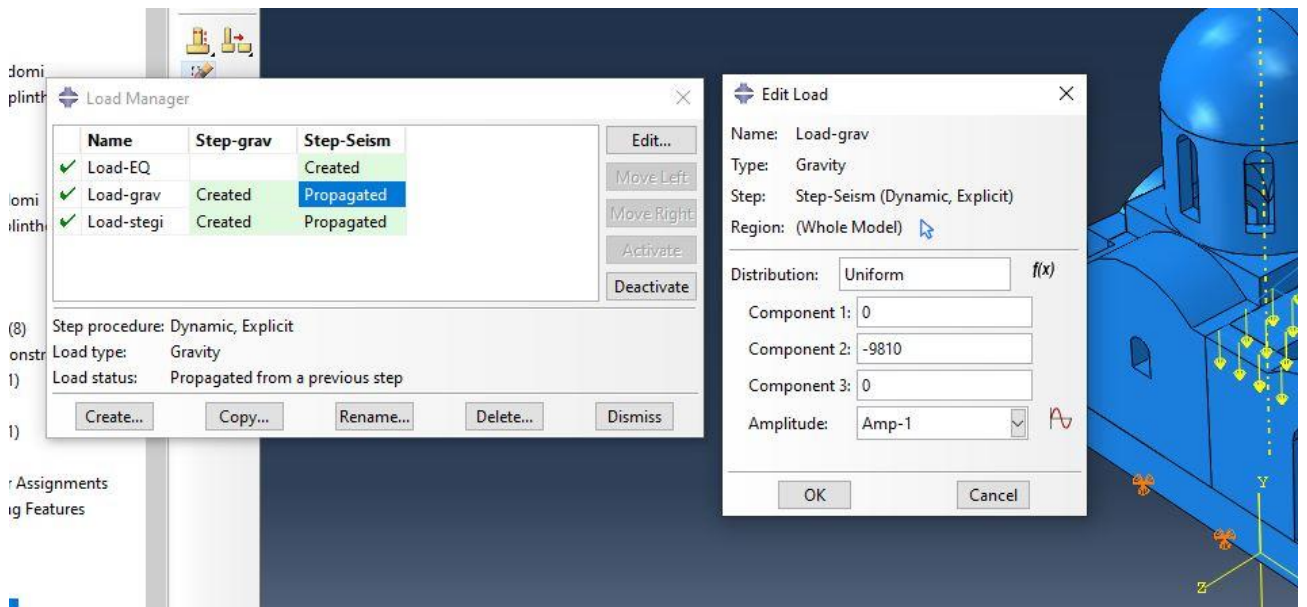
Η σωστή επιβολή φορτίων είναι κρίσιμη για την ρεαλιστική αναπαράσταση της φυσικής συμπεριφοράς του φορέα (ΕΙΚΟΝΕΣ 5-20 έως 5-23).



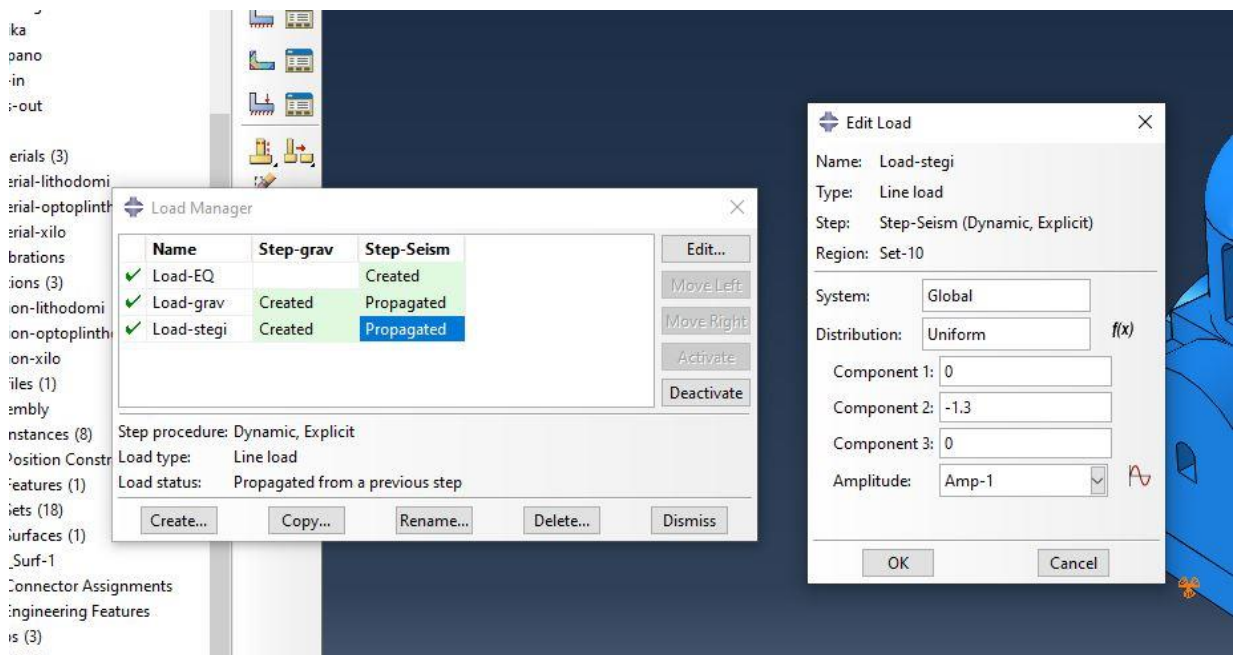
ΕΙΚΟΝΑ 5-20 : “LOAD – EQ, LOAD – STEGH, LOAD – GRAV)(ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ,ΚΙΝΗΤΑ,ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 5-21 : “LOAD – EQ” (ΤΙΜΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ $\text{mm/s}^2 \cdot 3140 \gg 0.31g$)



ΕΙΚΟΝΑ 5-22 : “LOAD – GRAV” (ΦΟΡΤΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ mm/s²)



ΕΙΚΟΝΑ 5-23 : “LOAD – STEGH” (ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΕΓΗΣ N/mm η KN/m)

5.3.6. Mesh

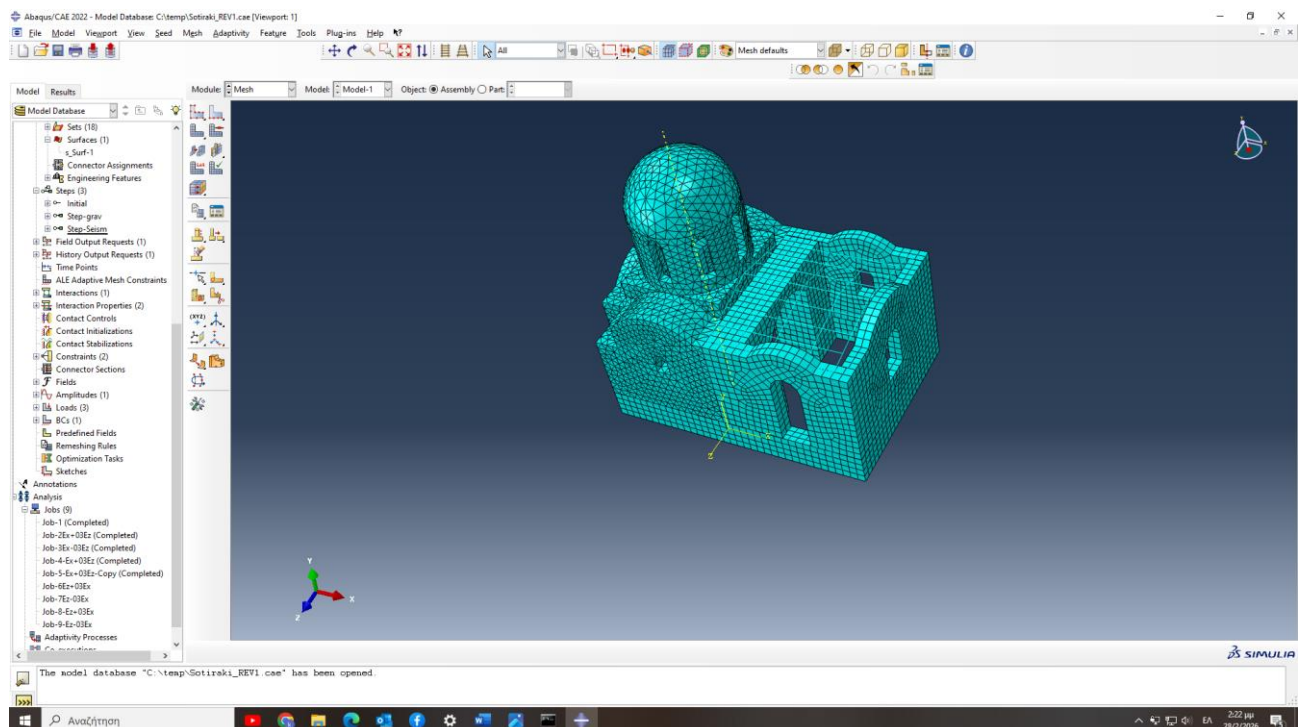
Πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία (ΕΙΚΟΝΕΣ 5-24, 5-25).

Η επιλογή:

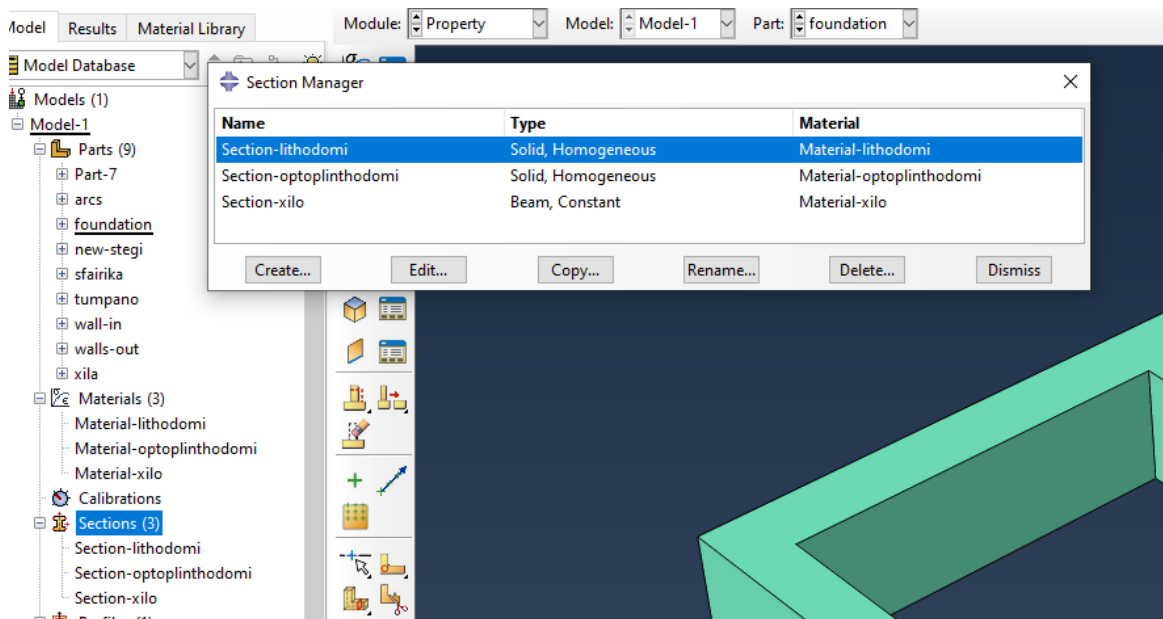
- τύπου στοιχείου (π.χ. solid elements, beam elements),
- μεγέθους πλέγματος,
- και βαθμού ολοκλήρωσης

επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια και τον υπολογιστικό χρόνο.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπου εφαρμόζεται τοπική πύκνωση πλέγματος.



ΕΙΚΟΝΑ 5-24 : “Mesh” (ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ SOLID, BEAM ELEMENTS)



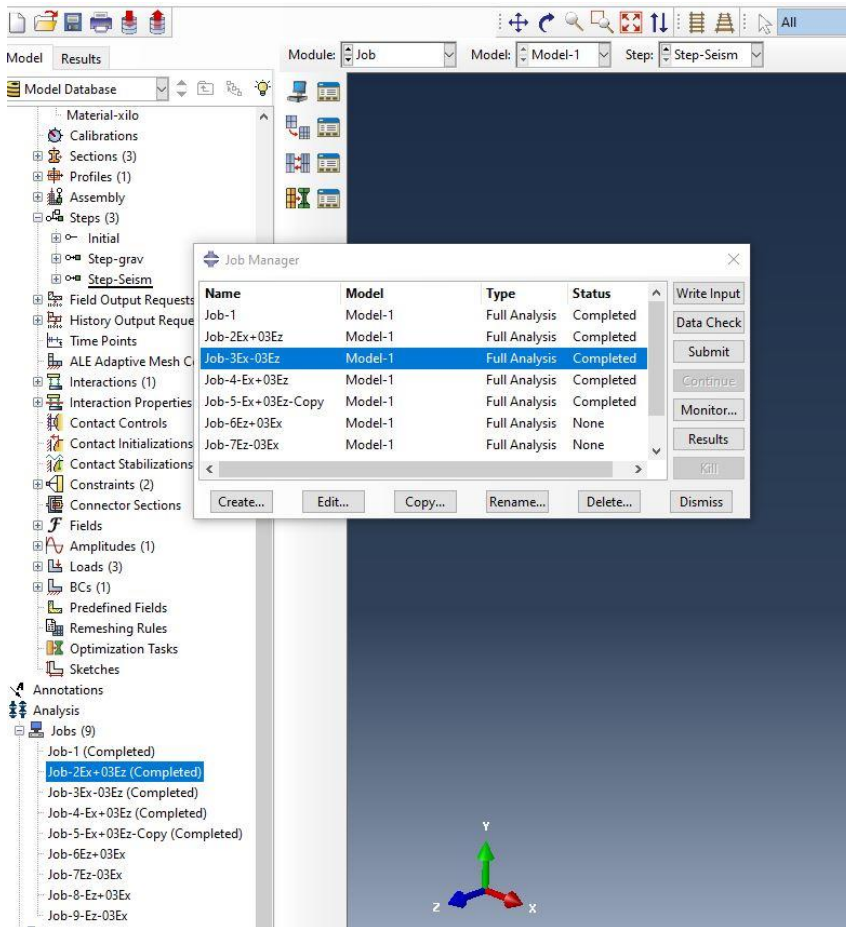
ΕΙΚΟΝΑ 5-25 : “SOLID, BEAM ELEMENTS”

5.3.7. Job

Στο τελικό στάδιο δημιουργείται και εκτελείται η ανάλυση (job submission) Δημιουργούνται 8 σεισμικοί συνδυασμοί καθώς και μία ανάλυση για τα φορτία βαρύτητας (ΕΙΚΟΝΑ 5-26).

Μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης, πραγματοποιείται μετα-επεξεργασία (post-processing) των αποτελεσμάτων, όπως:

- κατανομές τάσεων (S)
- παραμορφώσεις (U)
- ανάπτυξη ρωγμών ή δεικτών βλάβης



ΕΙΚΟΝΑ 5-26 : “Jobs”

5.4. Φορτία - Δράσεις επί της κατασκευής

Τα φορτία καθώς και οι συνδυασμοί δράσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αναλύσεις του μοντέλου φαίνονται παραπάνω στα κεφάλαια 5.3.5. και 5.3.7. Οι μονάδες των φορτίων, των τάσεων, των μετακινήσεων και γενικότερα των γεωμετρικών μεγεθών και μηχανικών χαρακτηριστικών κατά την εισαγωγή τους στο ABAQUS ήταν οι εξής (ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1):

Quantity	SI (mm)
Length	mm
Displacement (U)	mm
Force	N
Mass	tonne (10 ³ kg)
Time	S
Stress	MPa (N/mm ²)
Energy	mJ (10 ⁻³ J)
Density	tonne/mm ³

Πίνακας 5-1 : Μονάδες μέτρησης

5.4.1. Σεισμικά Φορτία - Δράσεις επί της κατασκευής

Για τον στόχο αποτίμησης B, η σεισμική δράση προσδιορίζεται σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1 του ΚΑΔΕΤ. Η αντίστοιχη στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας ορίζεται ως σεισμός με **πιθανότητα υπέρβασης 10% εντός του συμβατικού χρόνου ζωής της κατασκευής (50 έτη)**, που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς $T_R = 475$ έτη.

Η συγκεκριμένη στάθμη σεισμικής δράσης είναι συμβατή με τον σεισμό σχεδιασμού οριακής κατάστασης αστοχίας (ULS), όπως προβλέπεται στον Ευρωκώδικας 8.

Στο πλαίσιο της αποτίμησης υφισταμένων κατασκευών, η σεισμική δράση δεν μειώνεται με τον συντελεστή συμπεριφοράς q που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό νέων κατασκευών, αλλά με τον **καθολικό δείκτη συμπεριφοράς q^*** . Για τον στόχο αποτίμησης B λαμβάνεται:

$$q^*=1.50 \text{ (Πίνακας 5-2)}$$

Η τιμή αυτή αντανακλά τη συντηρητική θεώρηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας των υφισταμένων κατασκευών, επιτρέποντας περιορισμένη μόνο μείωση των σεισμικών εντατικών μεγεθών.

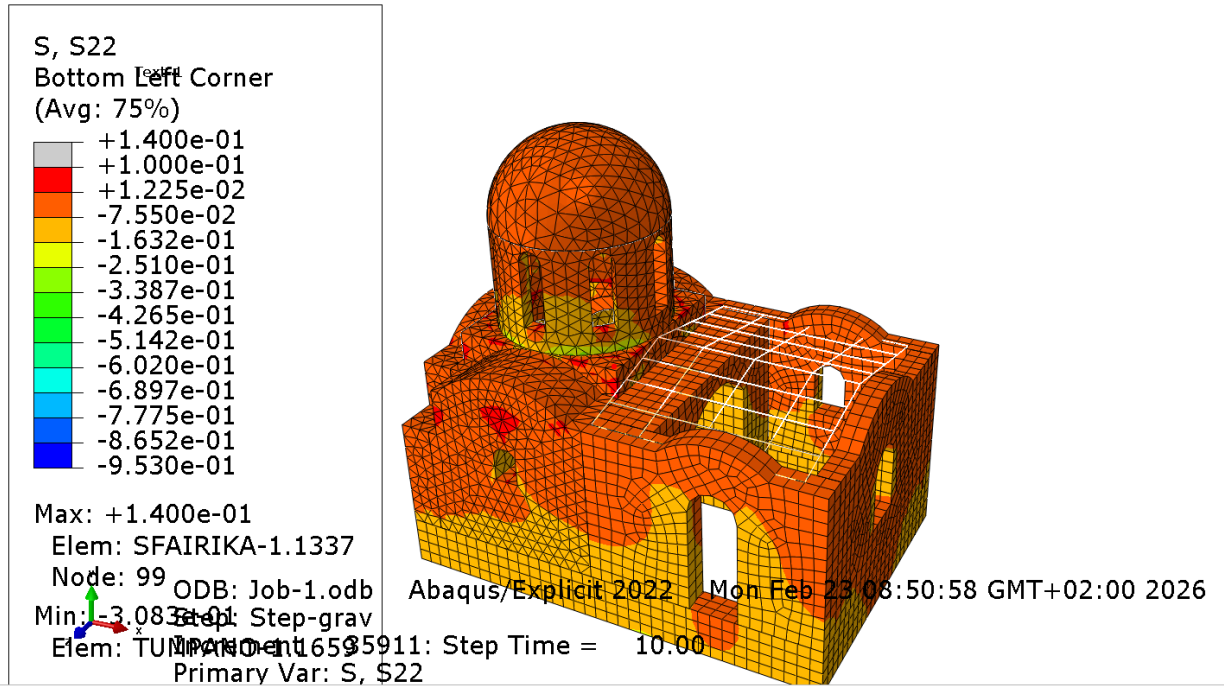
Παράμετροι υπολογισμού σεισμικού φορτίου	
Ζώνη σεισμικότητας Θεσσαλονίκης	I
Σεισμική επιτάχυνση εδάφους	$a_{gR}=0.16g$
Περίοδος επαναφοράς σεισμικής διέγερσης	$T=475$ έτη
Πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη	$p=10\%$
Σπουδαιότητα κατασκευής	Σ1
Συντελεστής σπουδαιότητας κατασκευής (§4.4.1.2 ΚΑΔΕΤ)	$\gamma_I=1.00$
Κατηγορία εδάφους	B
Συντελεστής επιρροής εδάφους	$S=1.20$
Καθολικός δείκτης συμπεριφοράς	$q^*=1.50$
Μέγιστη Φασματική επιτάχυνση στο πλατώ	$S_d(T) = \gamma_I \cdot a_{gR} \cdot S \cdot (2.50/q^*) = 0.32g$

Πίνακας 5-2: Παράμετροι υπολογισμού σεισμικού φορτίου

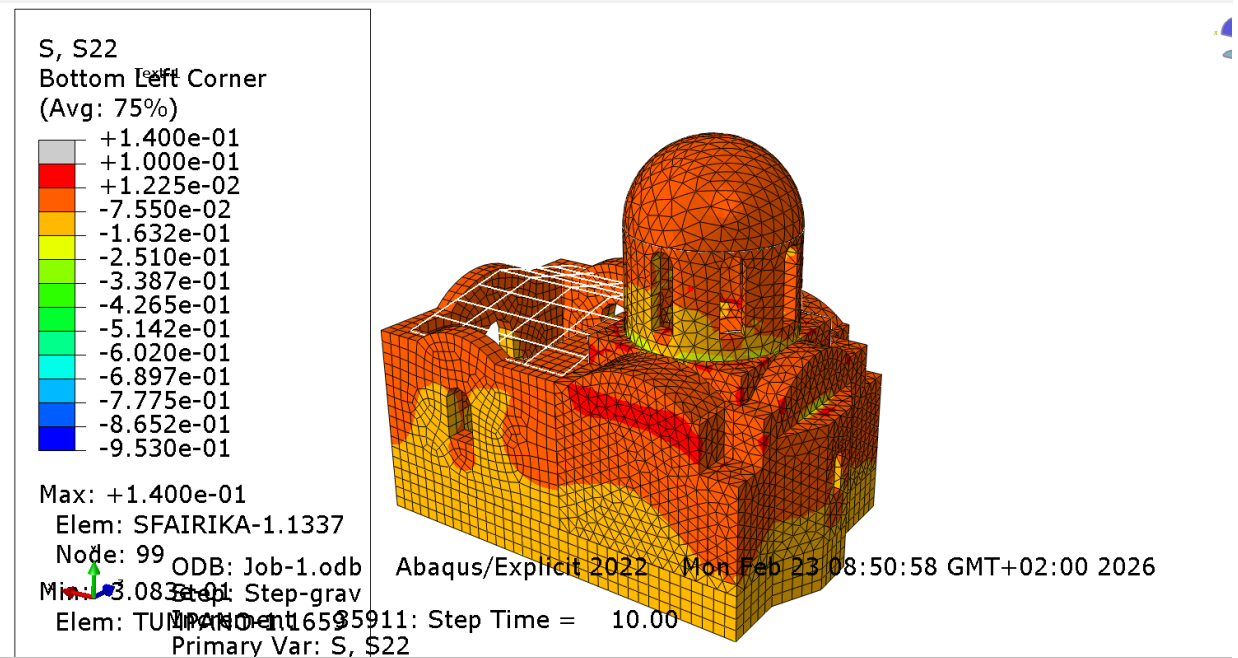
6 Σεισμική αποτίμηση και παρουσίαση αποτελεσμάτων για την αρχική μορφή του μνημείου

Ακολουθούν τα αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων που προέκυψαν μετά από την ισοδύναμη στατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προσομοίωμα του ναού για τους σεισμικούς συνδυασμούς που περιγράφησαν στα κεφάλαια 5.3.4, 5.3.5 με την αρχική μορφή μνημείου στη οποία αποτυπώνεται μεν η σημερινή γεωμετρία του ναού με τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών δε της αρχικής φάσης της κατασκευής του ναού κατά την βυζαντινή περίοδο. Πιο συγκεκριμένα στο εν λόγω προσομοίωμα η τοιχοποιία λαμβάνεται ως λιθοδομή, ο τρούλλος με τα συναφή στοιχεία του (τύμπανο, σφαιρικά) λαμβάνονται ως πλινθοδομή ενώ ως βασικό κονίαμα και στις 2 περιπτώσεις θεωρείται ο πηλός.

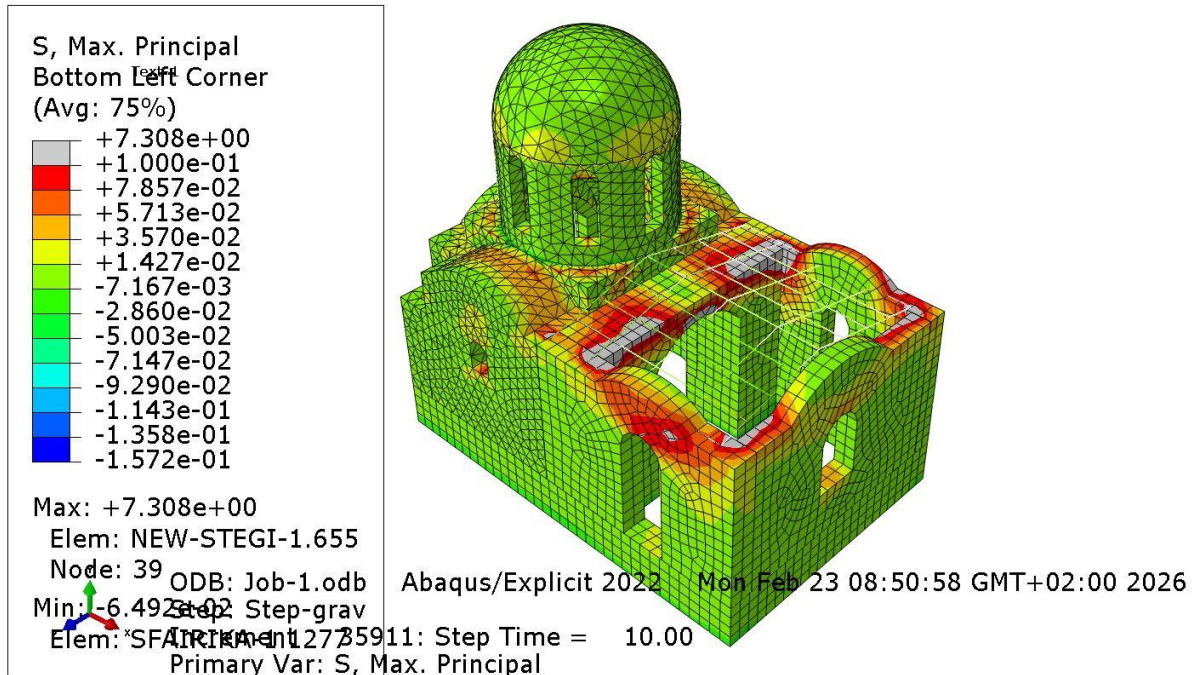
6.1. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το Ίδιο Βάρος (“Job 1”)



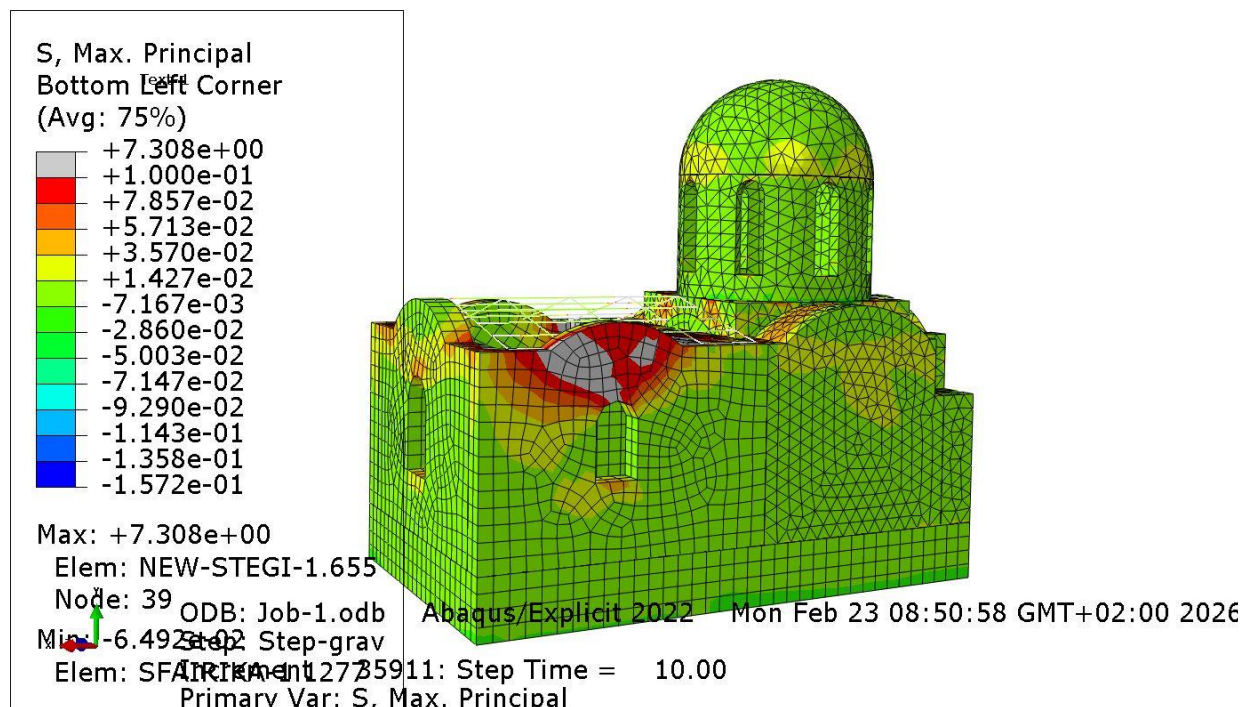
ΕΙΚΟΝΑ 6-1 : Κατακόρυφες τάσεις S22 (ΒΑ ΟΨΗ)



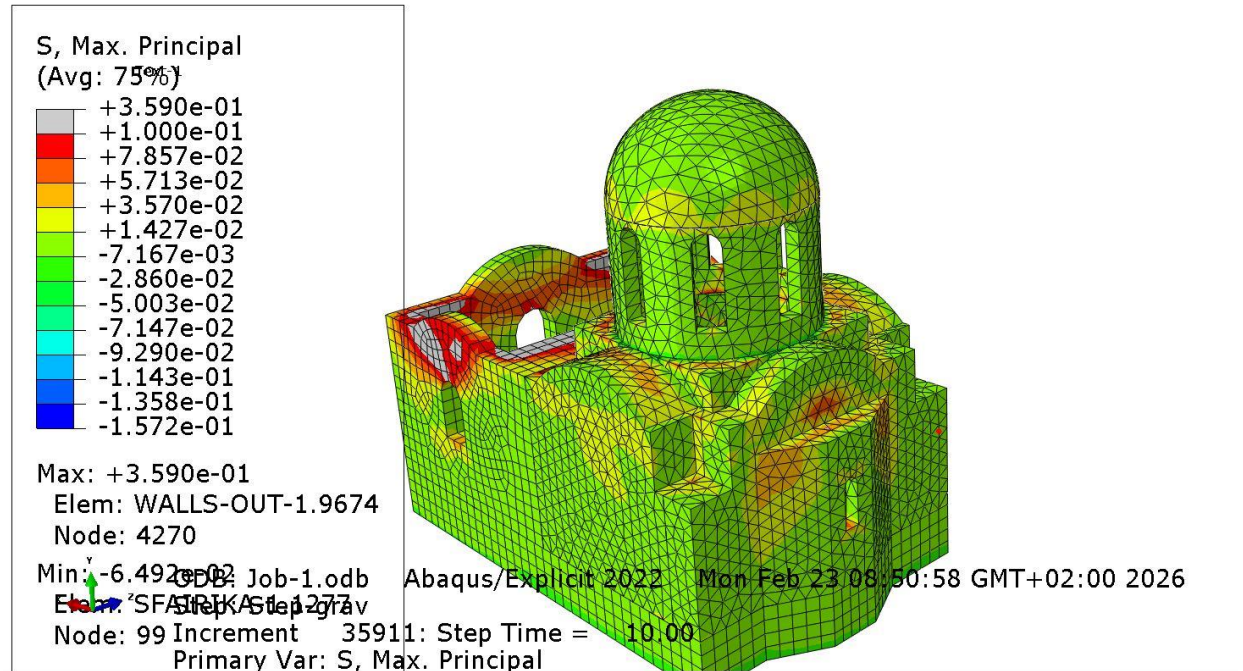
ΕΙΚΟΝΑ 6-2 : Κατακόρυφες τάσεις S22 (ΝΑ ΟΨΗ)



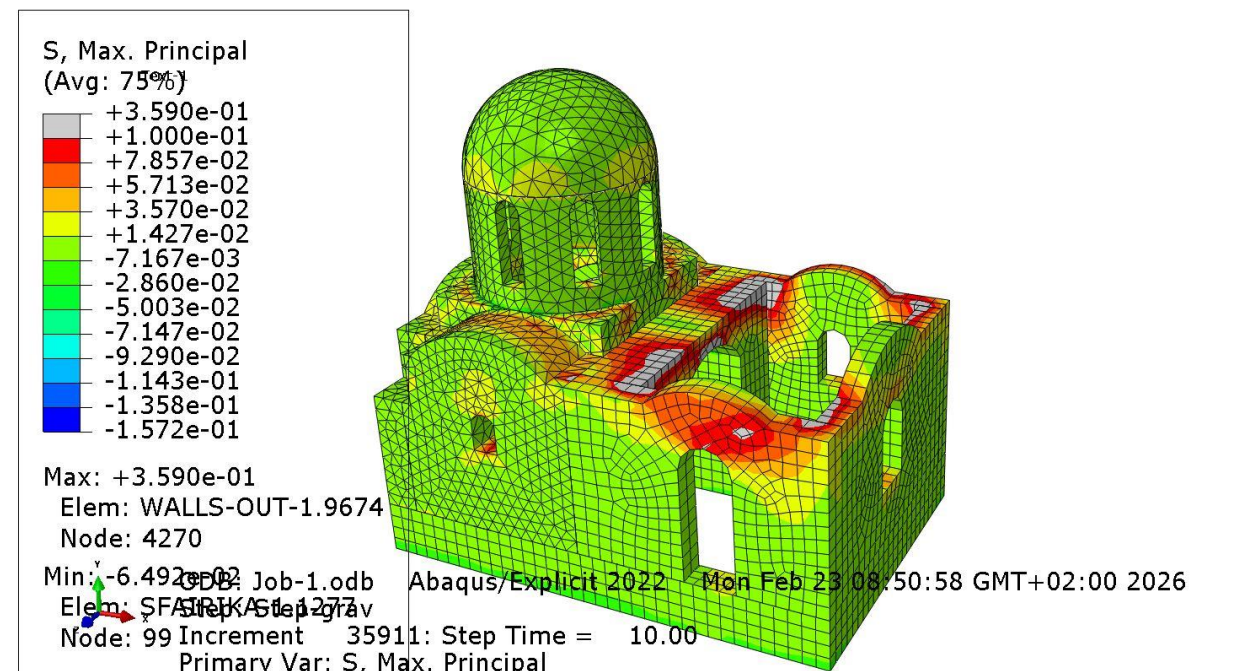
ΕΙΚΟΝΑ 6-3 : ΕΙΚΟΝΑ 6-3 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις



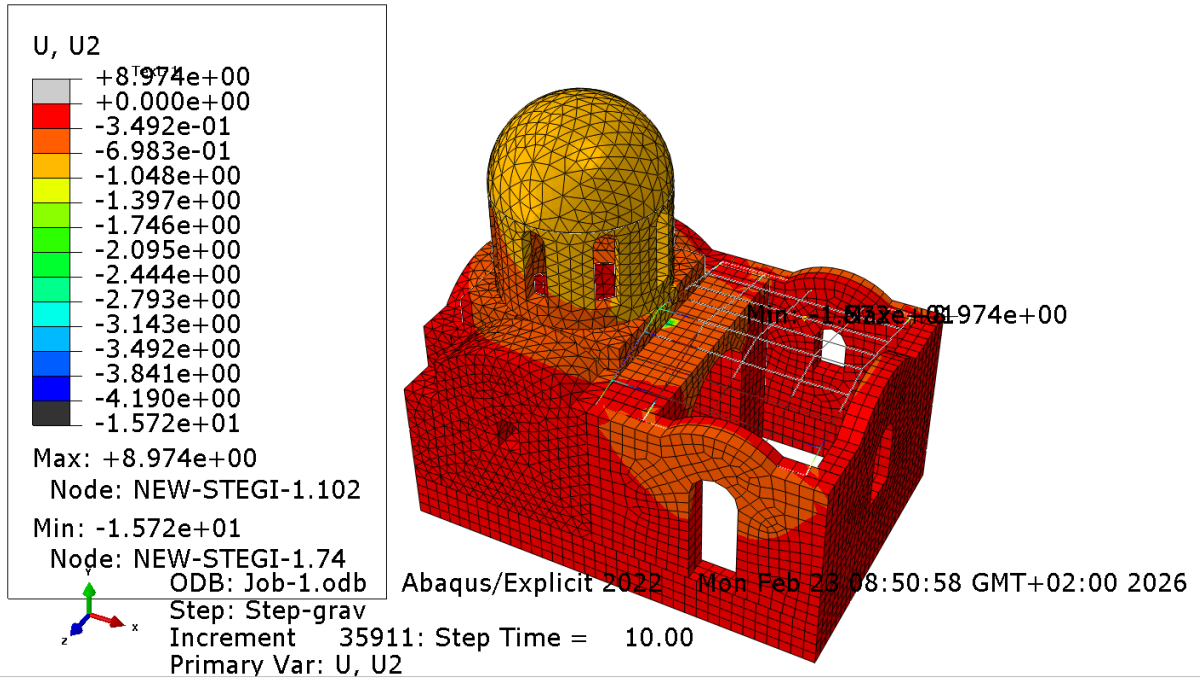
ΕΙΚΟΝΑ 6-4 : Κατακόρυφες τάσεις S22 (ΝΑ ΟΨΗ)



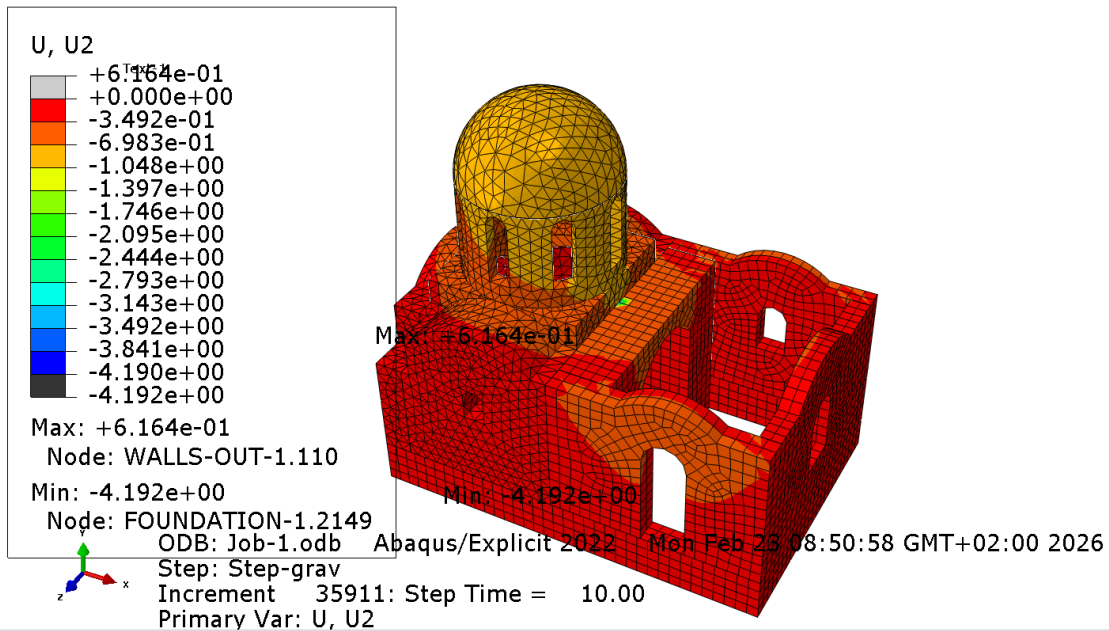
ΕΙΚΟΝΑ 6-5 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (ΒΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΣΤΕΓΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-6 : Κατακόρυφες τάσεις S22 (ΒΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΣΤΕΓΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-7 : Κατακόρυφες βυθίσεις U2 (ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-8 : Κατακόρυφες τάσεις S22 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)

Ως άνω όριο, για τις κατακόρυφες ορθές τάσεις S22 που προκύπτουν μόνο από το ίδιο βάρος της κατασκευής λαμβάνεται η τιμή 0,10 Μpa η οποία υπερβαίνεται στην περιοχή του τυμπάνου (0,14 Μpa). Αυτό βέβαια πρακτικά δεν έχει κάποια σημασία και πιθανώς είναι μια λάθος παράμετρος της μοντελοποίησης μια και δεν υφίσταται θετική κατακόρυφη τάση ή ίσως να προκύπτει από την δύναμη ορθής τάσης που ασκεί η αντίστοιχη τοιχοποιία στο τύμπανο. Πρακτικά δεν λαμβάνεται υπόψη. Ως κάτω όριο έχει ληφθεί η θλιπτική αντοχή της λιθοδομής 0,953 Μpa της οποίας δεν υπάρχει υπέρβαση όπως είναι άλλωστε και λογικό μια και αλλιώς η κατασκευή δεν θα μπορούσε να φέρει τα ίδια βάρη.

Στις περιοχές των Εικόνων 6-3 έως 6-7 με την γκρι χρωματική απόχρωση γίνεται υπέρβαση του ορίου της εφελκυστικής αντοχής. Ως μέγιστο όριο τιμής S_{max} ορίστηκε η τιμή "0.1", που αντιστοιχεί στην θεωρητική εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας. [ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ & ΔΟΜΗΤΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΪΑΣ, Κ.Α.Δ.Ε.Τ., ΦΕΚ 2493_Β_18-04-2023]. Υπέρβαση του ορίου της εφελκυστικής αντοχής παρατηρείται στην περιοχή του νάρθηκα στην στέψη της τοιχοποιίας καθώς και στην εξωτερική τοιχοποιία του πρόναου στα σημεία στέψης με τα τόξα καθώς και στις άνω γωνίες των τοιχοποιιών αυτών. Για τις βυθίσεις το όριο της σχετικής στροφής για στάθμη επιτελεστικότητας B είναι σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ $0,20\% <\theta_{out} < 0,75 \theta_{uout}$ όπως φαίνεται και στον πίνακα 6-1, όπου $\theta_{out-v} = \theta_{u1} = 0,003 * H_0 / t$, όπως ορίζεται σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ για στοιχεία που καταπονούνται σε εκτός επιπέδου δράσεις. Για στοιχεία που ελέγχονται από την κάμψη σε εκτός επιπέδου δράση, ορίζεται η ικανότητα παραμόρφωσης ως στρόφη αστοχίας με τιμή $\theta_{u1} = 0,003 * H_0 / t$ όπου H_0 είναι η απόσταση του σημείου μέγιστης μετακίνησης από την ακμή αστοχίας. Ενδεικτικά ελέγχεται η εξωτερική τοιχοποιία με την μέγιστη μετακίνηση $U2 = 0,6 \text{ mm}$ για το ίδιο βάρος:

$$\theta_{uout} = \theta_{u1} = 0,003 * H_0 / t = 0,003 * 3,30 / 0,45 = 0,022$$

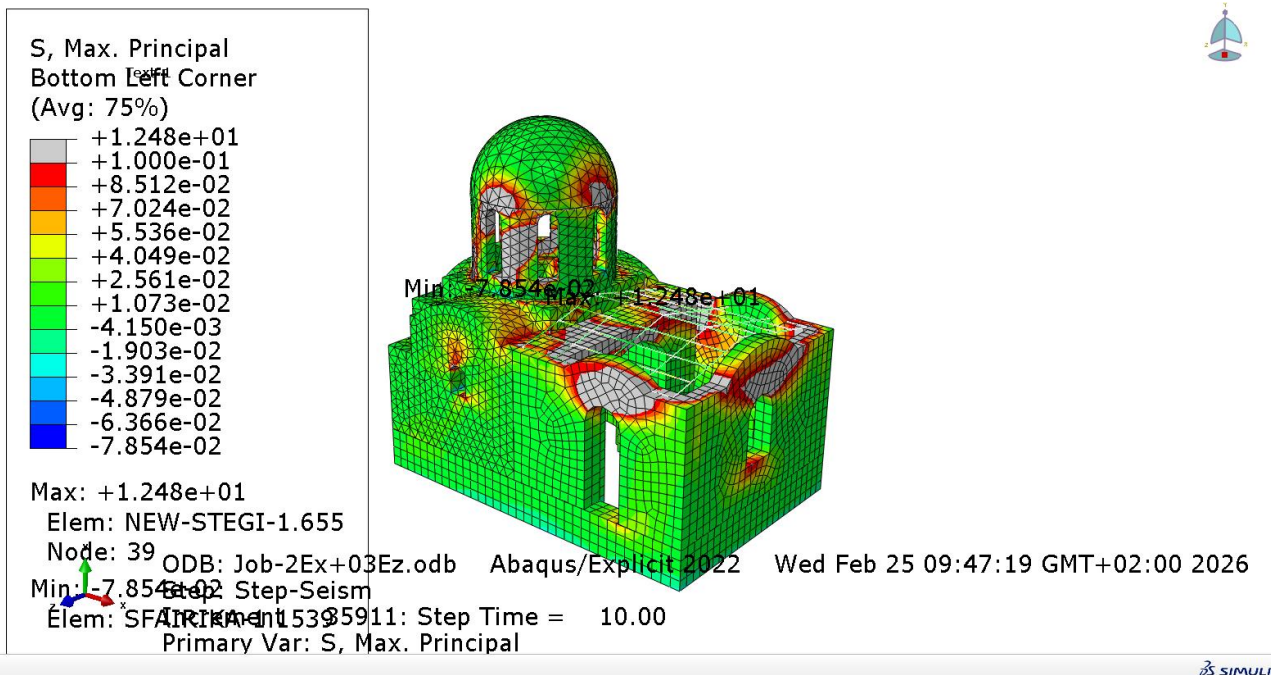
Επομένως τα όρια σχετικής στροφής είναι 0,022 έως $0,75 * 0,022 = 0,0165$

Ικανότητα παραμόρφωσης σε όρους στροφής, για εντός και εκτός επιπέδου δράση		
Είδος Σεισμικής Απόκρισης	Οριακή Στροφή στην Αστοχία	
Εντός επιπέδου, πεσσοί που ανήκουν στο σύστημα οριζόντιας αντίστασης.	Στοιχεία που ελέγχονται από κάμψη: $\theta_{u,in}=0.008 \cdot H_o/L$	
	Elements controlled by Shear: $\theta_{u,in}=0.004$	
Εκτός επιπέδου (ανατροπή)	$\theta_{u,out} = \min \{ \theta_{u,1}, \theta_{u,2} \}$	
Όρια Επιτελεστικότητας (κριτήρια αποδοχής) για εντός και εκτός επιπέδου δράση		
Είδος Σεισμικής Απόκρισης	Όρια Σχετικής Στροφής	Στάθμη Επιτελεστικότητας
Εντός Επιπέδου	$\theta_{in} < 0.15\%$	A: Άμεση Επανάχρηση /Ελεγχος βλαβών
	$0.15\% \leq \theta_{in} < 0.75 \cdot \theta_{u,in}$	B: Σημαντικές αλλά επισκευάσιμες βλάβες
	$0.75 \cdot \theta_{u,in} \leq \theta_{in} < 1.33 \cdot \theta_{u,in}$	Γ: Ασφάλεια ζωής – Αποφυγή Κατάρρευσης
Εκτός Επιπέδου (σε οριζόντια έννοια)	$\{ \theta_{out-v} ; \theta_{out-h} \} < 0.20\%$	A: Άμεση Επανάχρηση /Ελεγχος βλαβών
	$0.20\% \leq \{ \theta_{out-v} ; \theta_{out-h} \} < 0.75 \cdot \theta_{u,out}$	B: Σημαντικές αλλά επισκευάσιμες βλάβες
	$0.75 \cdot \theta_{u,out} \leq \{ \theta_{out-v} ; \theta_{out-h} \} < 1.33 \cdot \theta_{u,out}$	Γ: Ασφάλεια ζωής – Αποφυγή Κατάρρευσης

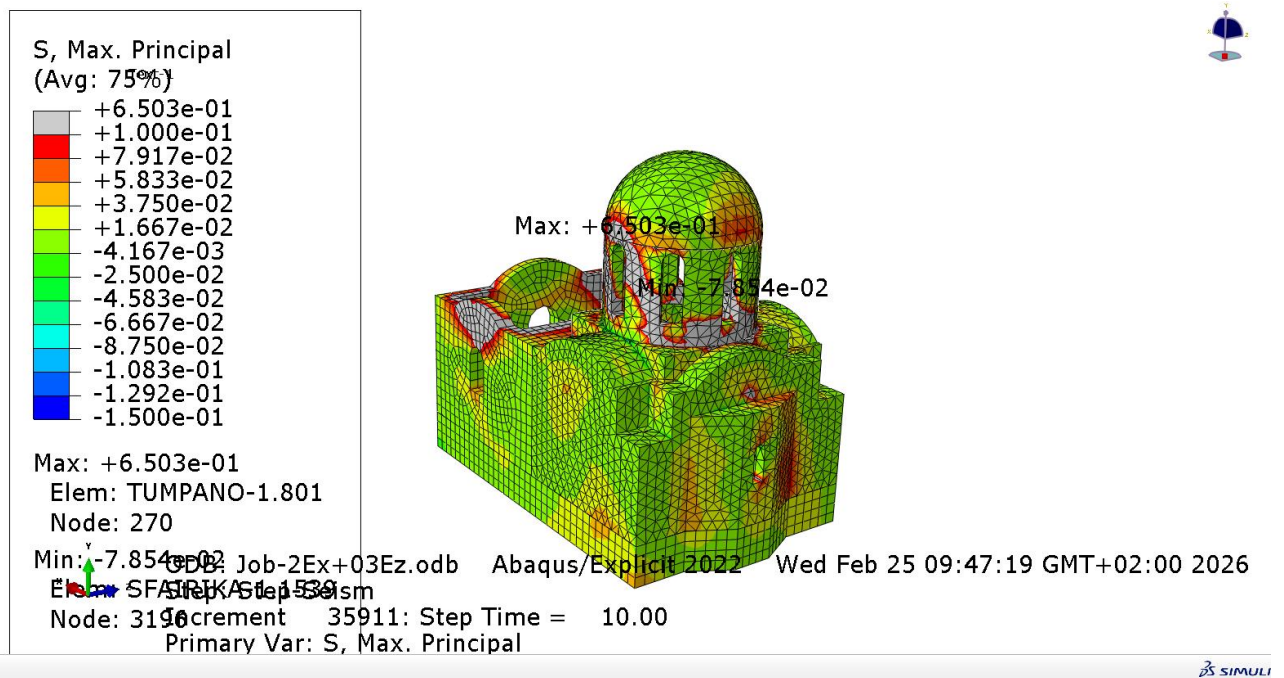
Πίνακας 6-1: Όρια επιτελεστικότητας

6.2. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ex+0.3Ez (“Job 2”)

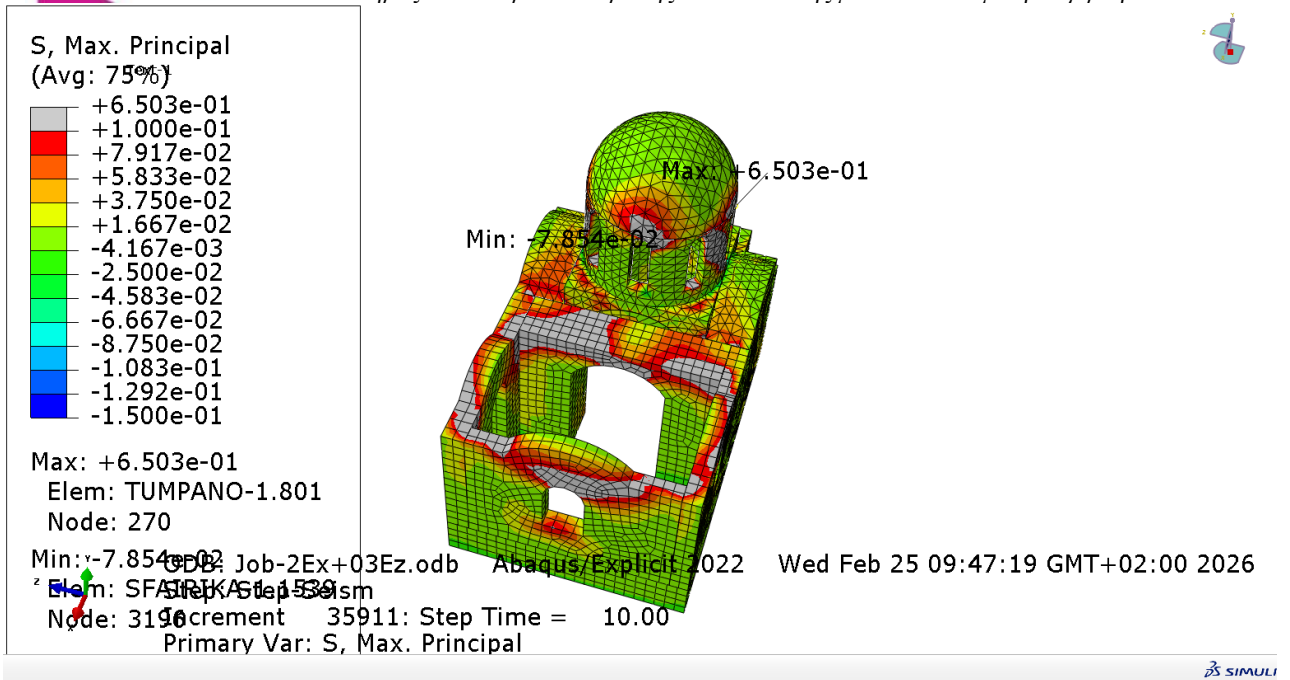
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των τάσεων, μετακινήσεων για τον σεισμικό συνδυασμό Ex+0.3Ez, όπου Ex η σεισμική δράση στην διεύθυνση x, Ez η σεισμική δράση στην διεύθυνση z. Ο συντελεστής 0.3 λαμβάνει υπόψη ότι η κατακόρυφη συνιστώσα είναι περίπου 30% της οριζόντιας, σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ/EC8. Στο ABAQUS η διεύθυνση χ είναι ο καθολικός άξονας 1, ενώ η διεύθυνση z είναι ο άξονας 3. Αντίστοιχα ο καθολικός άξονας 2 αντιστοιχίζεται στον άξονα y.



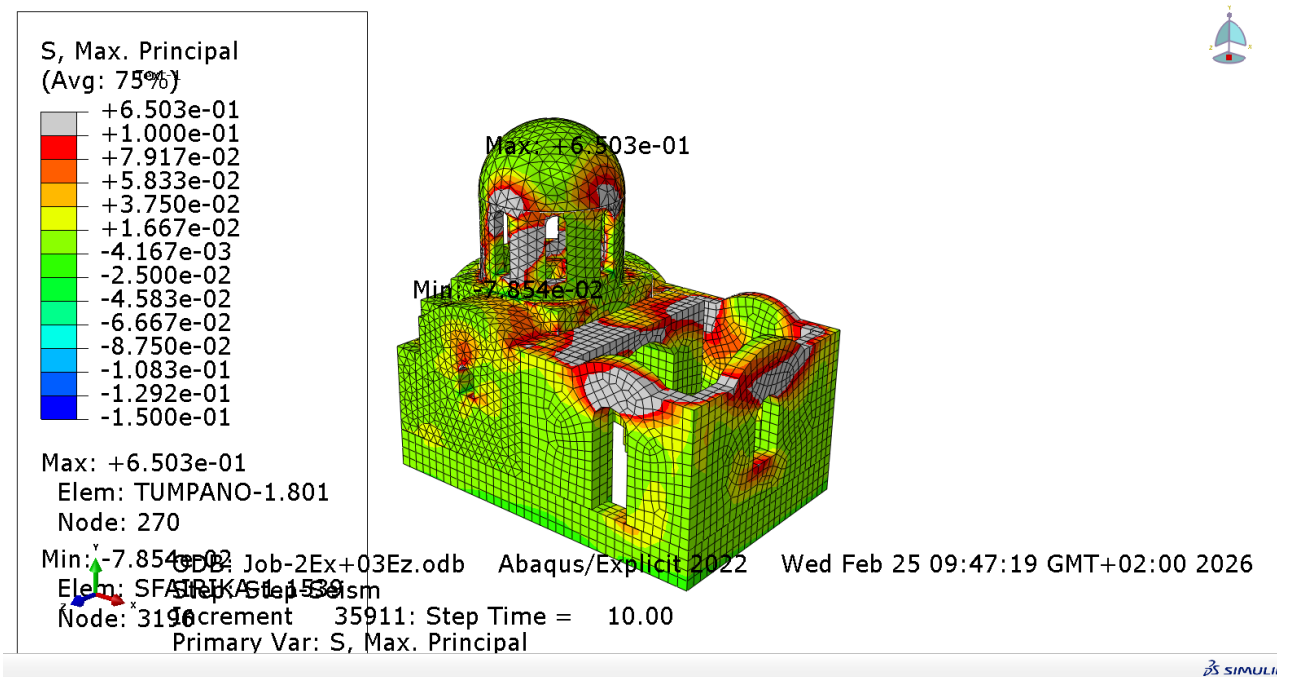
ΕΙΚΟΝΑ 6-9 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



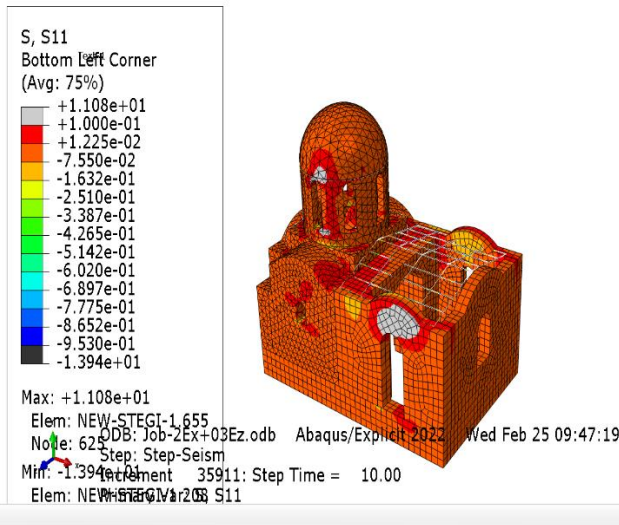
ΕΙΚΟΝΑ 6-10 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (ΝΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



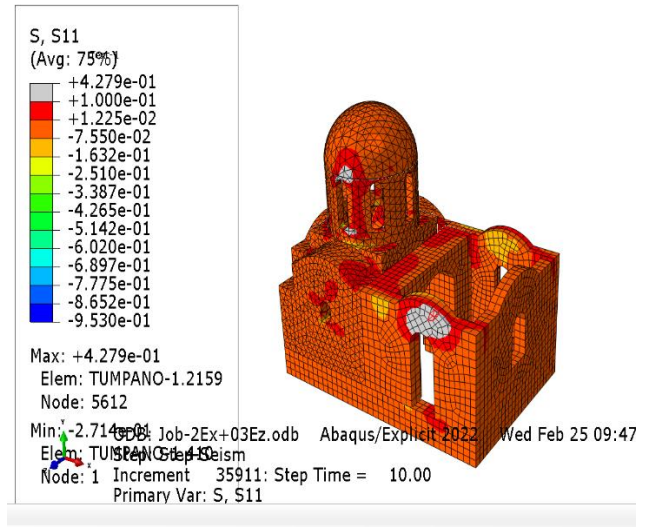
ΕΙΚΟΝΑ 6-11 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



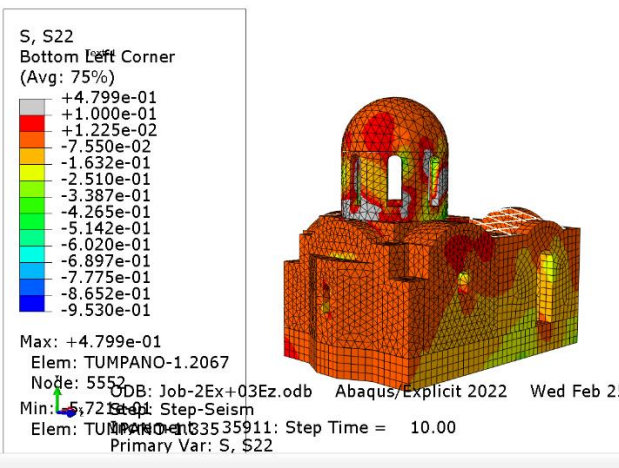
ΕΙΚΟΝΑ 6-12 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (ΒΛ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



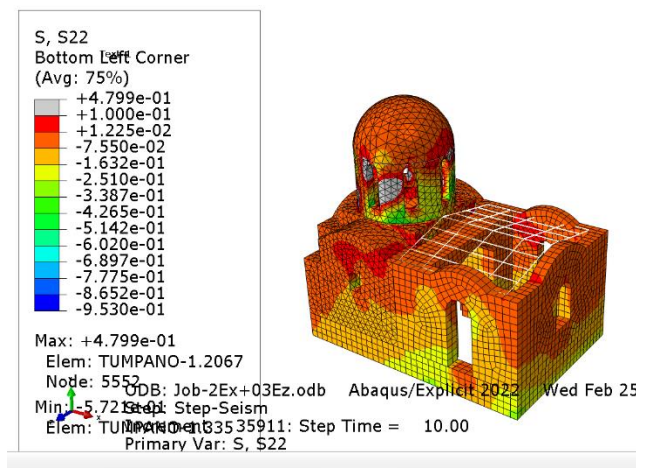
ΕΙΚΟΝΑ 6-13 : Τάσεις S11 (ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



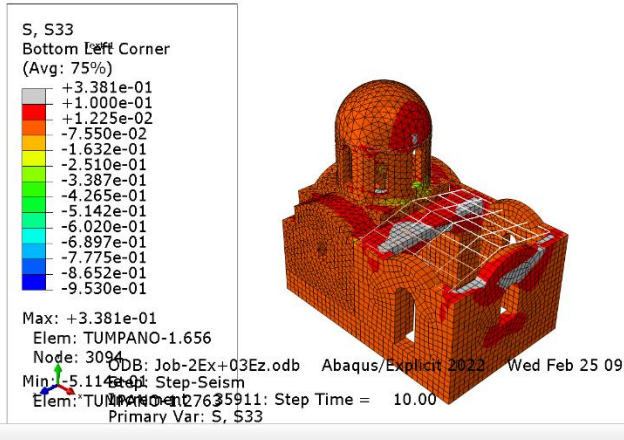
ΕΙΚΟΝΑ 6-14 : Τάσεις S11 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



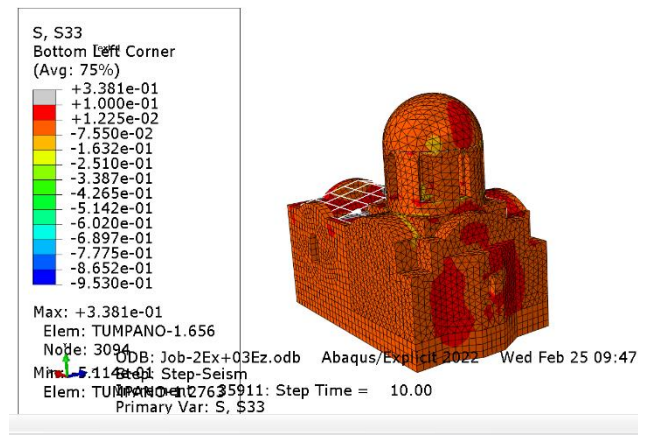
ΕΙΚΟΝΑ 6-15 : Τάσεις S22 (ΒΑ ΟΨΗ,ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



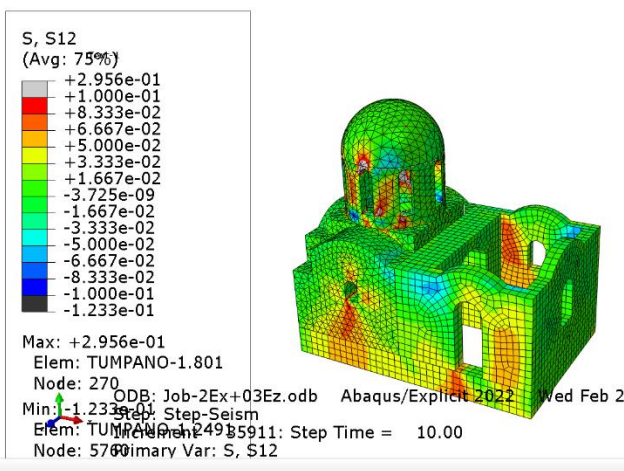
ΕΙΚΟΝΑ 6-16 : Τάσεις S22 (ΒΑ ΟΨΗ,ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



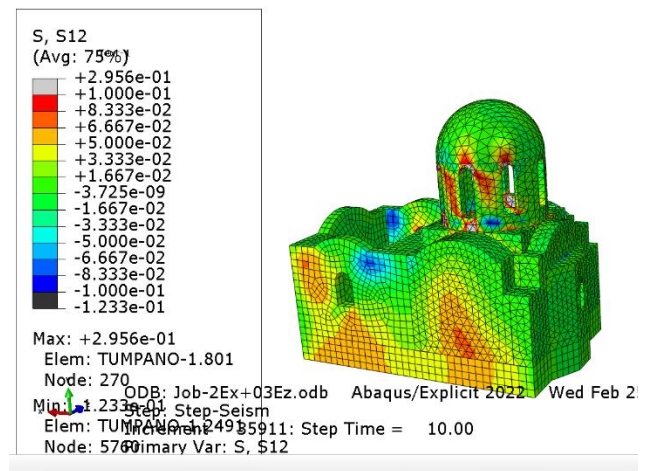
ΕΙΚΟΝΑ 6-17 : Τάσεις S33 (ΒΔ ΟΨΗ,ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



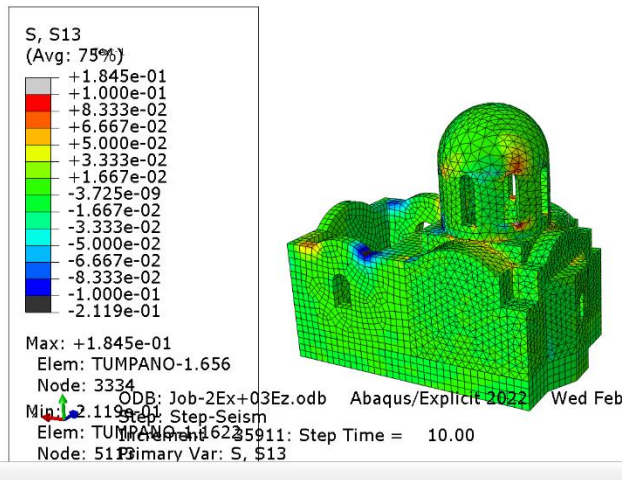
ΕΙΚΟΝΑ 6-18 : Τάσεις S33 (ΝΑ ΟΨΗ,ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



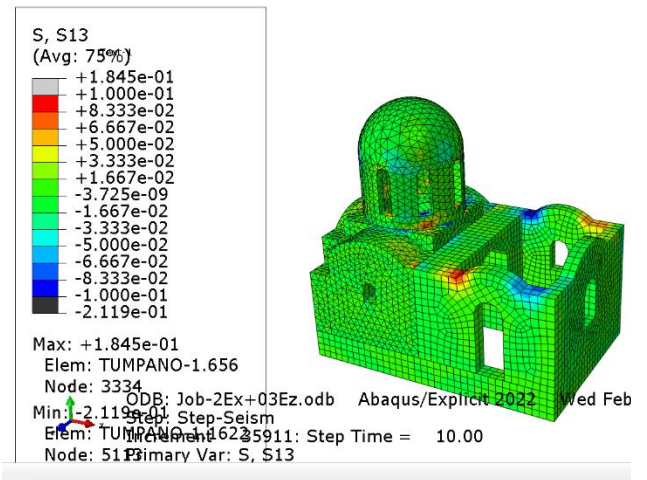
ΕΙΚΟΝΑ 6-19 : Διατμητικές τάσεις S12 (ΒΔ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



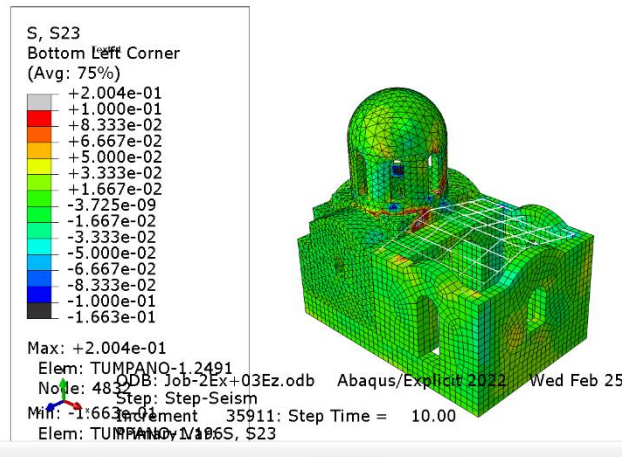
ΕΙΚΟΝΑ 6-20 : Διατμητικές τάσεις S12 (ΝΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



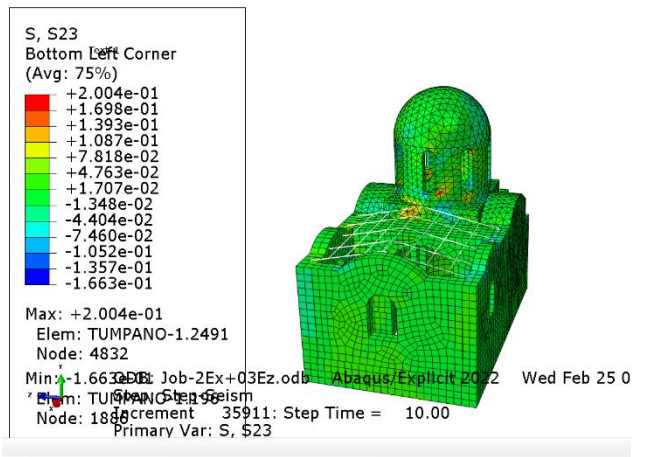
ΕΙΚΟΝΑ 6-21: Διατμητικές τάσεις S13 (ΒΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



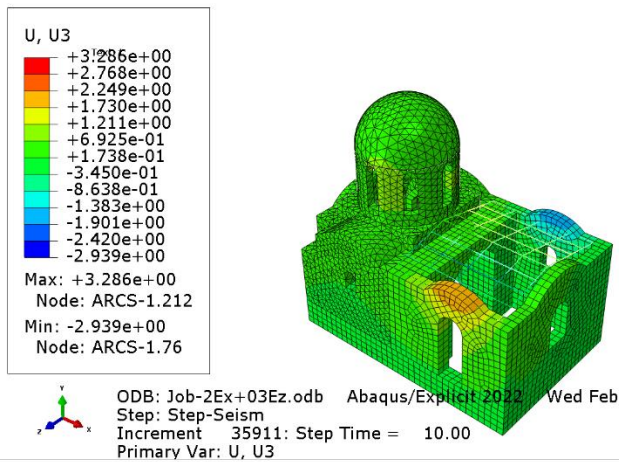
ΕΙΚΟΝΑ 6-22 : Διατμητικές τάσεις S12 (ΒΔ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



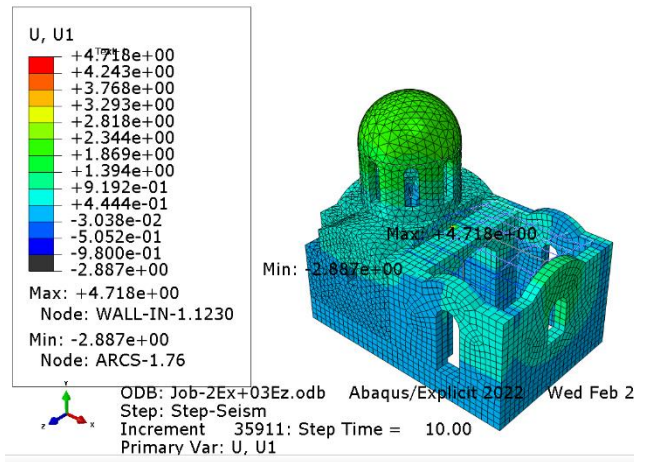
ΕΙΚΟΝΑ 6-23 : Διατμητικές τάσεις S23 (ΒΔ ΟΨΗ)



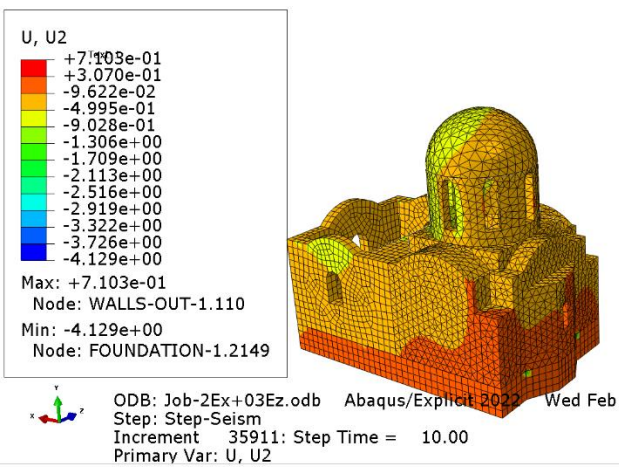
ΕΙΚΟΝΑ 6-24 : Διατμητικές τάσεις S23 (ΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ)



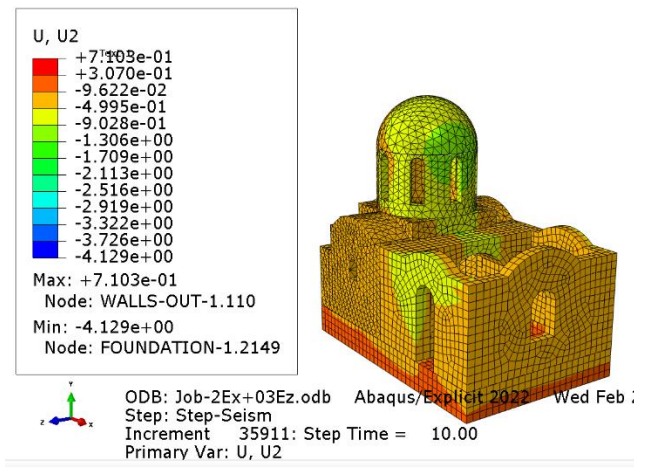
ΕΙΚΟΝΑ 6-25 : Μετακινήσεις U3



ΕΙΚΟΝΑ 6-26 : Μετακινήσεις U1



ΕΙΚΟΝΑ 6-27 : Μετακινήσεις U2 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-28 : Μετακινήσεις U2 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)

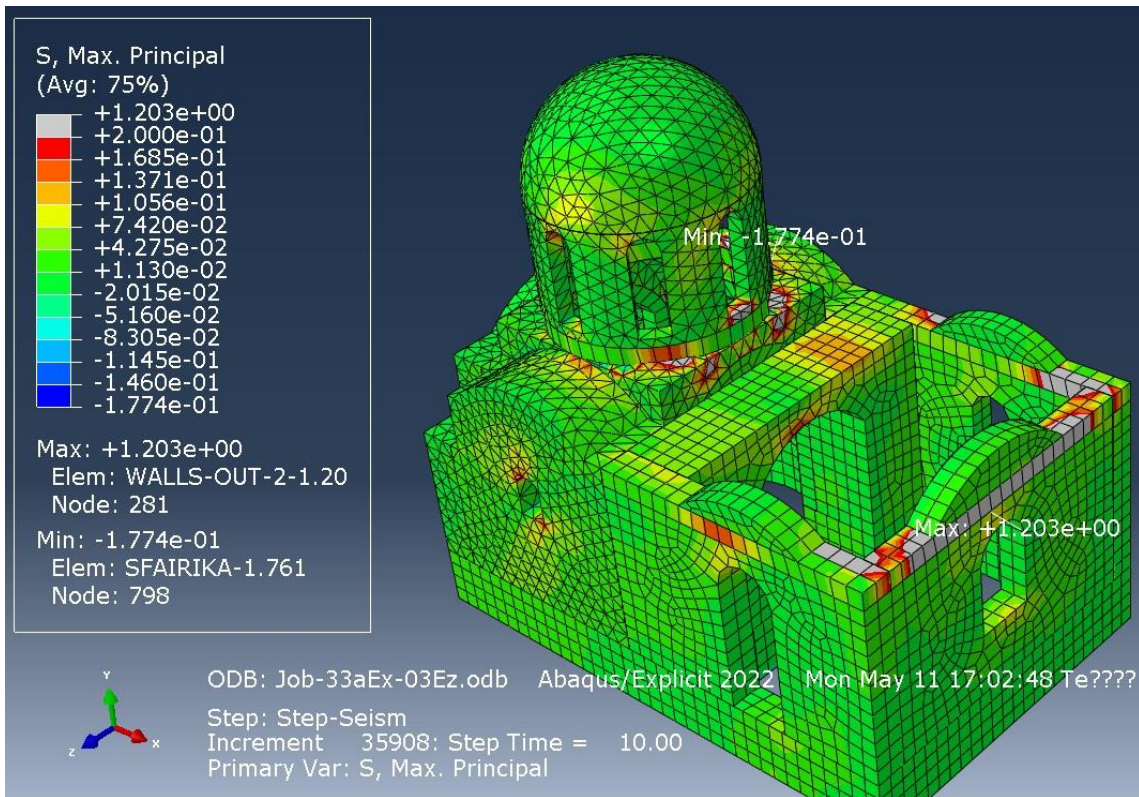
Όσο αφορά στις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις, από τα παραπάνω διαγράμματα τάσεων παρατηρούμε ότι υπάρχει υπέρβαση του ορίου $+0,1$ Μpa που έχουμε επιλέξει όπως αναφέρθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Η μέγιστη εφελκυστική τάση παρουσιάζεται στην περιοχή του τυμπάνου του τρούλλου και είναι ίση με $0,65$ Μpa (Εικόνα 6-10). Αντίστοιχες υπερβάσεις παρουσιάζονται στον τρούλλο και στην στέγη των τοιχοποιιών του πρόναου (Εικόνες 6-11, 6-12). Για τις κατακόρυφες ορθές τάσεις S22 έχουμε επίσης υπέρβαση του ορίου $0,1$ Μpa με μέγιστη τιμή $+0,48$ Μpa στο τύμπανο, ενώ παρατηρούμε ότι η θλιπτική αντοχή $0,953$ Μpa δεν ξεπερνάται (Εικόνες 6-15, 6-16). Αντίστοιχα για τις ορθές τάσεις S33 υπάρχει υπέρβαση του ορίου με μέγιστη τιμή $+0,38$ Μpa (Εικόνες 6-17, 6-18). Στις διατμητικές τάσεις S12, S13, S23 παρατηρούνται υπερβάσεις και στο άνω και στο κάτω όριο (Εικόνες 6-19 έως 6-24). Για τις μετακινήσεις μπορεί να γίνει ο έλεγχος στις εκτός επιπέδου βυθίσεις για τη δυσμενέστερη μετακίνηση τοιχοποιίας και για την μέγιστη μετακίνηση του τρούλλου.

Τέλος σημειώνεται ότι υπάρχουν εκτυπώσεις των διαγραμμάτων τάσεων και μετακινήσεων που περιλαμβάνουν ή όχι το part της στέγης. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο ανάλογα με την περίπτωση ώστε να γίνονται εύκολα διακριτές οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τάσεων και μετακινήσεων. Σε πολλές περιπτώσεις στην περιοχή της στέγης παρουσιάζονται υπερβολικά μεγάλες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων, λόγω του γραμμικού στοιχείου που έχει επιλεγεί για την προσομοίωση. Επειδή όμως το βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα φέροντα στοιχεία του ναού, σε κάποιες εκ των παραπάνω περιπτώσεων αφαιρέθηκε το part της στέγης.

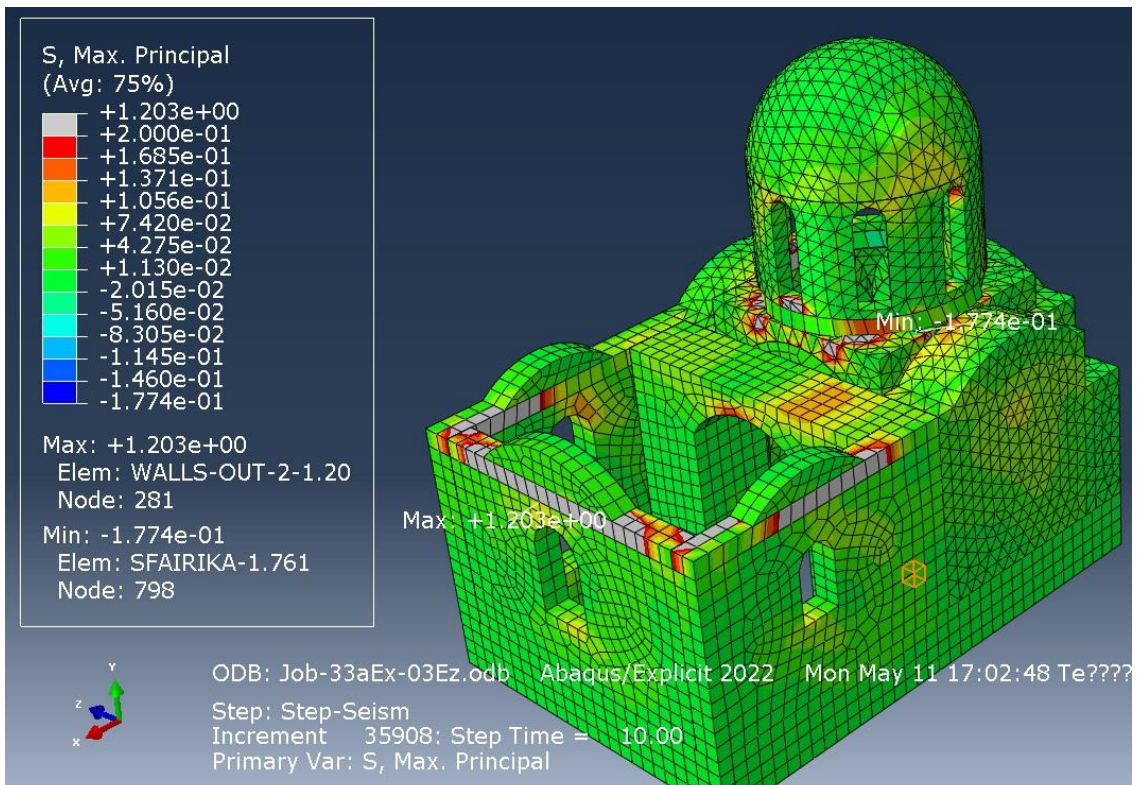
6.3. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ex-0.3Ez (“Job 33a”)

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των τάσεων, μετακινήσεων για τον σεισμικό συνδυασμό -Ex+0.3Ez, όπου Ex η σεισμική δράση στην διεύθυνση x, Ez η σεισμική δράση στην διεύθυνση z. Ο συντελεστής 0.3 λαμβάνει υπόψη ότι η κατακόρυφη συνιστώσα είναι περίπου 30% της

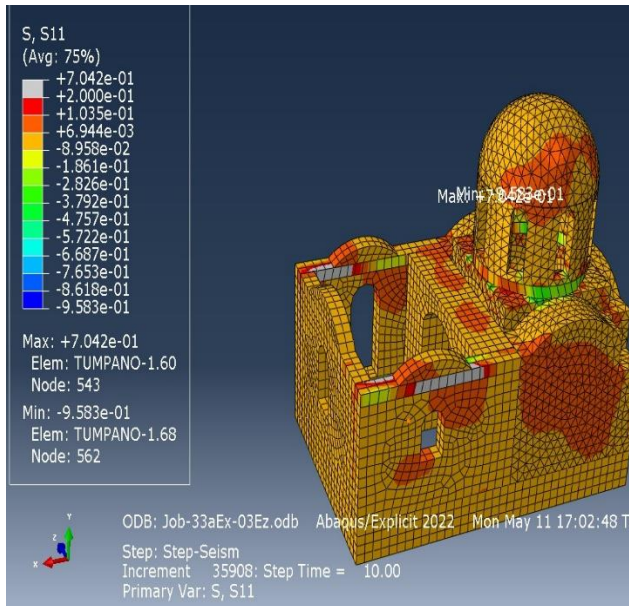
οριζόντιας, σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ/EC8. Η διεύθυνση χ είναι ο καθολικός άξονας 1, ενώ η διεύθυνση z είναι ο άξονας 3. Αντίστοιχα ο καθολικός άξονας 2 αντιστοιχίζεται στον άξονα y.



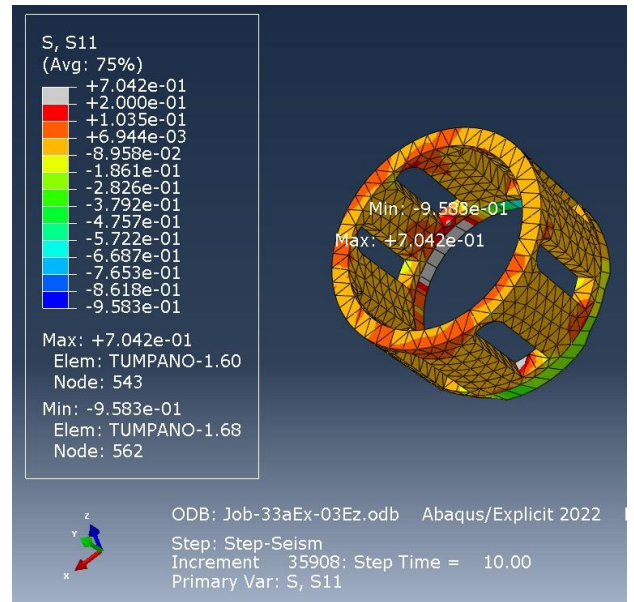
ΕΙΚΟΝΑ 6-29 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax



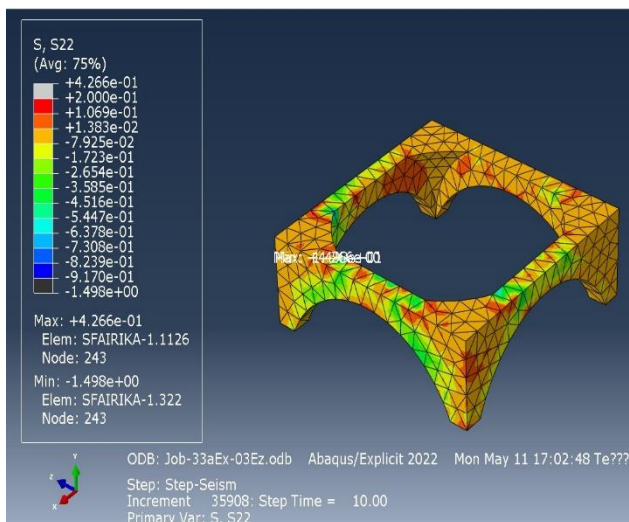
ΕΙΚΟΝΑ 6-30 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (ΝΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



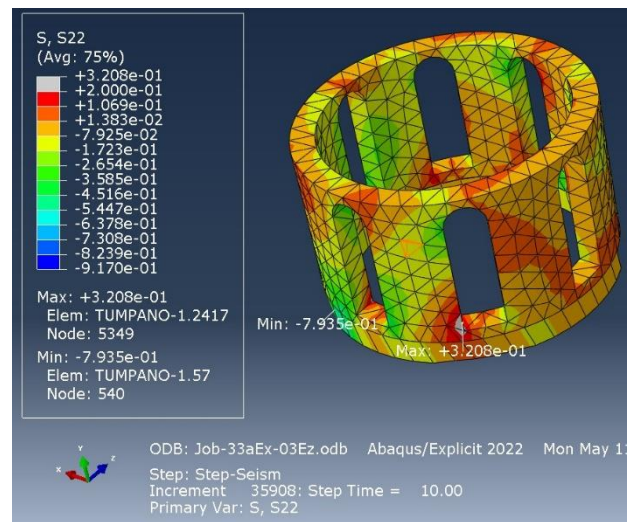
ΕΙΚΟΝΑ 6-31: Τάσεις S11 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



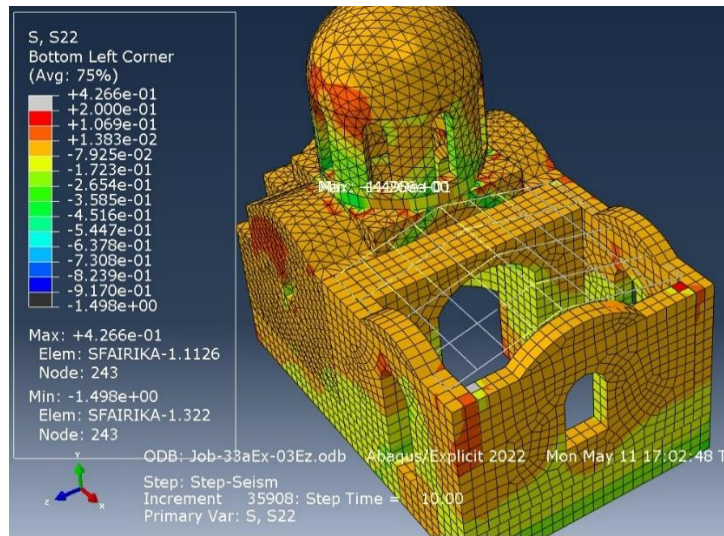
ΕΙΚΟΝΑ 6-32 : Τάσεις S11 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



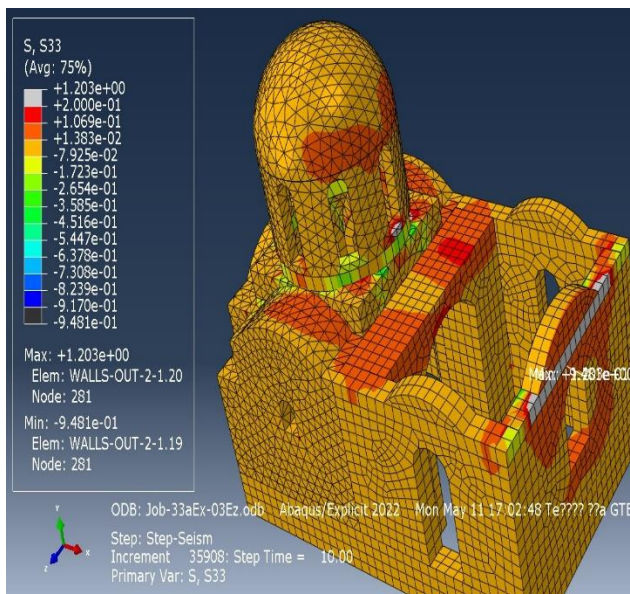
ΕΙΚΟΝΑ 6-32: Τάσεις S22 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)



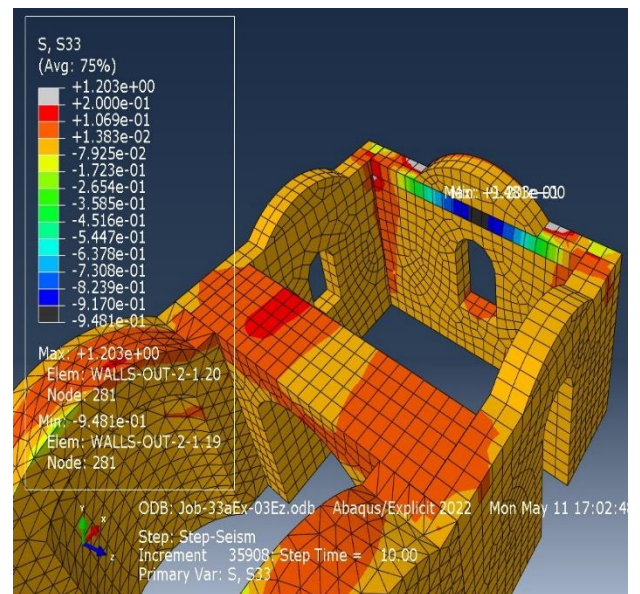
ΕΙΚΟΝΑ 6-33: Τάσεις S22 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



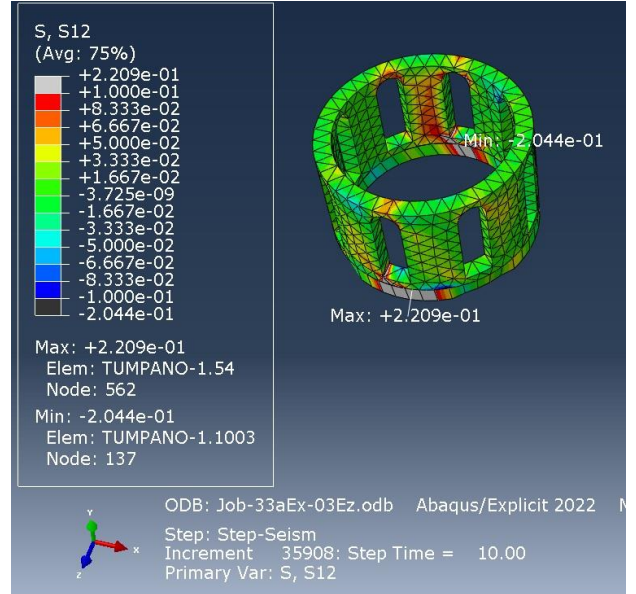
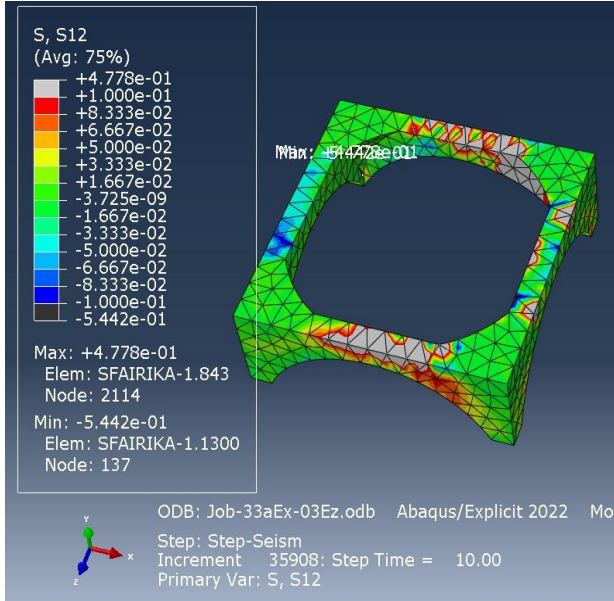
ΕΙΚΟΝΑ 6-36 : Τύσεις S22 (ΝΑ ΟΨΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-34: Τύσεις S33 (ΒΑ ΟΨΗ)

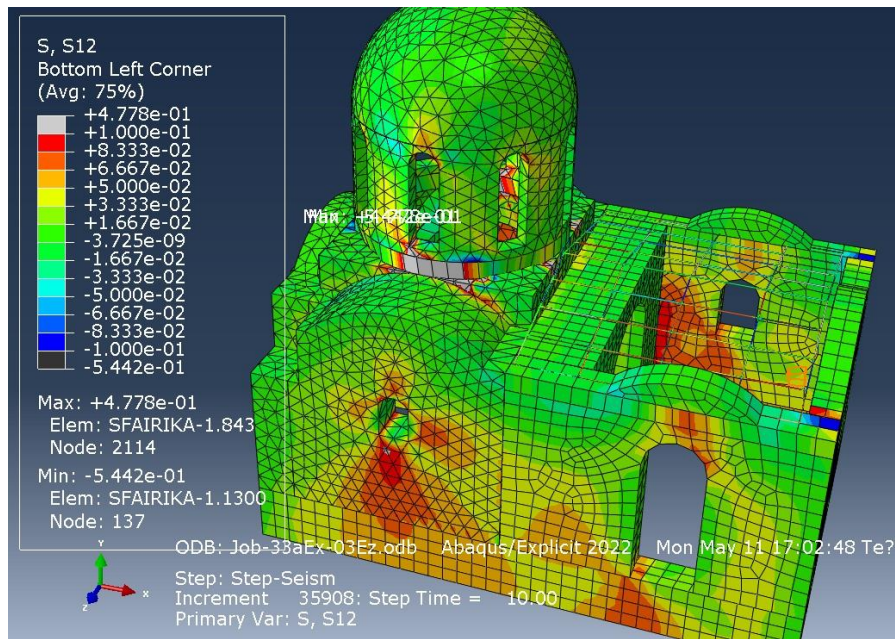


ΕΙΚΟΝΑ 6-35 : Τύσεις S33 (ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΙ)

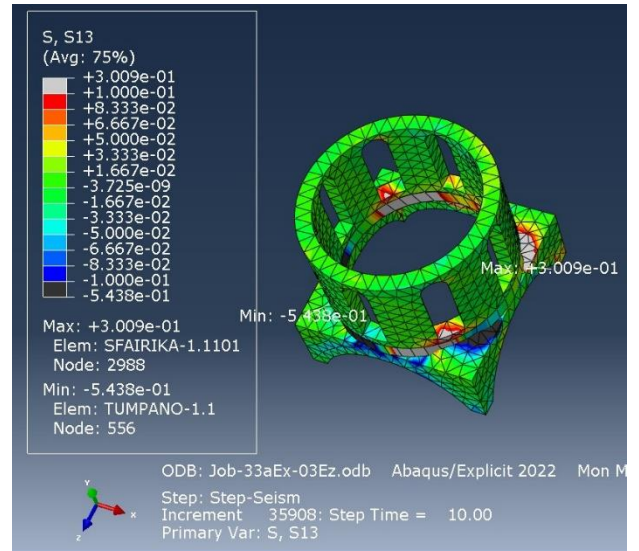
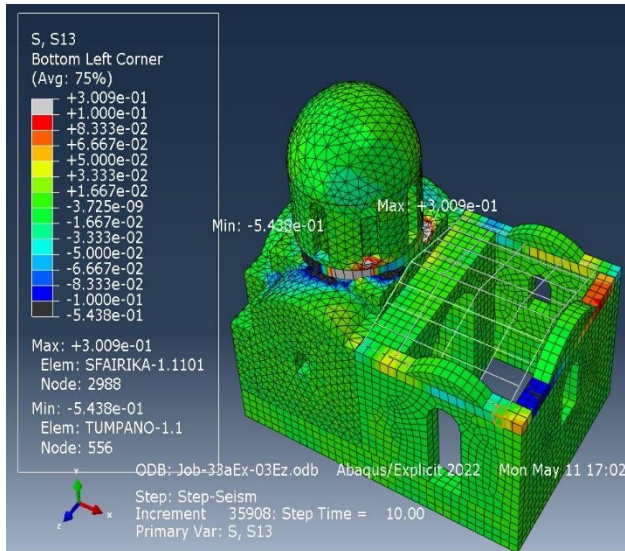


ΕΙΚΟΝΑ 6-37 : Διατμητικές τάσεις S12 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)

ΕΙΚΟΝΑ 6-38 : Διατμητικές τάσεις S12 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)

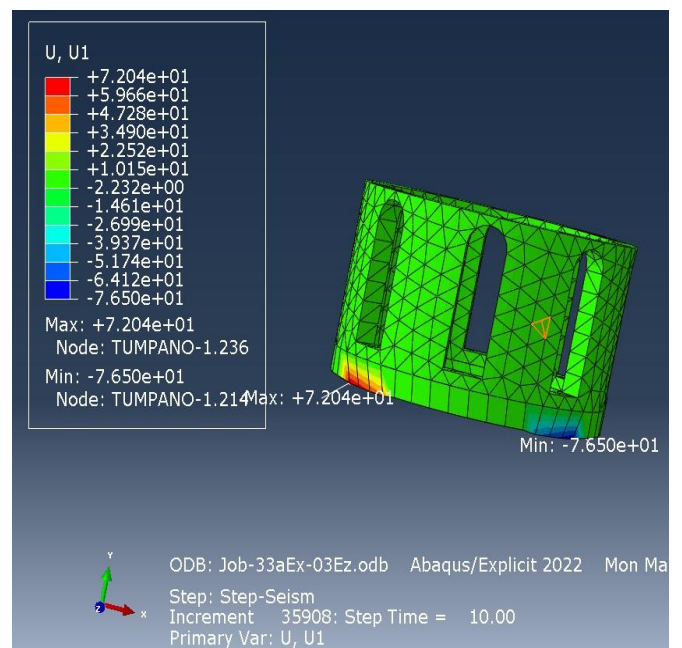
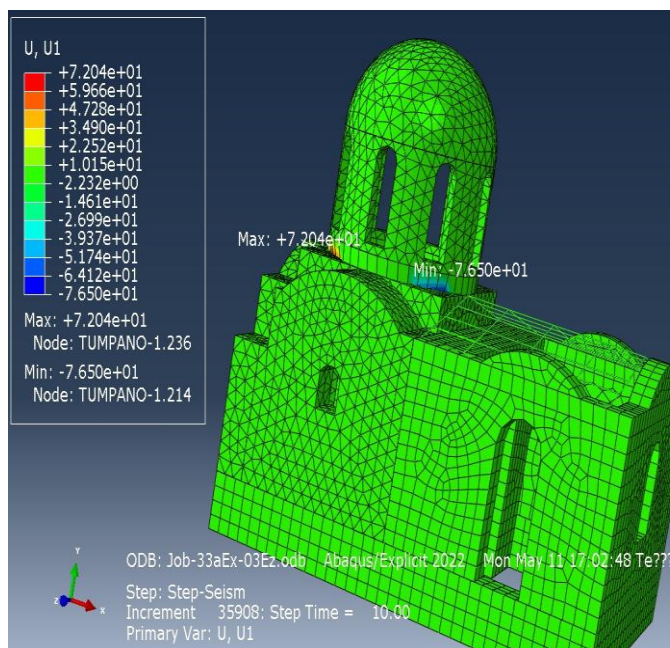


ΕΙΚΟΝΑ 6-39 : Διατμητικές τάσεις S12 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



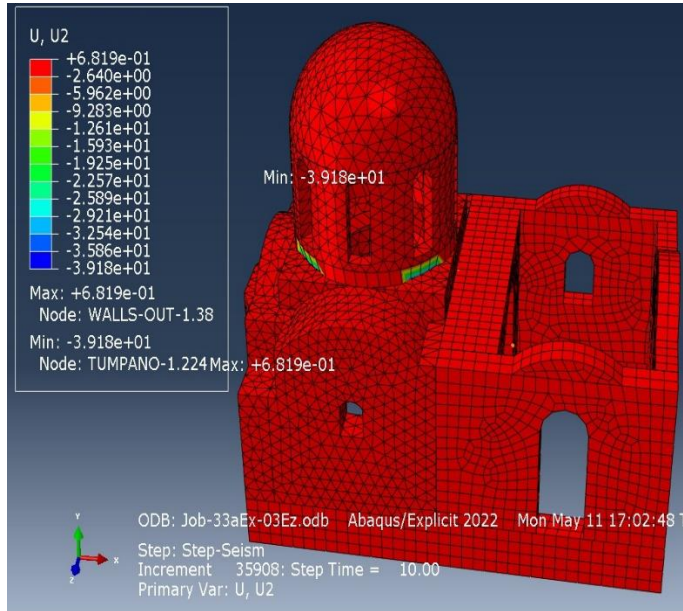
ΕΙΚΟΝΑ 6-40 : Διατμητικές τάσεις S13 (ΜΕ ΣΤΕΓΗ)

ΕΙΚΟΝΑ 6-41 : Διατμητικές τάσεις S13 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ)

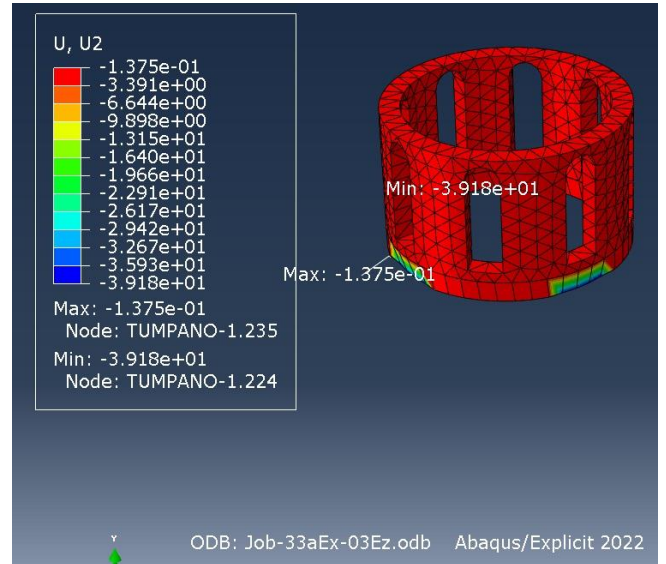


ΕΙΚΟΝΑ 6-46 : Μετακινήσεις U1 (ΜΕ ΣΤΕΓΗ)

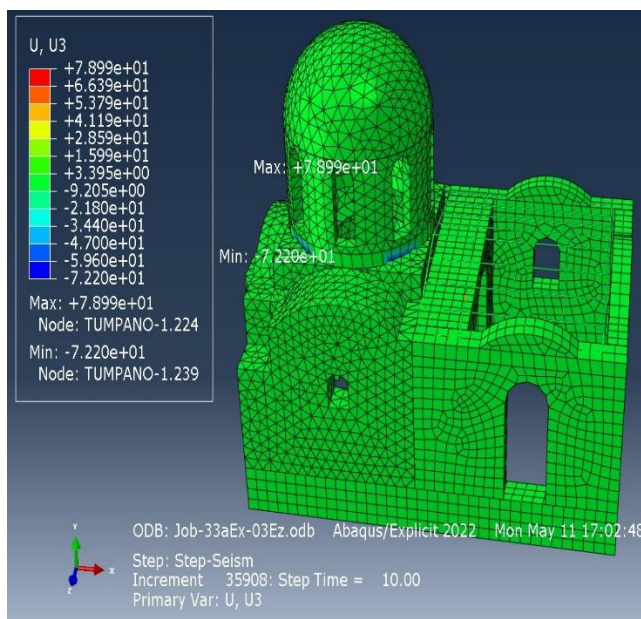
ΕΙΚΟΝΑ 6-47 : Μετακινήσεις U1 (ΤΥΜΠΑΝΟ)



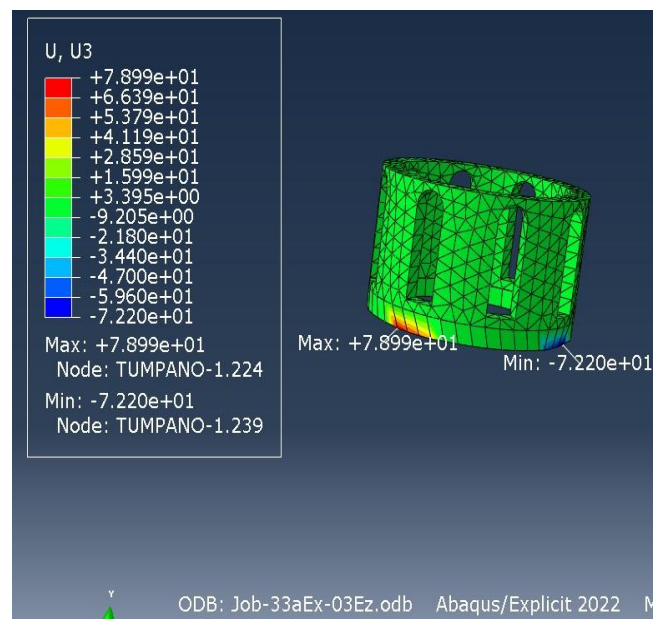
ΕΙΚΟΝΑ 6-44 : Μετακινήσεις U2 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-45 : Μετακινήσεις U2 (ΤΥΜΠΑΝΟ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-46 : Μετακινήσεις U3 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)

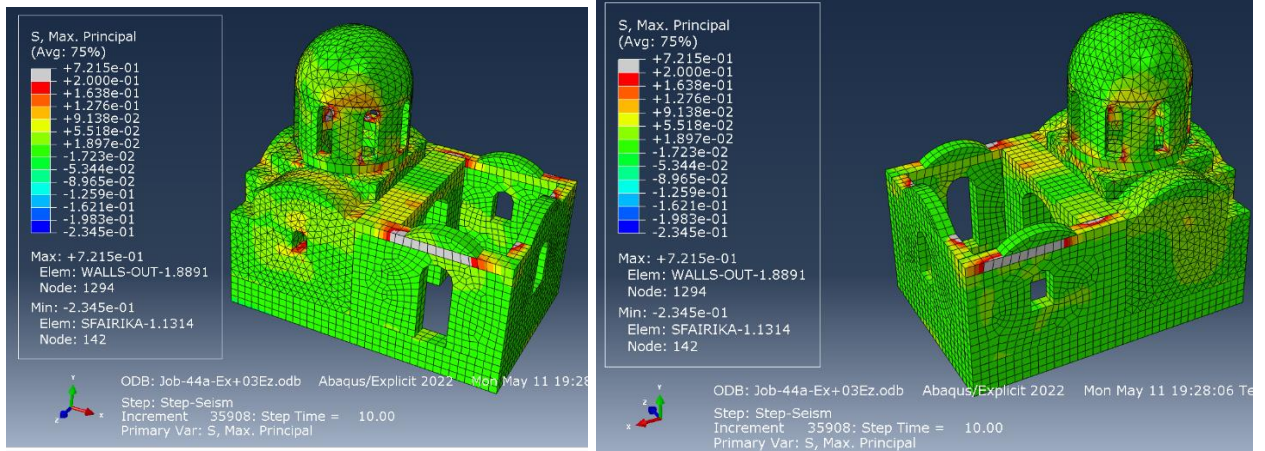


ΕΙΚΟΝΑ 6-47 : Μετακινήσεις U3 (ΤΥΜΠΑΝΟ)

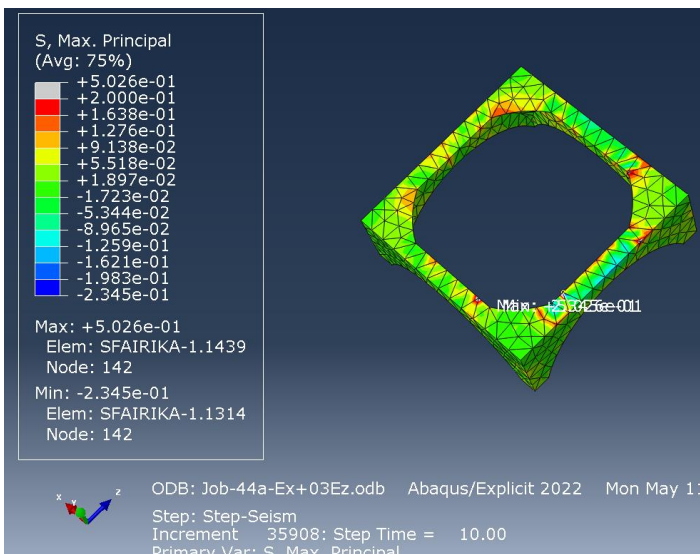
Με ανάλογο τρόπο όπως και στην περίπτωση του σεισμικού συνδυασμού $E_x + 0.3E_z$, έτσι και στον σεισμικό συνδυασμό $E_x - 0.3E_z$ έχουμε υπερβάσεις στις εφελκυστικές, διατμητικές και ορθές τάσεις. Πιο συγκεκριμένα η $S_{max} = +0,65 \text{ MPa} > 0,1 \text{ MPa}$, $S_{11} = +0,427 \text{ MPa}, > 0,1 \text{ MPa}$, $S_{22} = +0,48 \text{ MPa}, > 0,1 \text{ MPa}$, $S_{33} = +0,34 \text{ MPa}, > 0,1 \text{ MPa}$. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η μέγιστη τιμή εφελκυστικής τάσης καθώς και των ορθών τάσεων συμβαίνει στην περιοχή του τυμπάνου. Υπερβάσεις του ανωτάτου ορίου $+0,1 \text{ MPa}$ εμφανίζεται και σε κάποια εκ των τόξων καθώς και στα ανώτερα σημεία της τοιχοποιίας όπως είναι διακριτό και στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παραπάνω. Στις παραπάνω περιπτώσεις δεν γίνεται υπέρβαση του κατώτερου ορίου $-0,953 \text{ MPa}$ που αντιστοιχεί στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Στις διατμητικές τάσεις εμφανίζονται υπερβάσεις και στο ανώτατο και στο κατώτατο όριο. Οι μέγιστες τιμές των διατμητικών τάσεων εμφανίζονται επίσης στην περιοχή του τυμπάνου. Συγκεκριμένα οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές διαμορφώνονται ως εξής: $S_{12} = +0,296 \text{ MPa}, > 0,1 \text{ MPa}$, $S_{12} = -0,12 \text{ MPa}, > -0,1 \text{ MPa}$, $S_{13} = +0,18 \text{ MPa}, > 0,1 \text{ MPa}$, $S_{13} = -0,21 \text{ MPa}, > -0,1 \text{ MPa}$, $S_{23} = +0,2 \text{ MPa}, > 0,1 \text{ MPa}$, $S_{23} = -0,16 \text{ MPa}, > -0,1 \text{ MPa}$. Για τις μετακινήσεις μπορεί να γίνει ο έλεγχος στις εκτός επιπέδου βυθίσεις για τη δυσμενέστερη μετακίνηση τοιχοποιίας και για την μέγιστη μετακίνηση του τρούλλου. Οι τιμές των μέγιστων μετακινήσεων παρουσιάζονται στην εξωτερική τοιχοποιία, στα τόξα και στον εσωτερικό τοίχο μεταξύ νάρθηκα και καθολικού με τις αντίστοιχες τιμές όπως ακολουθούν: $U_2 = +0,7 \text{ mm} / -0,412 \text{ mm}$, $U_3 = +3,286 \text{ mm} / -2,94 \text{ mm}$, $U_1 = 5 \text{ mm} / -2,89 \text{ mm}$. Στην περιοχή της στέγης εμφανίζονται προφανώς μεγαλύτερες μετακινήσεις. Ενδεικτικά για την στέγη είναι $U_2 = +9 \text{ mm} / -20,7 \text{ mm}$. Σημειώνεται ότι στις μετακινήσεις τα πρόσημα $+$ και $-$ έχουν να κάνουν με την φορά των μετακινήσεων.

6.4. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $-E_x + 0.3E_z$ (“Job 44a”)

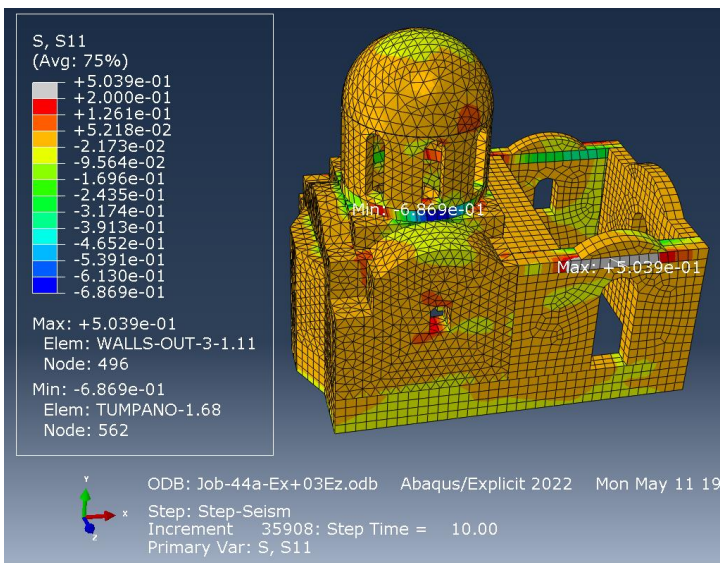
Ομοίως με παραπάνω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τάσεων και παραμορφώσεων για τον σεισμικό συνδυασμό $-E_x + 0.3E_z$.



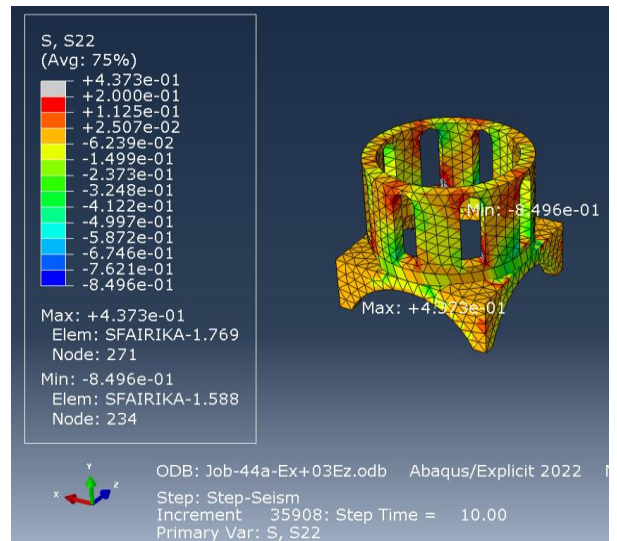
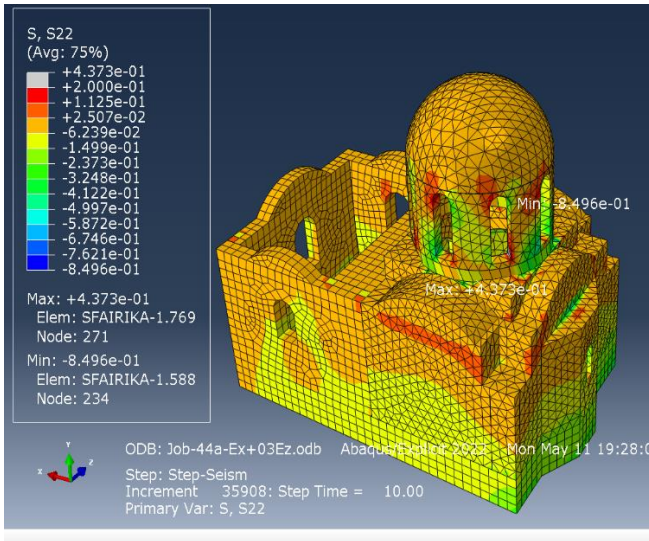
ΕΙΚΟΝΑ 6-24 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (Βόρεια – Δυτική -Νότια πλευρά)



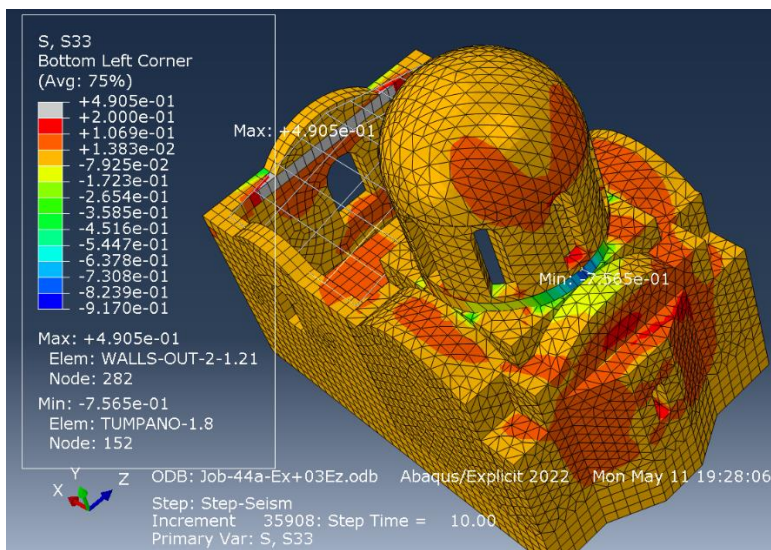
ΕΙΚΟΝΑ 6-25 : Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις Smax (Σφαιρικά)



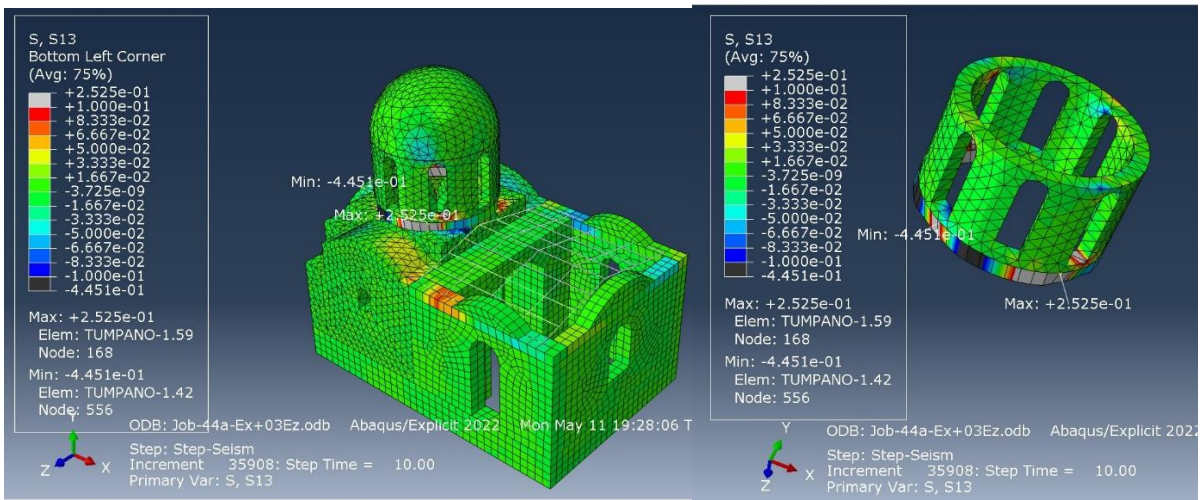
ΕΙΚΟΝΑ 6-26 : Τάσεις S11 (ΝΑ πλευρά)



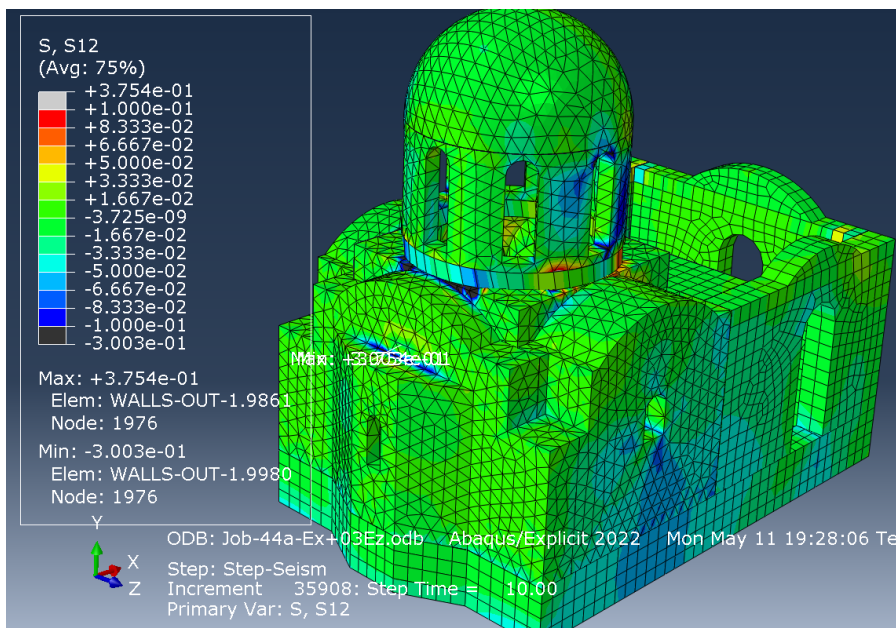
ΕΙΚΟΝΑ 6-27 : Τάσεις S22 (Σφαιρικά - ΝΑ πλευρά)



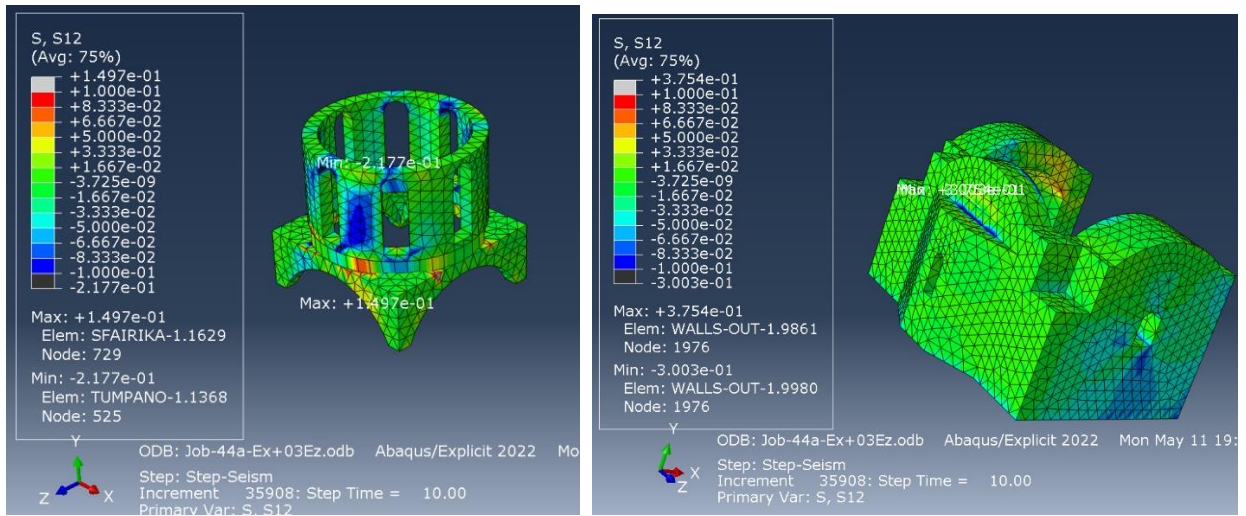
ΕΙΚΟΝΑ 6-28 : Τάσεις S33



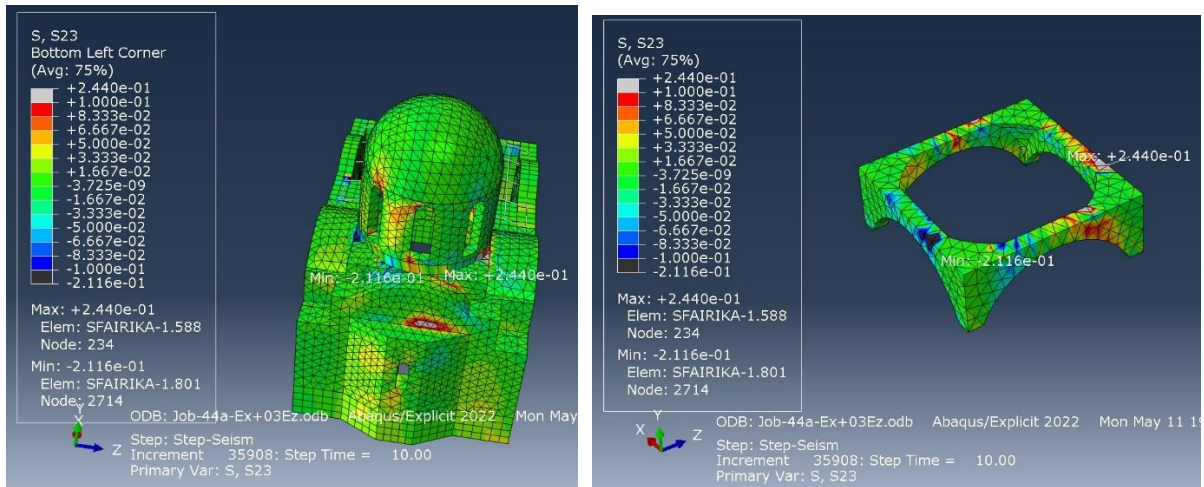
ΕΙΚΟΝΑ 6-29 : Διατμητικές Τάσεις S13 (Τύμπανο)



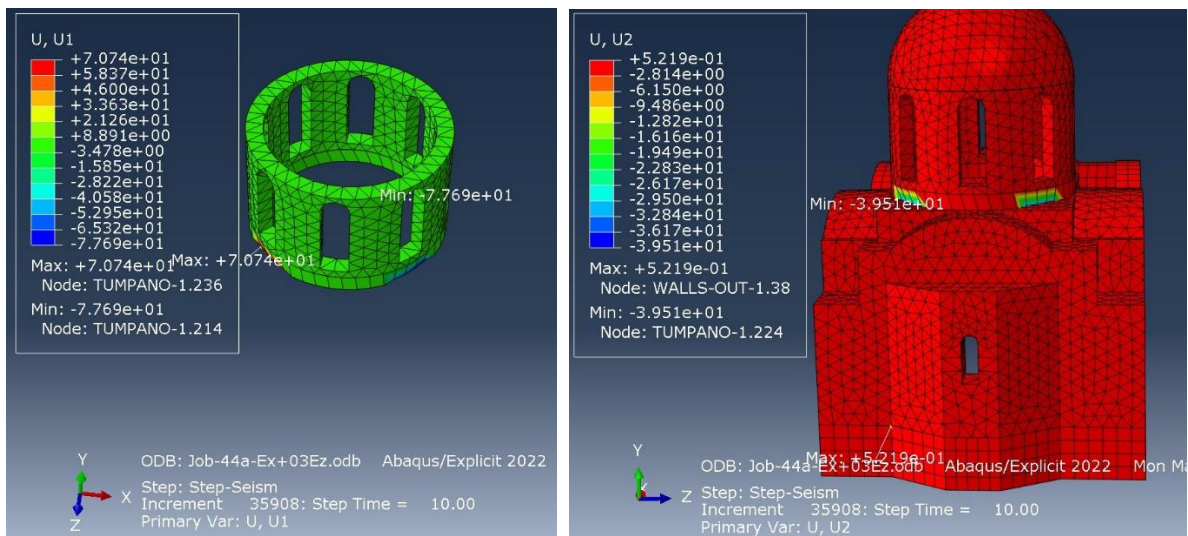
ΕΙΚΟΝΑ 6-30 : Διατμητικές Τάσεις S12



ΕΙΚΟΝΑ 6-31 : Διατμητικές Τάσεις S12 (Σφαιρικά – Τύμπανο, Εξωτερική τοιχοποιία)

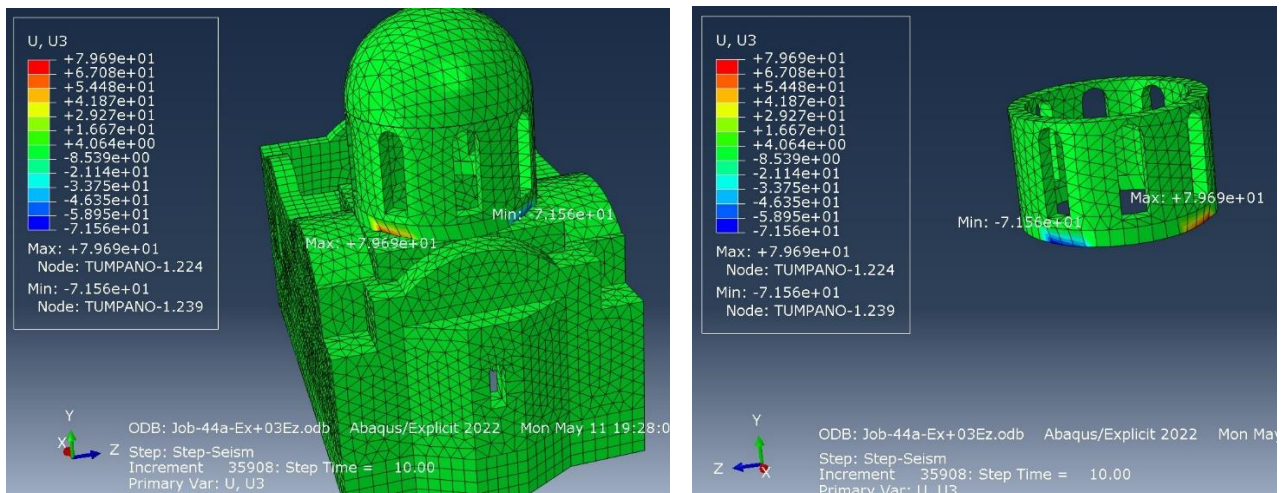


ΕΙΚΟΝΑ 6-32 : Διατμητικές Τάσεις S23 (Σφαιρικά)



ΕΙΚΟΝΑ 6-33α : Μετακινήσεις U1 (Τύμπανο)

ΕΙΚΟΝΑ 6-33β : Μετακινήσεις U2 (Ανατολική πλευρά)



ΕΙΚΟΝΑ 6-33γ : Μετακινήσεις U3 (Ανατολική πλευρά - Τύμπανο)

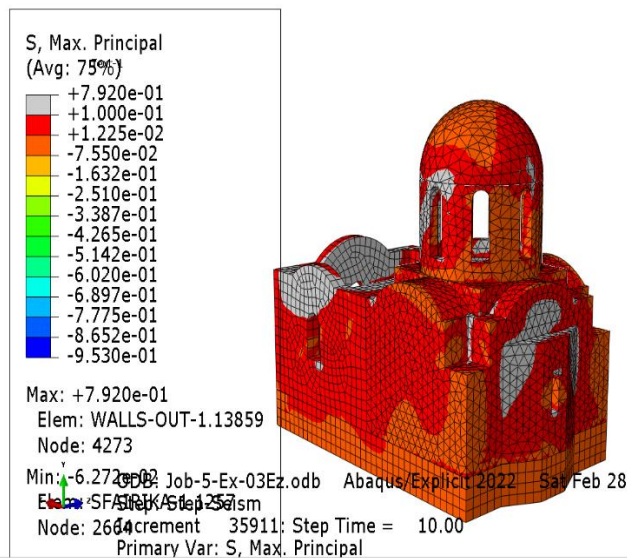
Όπως ήταν αναμενόμενο τα αποτελέσματα των υπερβάσεων είναι αντίστοιχα των προηγούμενων περιπτώσεων σεισμικών συνδυασμών. Συγκεκριμένα η $S_{max} = +0,49$ mm εμφανίζεται στην περιοχή του τυμπάνου με ανάλογες τιμές στα τόξα, τον τρούλλο και την εξωτερική τοιχοποιία του ιερού. Δεν υπάρχει υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής. Οι ορθές τάσεις διαμορφώνονται ως εξής: $S_{11} = +0,33$ Mpa $> +0,1$ Mpa στην περιοχή του τυμπάνου, $S_{22} = +0,344$ Mpa $> +0,1$ Mpa στην περιοχή του τυμπάνου και του τρούλλου, $S_{33} = +0,45$ Mpa $> +0,1$ Mpa στην τοιχοποιία αλλά και εσωτερικά στο ιερό και στα τόξα. Ενδεικτικά για την στέγη αναφέρουμε την τιμή $S_{11} = +11,7$ Mpa και $-14,78$ Mpa.

Στα αντίστοιχα κατώτατα όρια δεν παρατηρείται υπέρβαση. Αντιθέτως στις διατμητικές τάσεις παρατηρείται υπέρβαση και στο άνω και στο κάτω όριο, $S_{12} = +0,33$ Mpa $> +0,1$ Mpa / $-0,25$ Mpa $> -0,1$ Mpa στην εξωτερική τοιχοποιία και στους πεσσούς του τρούλλου, $S_{13} = +0,17$ Mpa $> +0,1$ Mpa / $-0,2$ Mpa $> -0,1$ Mpa, τύμπανο, τα τόξα και την εξωτερική τοιχοποιία αντίστοιχα. Τέλος η $S_{23} = +0,24$ Mpa $> +0,1$ Mpa στα σφαιρικά τόξα και $-0,19$ Mpa $> -0,1$ Mpa στο τύμπανο.

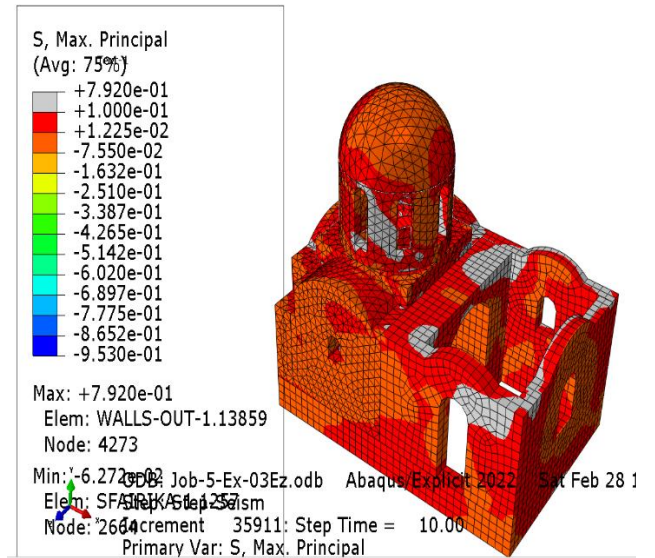
6.5. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ex-0.3Ez (“Job 55a”)

Ακολούθως παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες σεισμικές φορτίσεις. Για τον σεισμικό συνδυασμό -Ex – 0.3Ez οι τιμές των τάσεων και μετακινήσεων διαμορφώνονται ως εξής: $S_{max} = +0,79$ Mpa $> +0,1$ Mpa, στην περιοχή της εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας, στον τρούλλο και τα τόξα, $S_{11} = +0,36$ Mpa $> +0,1$ Mpa στην περιοχή του τυμπάνου, των τόξων και του πεσσού του τρούλλου, $S_{22} = +0,35$ Mpa $> +0,1$ Mpa στην περιοχή του τυμπάνου του τρούλλου, $S_{33} = +0,44$ Mpa $> +0,1$ Mpa στην τοιχοποιία της δυτικής και ανατολικής όψης. Δεν υπάρχει υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής. Οι διατμητικές τάσεις διαμορφώνονται ως εξής: $S_{12} =$

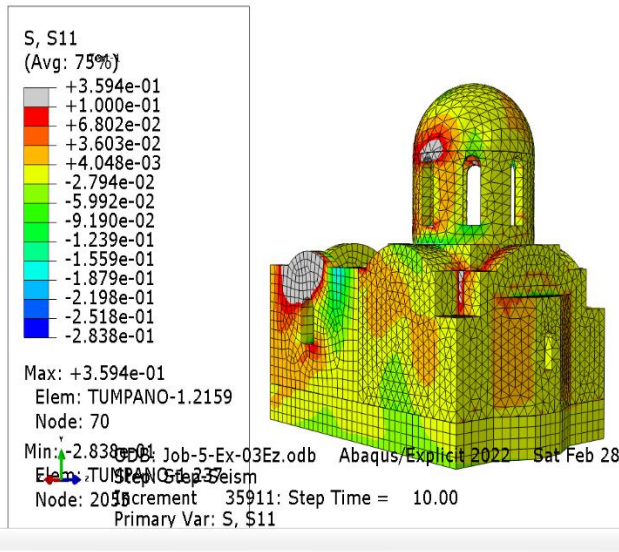
+0,34 Mpa > +0,1 Mpa / S12 = -0,25 Mpa > -0,1 Mpa στην εξωτερική τοιχοποιία, S13 = +0,13 Mpa > +0,1 Mpa / S13 = -0,198 Mpa > -0,1 Mpa στο τύμπανο, S23 = +0,18 Mpa > +0,1 Mpa / S23 = -0,25 Mpa > -0,1 Mpa σε μια μικρή περιοχή του τυμπάνου. Τέλος ενδεικτικά οι μέγιστες μετακινήσεις, εκτός της περιοχής της στέγης, είναι U2 = +0,5 mm στην εξωτερική τοιχοποιία, U2 = -4,24 mm στην θεμελίωση, U3 = + 2,84 mm / U3 = - 4mm στα τόξα του νάρθηκα. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων σεισμικών δράσεων παρουσιάζονται με την μορφή πινακοποίησης.



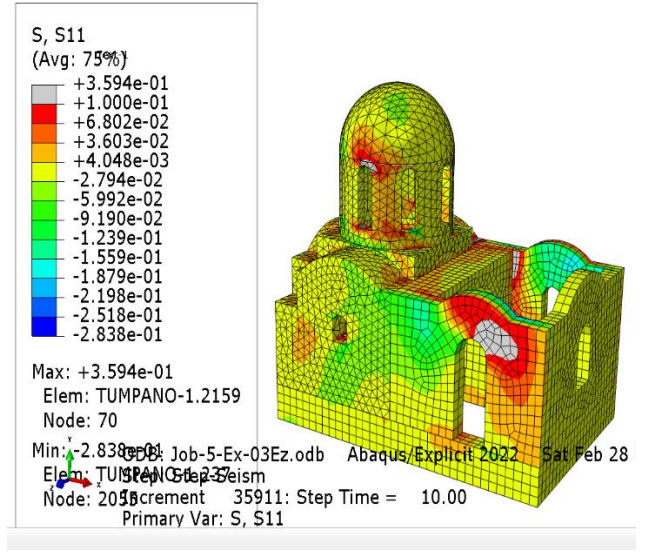
ΕΙΚΟΝΑ 6-63 : Τάσεις SMAX (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



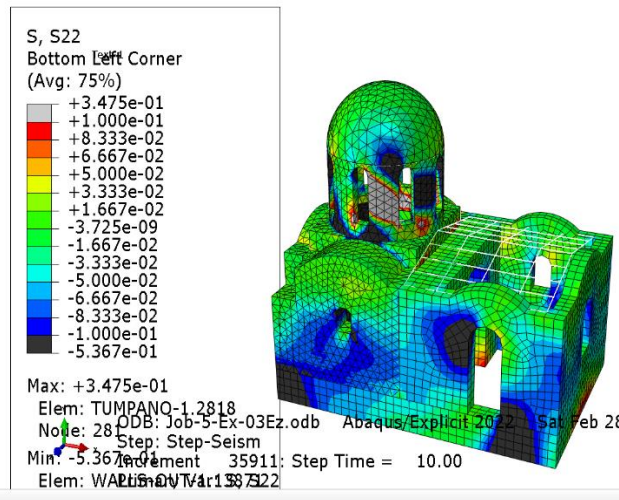
ΕΙΚΟΝΑ 6-64 : Τάσεις SMAX (ΒΔ ΠΛΕΥΡΑ)



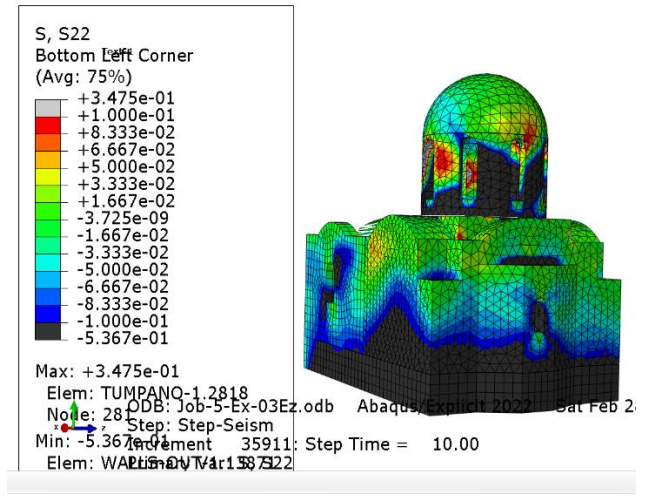
ΕΙΚΟΝΑ 6-65 : Τάσεις S11 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



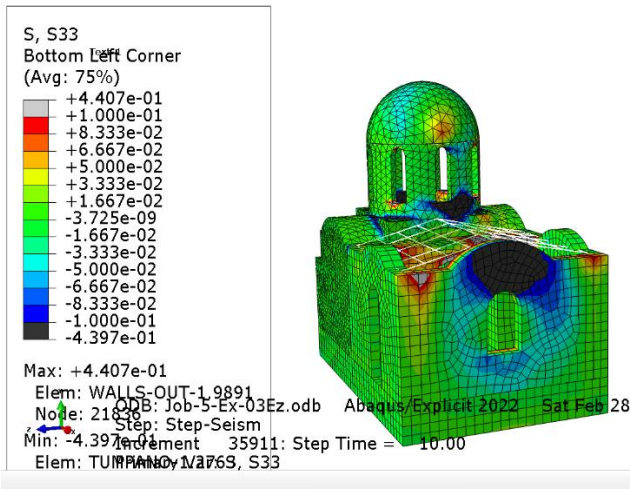
ΕΙΚΟΝΑ 6-66 : Τάσεις S11 (ΒΔ ΠΛΕΥΡΑ)



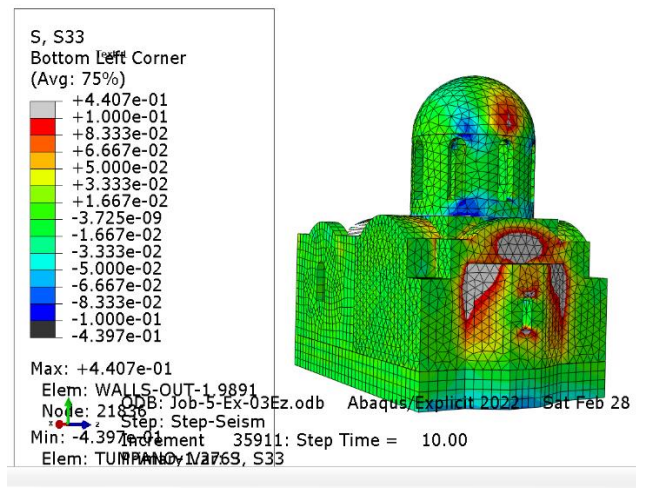
ΕΙΚΟΝΑ 6-67 : Τάσεις S22 (ΒΔ ΠΛΕΥΡΑ)



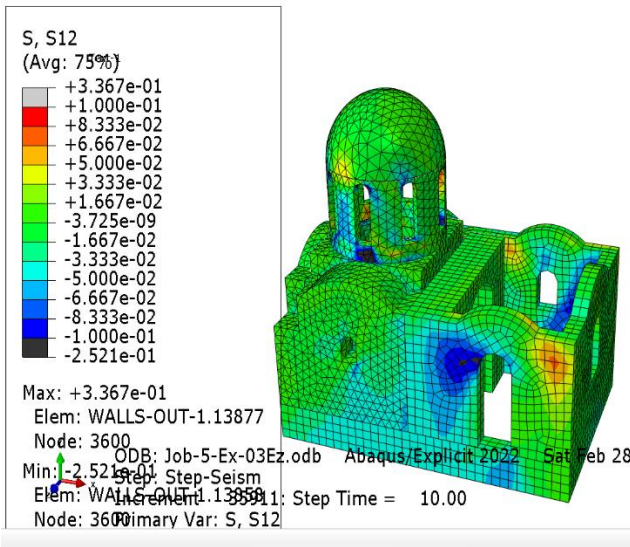
ΕΙΚΟΝΑ 6-68 : Τάσεις S22 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



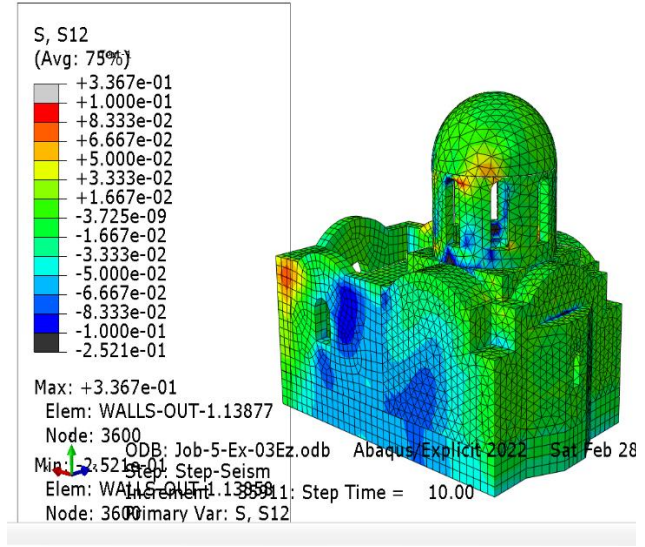
ΕΙΚΟΝΑ 6-69 : Τάσεις S33 (ΒΔ ΠΛΕΥΡΑ)



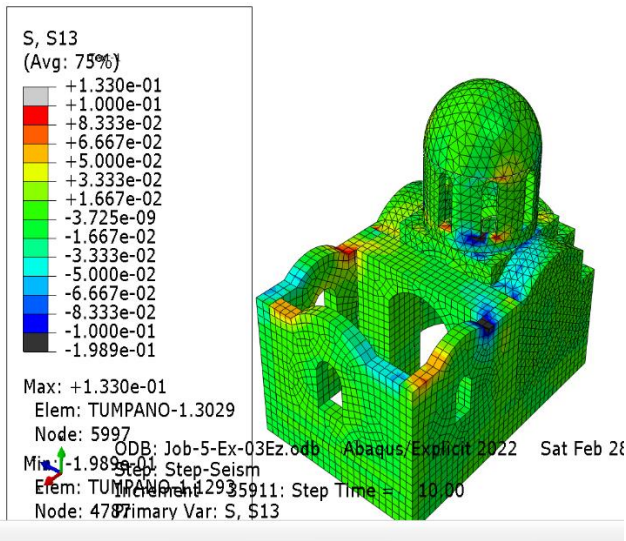
ΕΙΚΟΝΑ 6-70 : Τάσεις S33 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



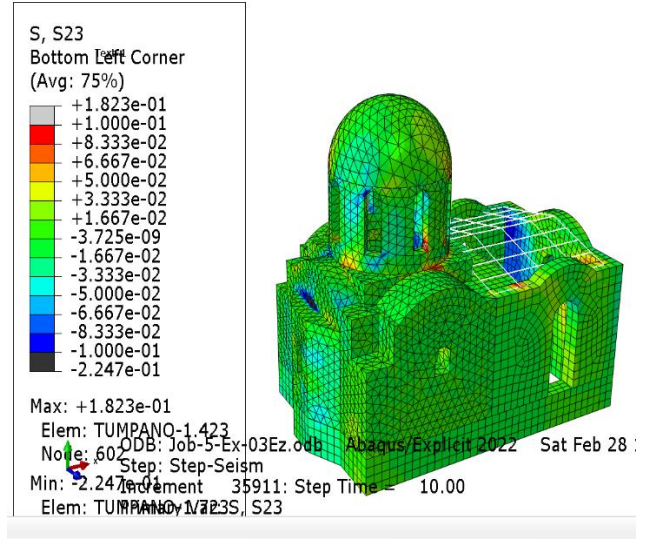
ΕΙΚΟΝΑ 6-71 : Τάσεις S12 (ΒΔ ΠΛΕΥΡΑ)



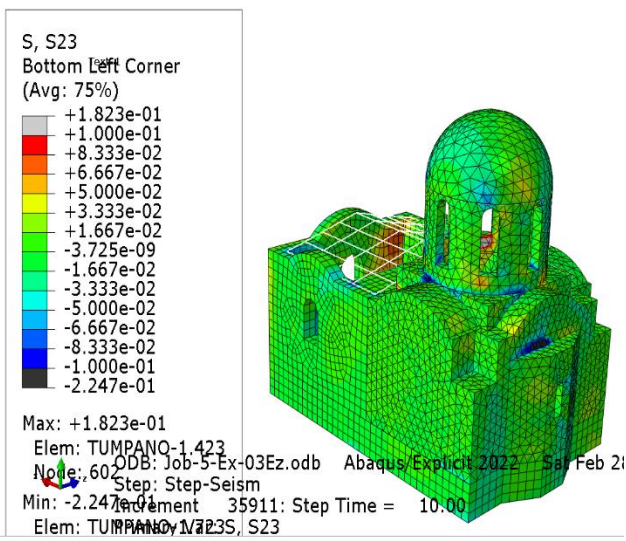
ΕΙΚΟΝΑ 6-72: Τάσεις S12 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



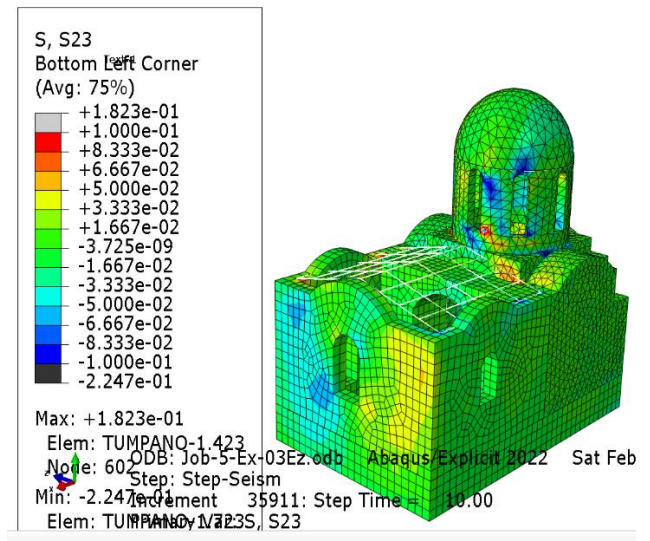
ΕΙΚΟΝΑ 6-73 : Τάσεις S13 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



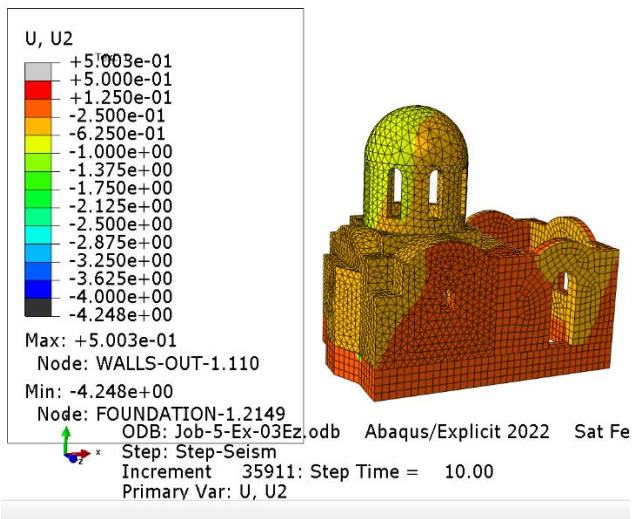
ΕΙΚΟΝΑ 6-74: Τάσεις S23 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



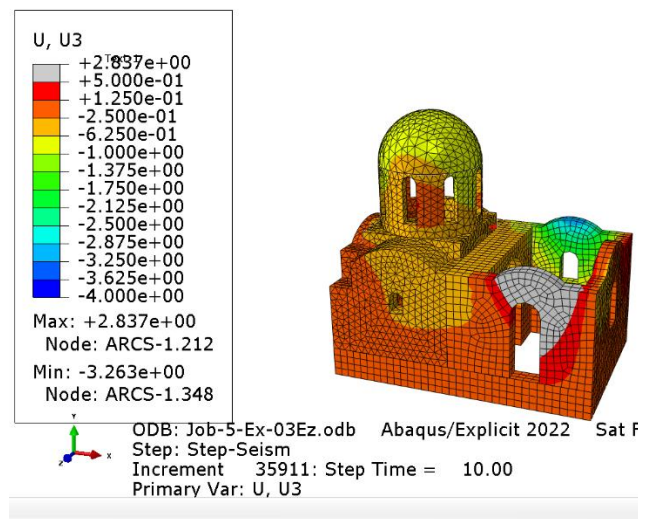
ΕΙΚΟΝΑ 6-75 : Τάσεις S23 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-76: Τάσεις S23 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-77 : Μετακινήσεις U2 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 6-78: Μετακινήσεις U3 (Β ΠΛΕΥΡΑ)

6.6. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ez +0.3 Ex (“Job 66”)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,54 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΤΟΞΑ, ΣΤΕΨΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ
S11	+ 0,31 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΒΟΡΕΙΟ ΤΟΞΟ ΝΑΡΘΗΚΑ
S22	+ 0,36 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S33	+ 0,375 > + 0,1 (Mpa)		ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΩ ΣΤΕΨΗ
S12	+ 0,188 > + 0,1 (Mpa)	-0,15 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S13	+ 0,188 > + 0,1 (Mpa)	-0,213 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ

S23	+ 0,28 > + 0,1 (Μpa)	-0,12 > -0,1 (Μpa)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ, ΜΙΚΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΥΜΠΙΑΝΟΥ
U1	+ 4,31 mm - 3,16 mm	-	ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΟΞΑ ΔΥΤΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ
U2	+ 0,67 mm - 4,10 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ
U3	+ 3,75 mm - 2,62 mm	-	ΤΟΞΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ez +0.3 Ex)

6.7. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ez -0.3 Ex (“Job 77”)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,65 > + 0,1 (Μpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Μpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΤΟΞΑ, ΝΟΤΙΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΝΑΡΘΗΚΑ, ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ ΙΕΡΟΥ
S11	+ 0,43 > + 0,1 (Μpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Μpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΝΟΤΙΟ ΤΟΞΟ ΝΑΡΘΗΚΑ
S22	+ 0,46 > + 0,1 (Μpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Μpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S33	+ 0,37 > + 0,1 (Μpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Μpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΩ ΣΤΕΨΗ
S12	+ 0,28 > + 0,1 (Μpa)	-0,18 > -0,1 (Μpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S13	+ 0,17 > + 0,1 (Μpa)	-0,22 > -0,1 (Μpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,27 > + 0,1 (Μpa)	-0,33 > -0,1 (Μpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ
U1	+ 4,30 mm - 3,07 mm	-	ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΟΞΑ ΔΥΤΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ
U2	+ 0,59 mm - 4,25 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ
U3	+ 2,40 mm - 4,07 mm	-	ΤΟΞΑ ΝΟΤΙΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΝΑΡΘΗΚΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ez -0.3 Ex)

6.8. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ez +0.3 Ex (“Job 88”)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,56 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΤΟΞΑ, ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S11	+ 0,30 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ, ΤΟΞΟ ΒΟΡΕΙΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΝΑΡΘΗΚΑ
S22	+ 0,28 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S33	+ 0,45 > + 0,1 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΤΡΟΥΛΛΟΣ, ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ
S12	+ 0,17 > + 0,1 (Mpa)	-0,188 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S13	+ 0,16 > + 0,1 (Mpa)	-0,2 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,29 > + 0,1 (Mpa)	-0,12 > -0,1 (Mpa)	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
U1	+ 3,97 mm - 3,38 mm	-	ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
U2	+ 0,62 mm - 4,13 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ
U3	+ 3,76 mm - 2,63 mm	-	ΤΟΞΑ ΝΑΡΘΗΚΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3 : Τάσεις, Μετακινήσεις (-Ez +0.3 Ex)

6.9. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ez -0.3 Ex (“Job 99a”)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,94 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,22<-0,953/- 0,917 Mpa	ΔΥΤΙΚΟΣ, ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ, ΣΦΑΙΡΙΚΑ(MIN)
S11	+ 0,94 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,88<-0,953/- 0,917 Mpa	ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S22	+ 0,53 > + 0,2 (Mpa)	-0,96 >-0,953/- 0,917 Mpa Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,42 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,78<-0,953/- 0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ(MIN)
S12	+ 0,25 > + 0,1 (Mpa)	-0,22 > -0,1 (Mpa)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ(MIN)

S13	+ 0,34 > + 0,1 (Mpa)	-0,69 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,31 > + 0,1 (Mpa)	-0,47 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 71 mm - 77 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U2	+ 0,52 mm - 39,5 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U3	+ 78 mm - 73 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4 : Τάσεις, Μετακινήσεις (-Ez - 0.3 Ex)

6.10. Αποτελέσματα ελέγχων

Από τα προπεριγραφόμενα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μεγαλύτερη καταπόνηση σε όρους τάσεων και μετακινήσεων συμβαίνει στον τρούλλου (τύμπανο, τρούλλος, σφαιρικά) και στην περιοχή του νάρθηκα στην στέψη της τοιχοποιίας. Ακολούθως παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις δυσμενέστερες τάσεις και παραμορφώσεις των σεισμικών φορτίσεων της αρχικής μορφής του μνημείου

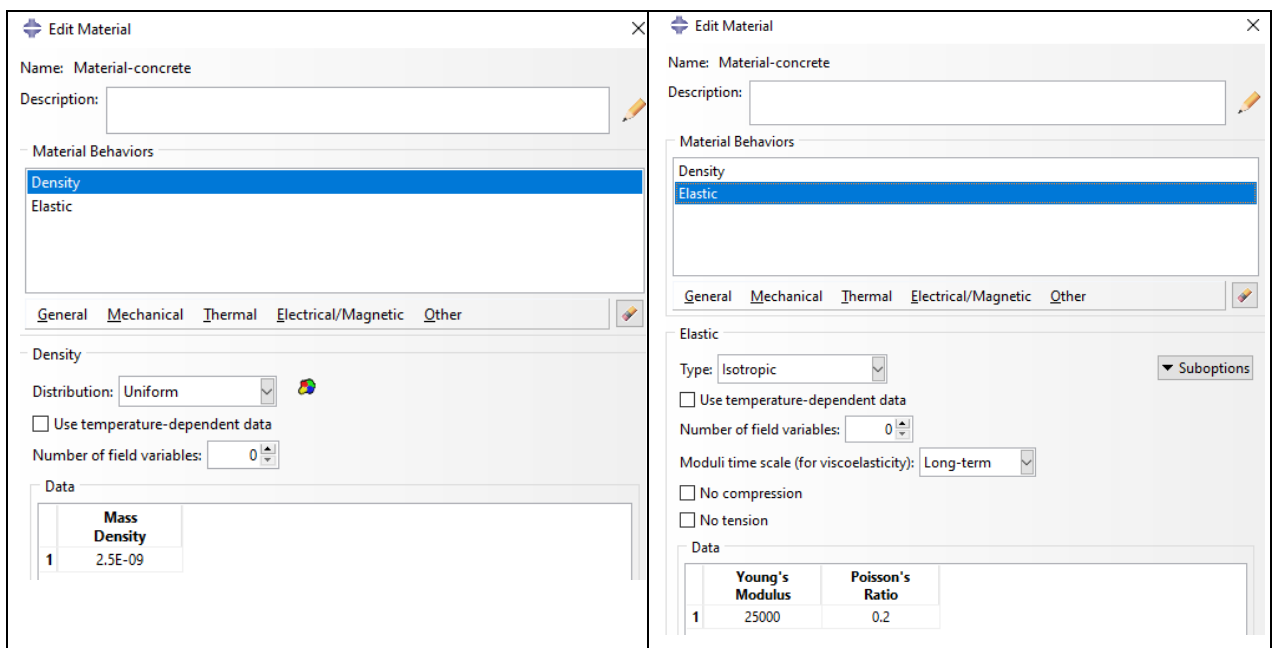
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	Σεισμικές δράσεις	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,65 > + 0,1 (Mpa)	Ex-0,3Ez (Job3) Ex+0,3Ez (Job2)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
Smax	+ 0,75 > + 0,1 (Mpa)	-Ex-0,3Ez (Job5)	ΤΡΟΥΛΟΣ, ΤΟΞΑ, ΕΞΩΤΕΡ.ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ
S11	+ 0,43 > + 0,1 (Mpa)	Ex-0,3Ez (Job3) Ex+0,3Ez (Job2) Ez-0,3Ex (Job7)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S33	+ 0,449 > + 0,1 (Mpa)	-Ez+0,3Ex (Job8) -Ez-0,3Ex (Job9)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΣ ΙΕΡΟΥ, ΣΤΕΨΗ ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΥ
S33	+ 0,37 > + 0,1 (Mpa)	Ez-0,3Ex (Job7)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S22	+ 0,48 > + 0,1 (Mpa), -0,18 > - 0,1(Mpa)	Ex-0,3Ez (Job3) Ex+0,3Ez (Job2) Ez-0,3Ex (Job7)	ΤΡΟΥΛΛΟΣ, ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΙΕΡΟΥ

S12	+ 0,34 > + 0,1 (Mpa), -0,25 > - 0,1(Mpa)	-Ex-0,3Ez (Job5) -Ex+0,3Ez (Job4)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΙ, ΠΕΣΣΟΣ ΤΡΟΥΛΟΥ
S12	+ 0,3 > 0,1(Mpa), -0,19 < -0,1 (Mpa)	-Ez+0,3Ex (Job8)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S12	+ 0,17 > + 0,1 (Mpa)	-Ex-0,3Ez (Job5) -Ex+0,3Ez (Job4)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S13	+ 0,34 > + 0,1 (Mpa), -0,22 > - 0,1(Mpa)	- Ex+0,3Ez (Job2) Ez-0,3Ex (Job7)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S13	-0,21 > - 0,1 (Mpa)	-Ez-0,3Ex (Job9)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ ΚΑΙ ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ ΝΑΡΘΗΚΑ
S23	-0,35 > -0,1 (Mpa)	-Ez-0,3Ex (Job9)	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ
S23	+ 0,29 > + 0,1 (Mpa), -0,12 > - 0,1 (Mpa)	-Ez+0,3Ex (Job8)	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S23	+ 0,2 > + 0,1 (Mpa), -0,16 > - 0,1 (Mpa)	Ex-0,3Ez (Job3) Ex+0,3Ez (Job2)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,28 > + 0,1 (Mpa), -0,12 > - 0,1 (Mpa)	Ez+0,3Ex (Job6)	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ
S23	+ 0,27 > + 0,1 (Mpa), -0,33 > - 0,1 (Mpa)	Ez-0,3Ex (Job7)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΤΡΙΓΩΝΑ
U1	+ 5 mm -5,23 mm	Ex-0,3Ez (Job3) -Ex+0,3Ez (Job4)	ΕΣΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
U2	-4,27 mm	-Ez-0,3Ex (Job9)	ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ
U3	+ 4,788 mm + 4,17 mm	- Ex+0,3Ez (Job2) -Ez-0,3Ex (Job9)	ΤΟΞΑ ΝΑΡΘΗΚΑ ΝΟΤΙΑ ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠ.

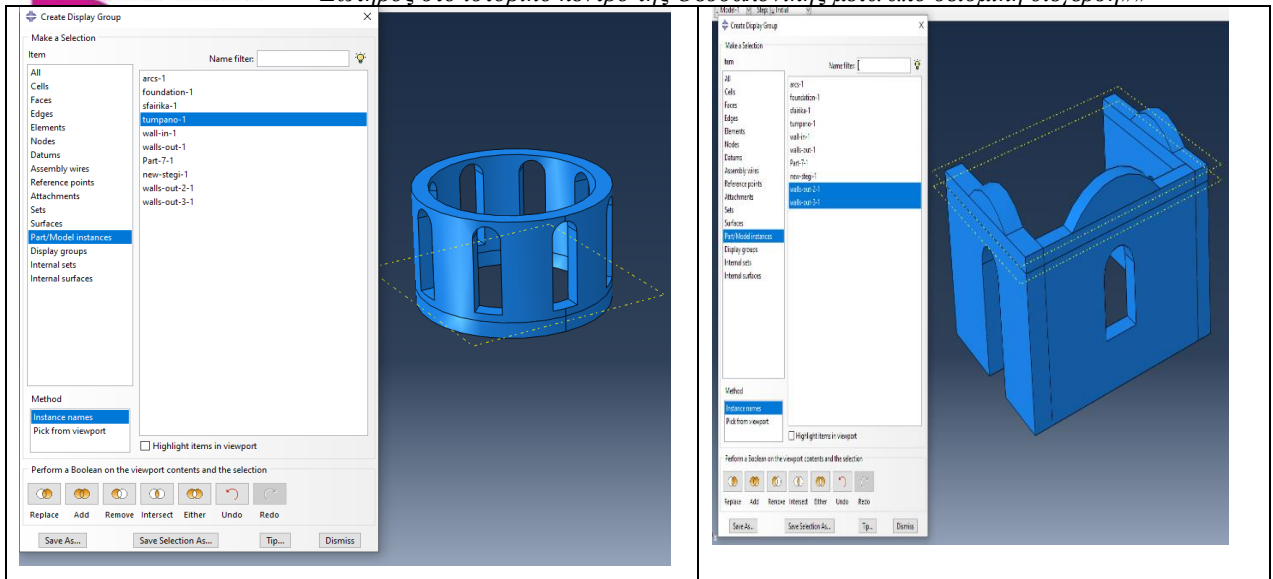
Ακολούθως προτείνονται μέθοδοι αποκατάστασης των παραπάνω αστοχιών.

7 Σεισμική αποτίμηση και παρουσίαση αποτελεσμάτων για την μορφή του μνημείου μετά από ενισχύσεις περί το 1936

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του προσομοιώματος του ναού με τη σημερινή γεωμετρία του μνημείου με τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επισκευών που υλοποιήθηκαν περί το 1936 μετά από καθίζηση που υπέστη το μνημείο, πιθανότατα λόγω κάποιου σεισμού, περί το 1933. Η επίλυση υλοποιήθηκε με ισοδύναμη στατική ανάλυση για τους συνδυασμούς που περιγράφονται στο κεφάλαιο 5.3.7. Πιο συγκεκριμένα οι επεμβάσεις που έγιναν περί το 1936, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω είναι το «δέσιμο» του τρούλλου στη βάση του με beton και το περιμετρικό σενάζ στην περιοχή του νάρθηκα. Οι παραπάνω επεμβάσεις υλοποιήθηκαν προσθέτοντας στο μοντέλο το υλικό “concrete” (Εικόνα 7-1) και εισάγοντας το περιμετρικά στην βάση του τρούλλου και στον νάρθηκα στην στέψη της τοιχοποιίας (Εικόνα 7-2).



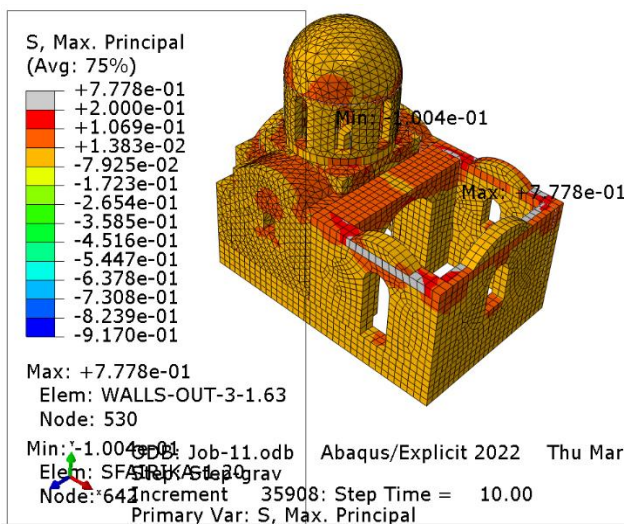
ΕΙΚΟΝΑ 7-1: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ “CONCRETE”



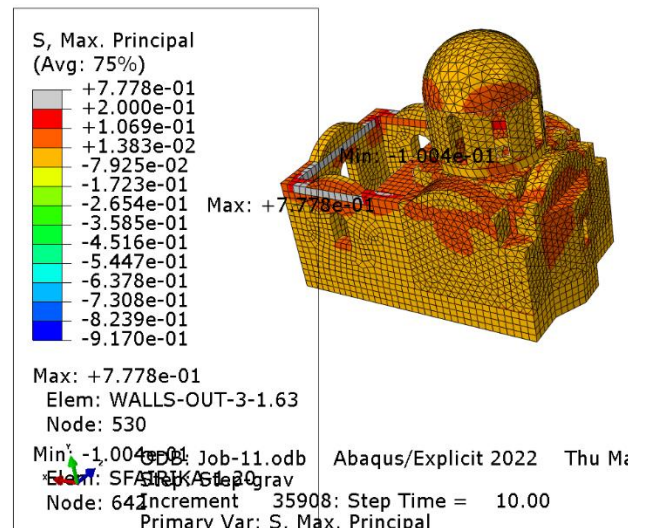
ΕΙΚΟΝΑ 7-2: ΣΕΝΑΖ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΥΛΟΥ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΝΑΡΘΗΚΑ

Σημειώνεται ότι στο παρόν μοντέλο λήφθηκαν οι τοιχοποιίες της δυτικής και βόρειας όψης ως πλινθόκτιστες μια και σε αυτήν την επισκευαστική φάση χρησιμοποιήθηκαν πλίνθοι για τις όψεις αυτές. Η θλιπτική αντοχή της πλινθοδομής υπολογίστηκε με τη βοήθεια των ερήμην τιμών σε 0,917 Μρα όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.1.2. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε όρους τάσεων και παραμορφώσεων με μορφή διαγραμμάτων και πινάκων.

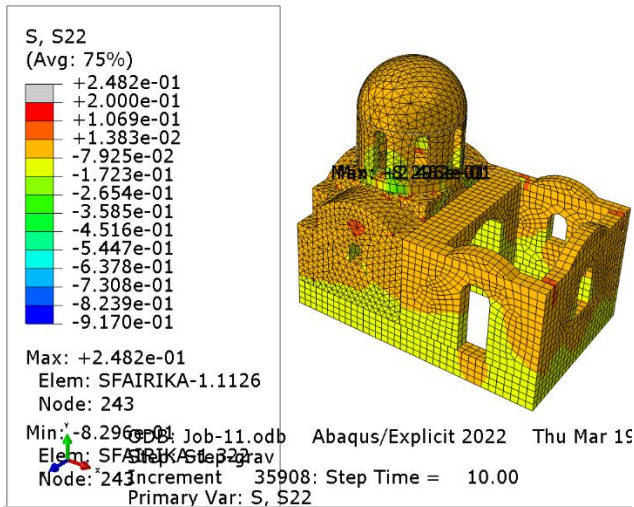
7.1. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το Ίδιο Βάρος (“Job 11”)



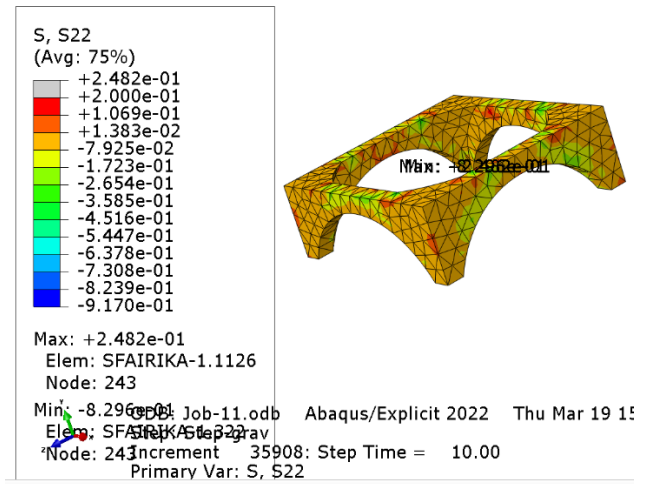
ΕΙΚΟΝΑ 7-3 : Τάσεις SMAX (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



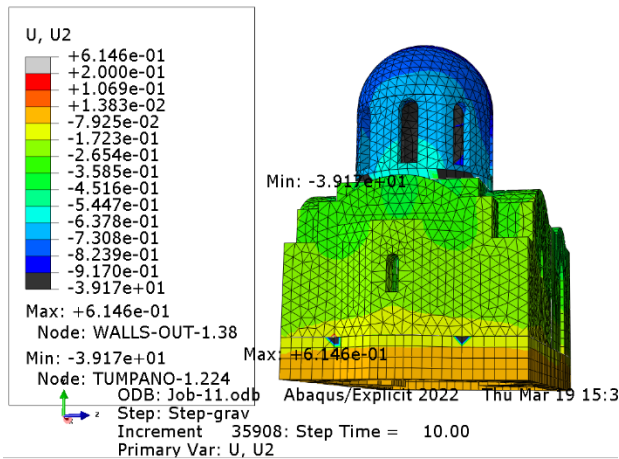
ΕΙΚΟΝΑ 7-4 : Τάσεις SMAX (ΝΑ ΟΨΗ, ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



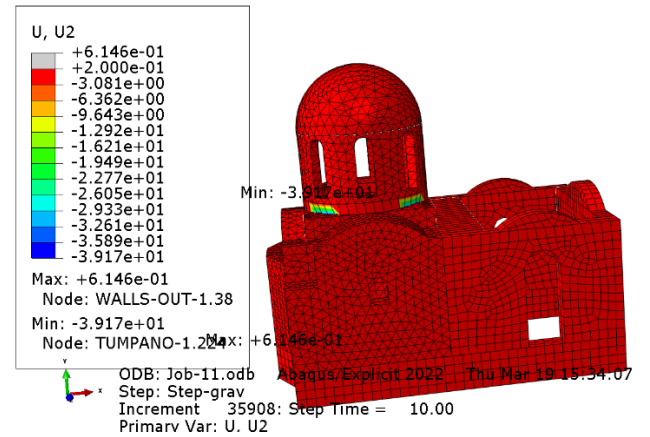
ΕΙΚΟΝΑ 7-5 : Τύσεις S22 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-6 : Τύσεις S22 (ΤΥΜΠΑΝΟ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-7 : U2 (ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ)

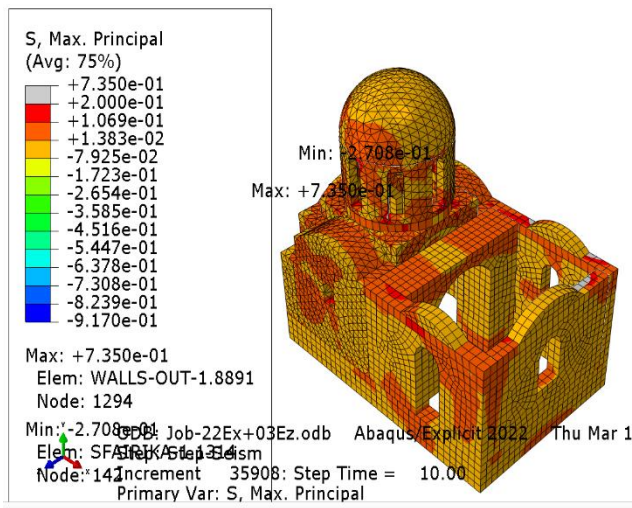


ΕΙΚΟΝΑ 7-8 : U2 (ΤΥΜΠΑΝΟ)

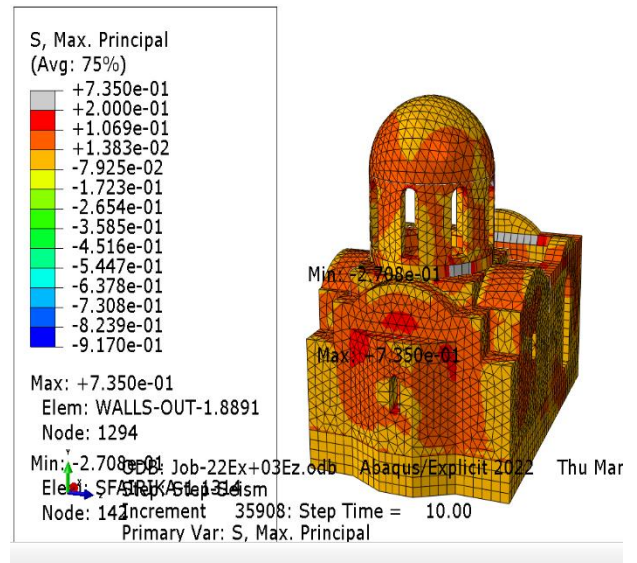
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,78 > +0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΣΕΝΑΖ ΝΑΡΘΗΚΑ
S22	+ 0,24 > +0,2(Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U2	+ 0,61 mm - 39,17 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΣ ΙΕΡΟΥ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-1 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ιδιο Βάρος)

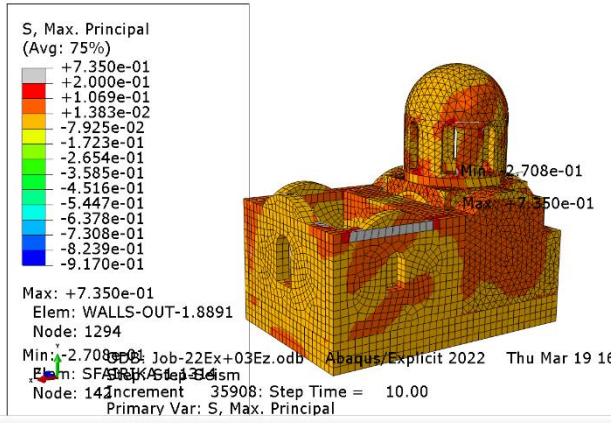
7.2. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ex+0.3Ez (“Job 22”)



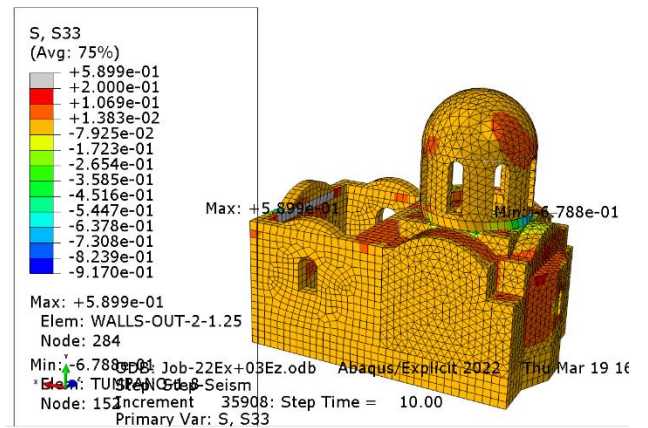
ΕΙΚΟΝΑ 7-9 : Τάσεις SMAX (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



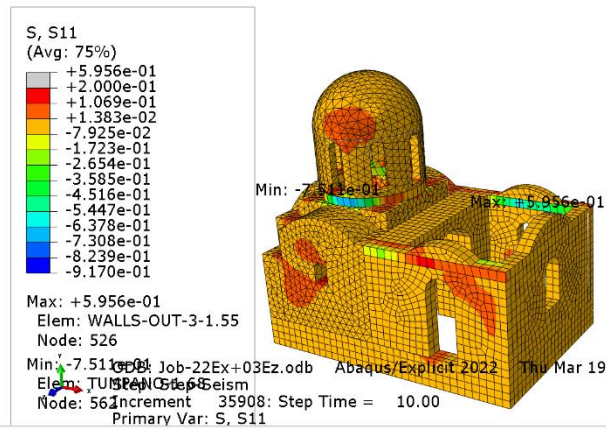
ΕΙΚΟΝΑ 7-10 : Τάσεις SMAX (ΤΡΟΥΛΛΟΣ)



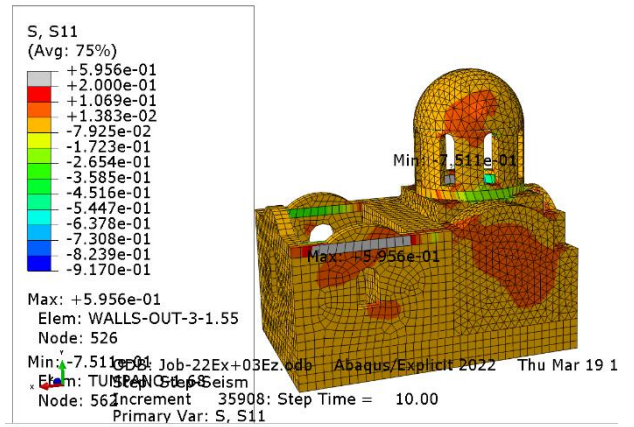
ΕΙΚΟΝΑ 7-11 : Τάσεις SMAX (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



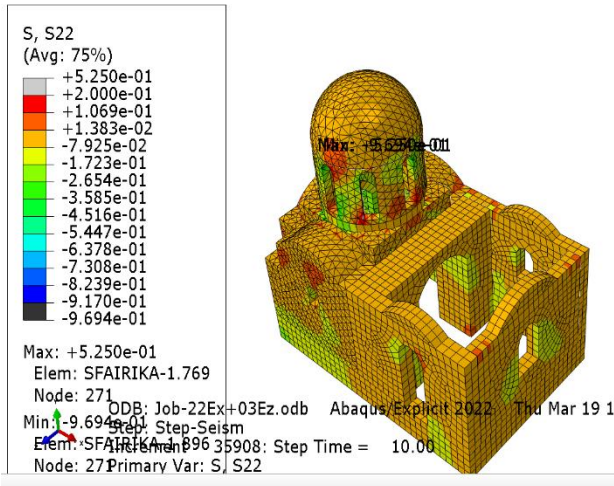
ΕΙΚΟΝΑ 7-12 : Τάσεις S33



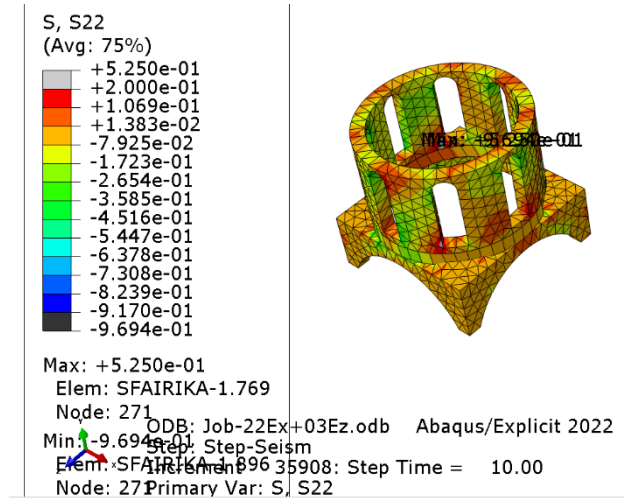
ΕΙΚΟΝΑ 7-13 : Τάσεις S11 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



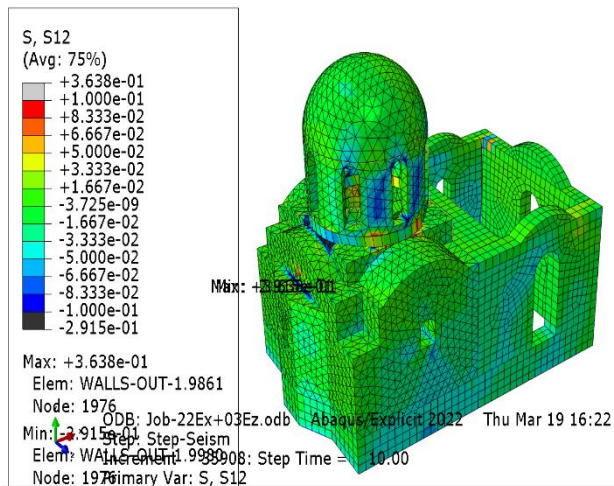
ΕΙΚΟΝΑ 7-14 : Τάσεις S11 (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



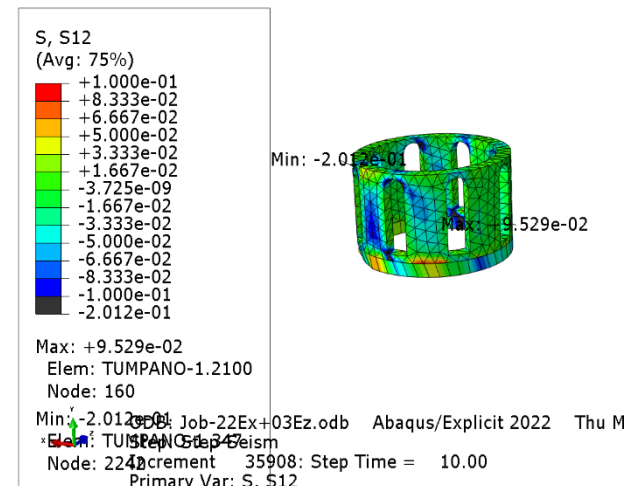
ΕΙΚΟΝΑ 7-15 : Τάσεις S22 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



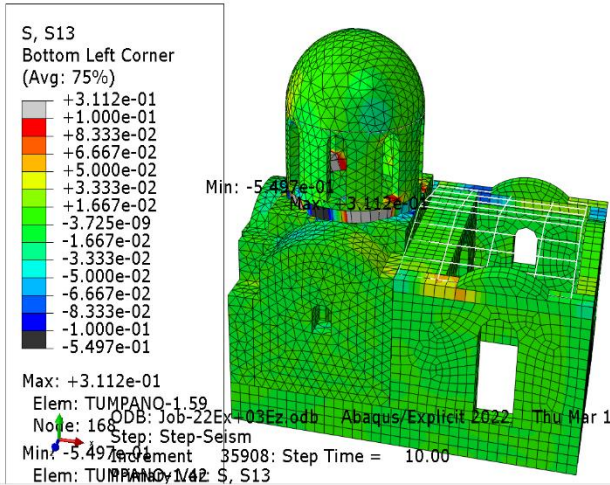
ΕΙΚΟΝΑ 7-16 : Τάσεις S22 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΤΡΙΓΩΝΑ)



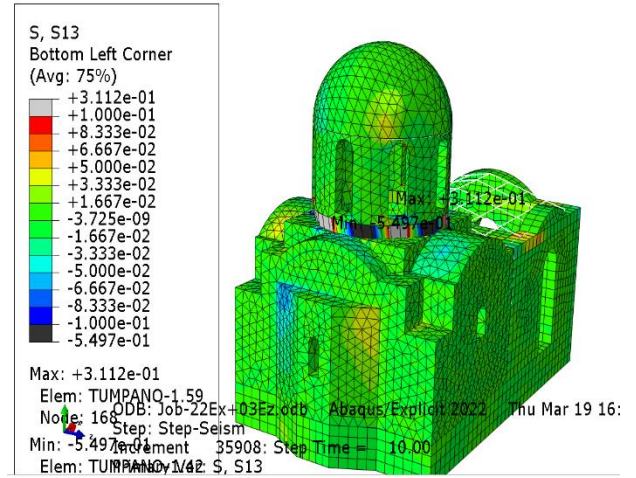
ΕΙΚΟΝΑ 7-17 : Τάσεις S12 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



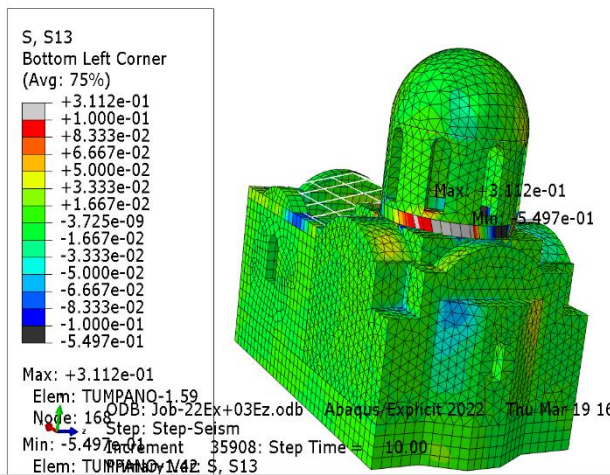
ΕΙΚΟΝΑ 7-18: Τάσεις S12 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



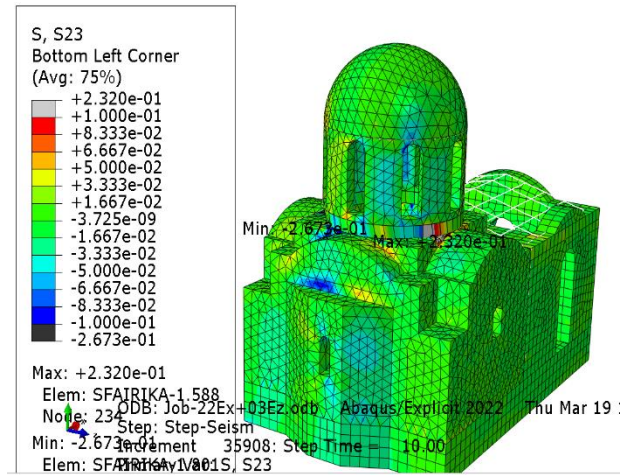
ΕΙΚΟΝΑ 7-19 : Τάσεις S13 (ΜΕ ΣΤΕΓΗ)



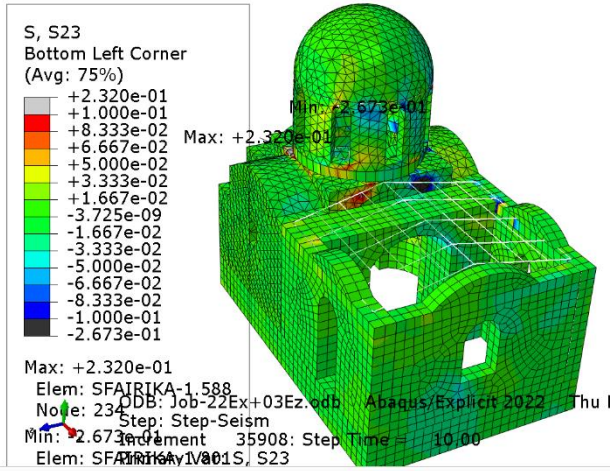
ΕΙΚΟΝΑ 7-20 : Τάσεις S13 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



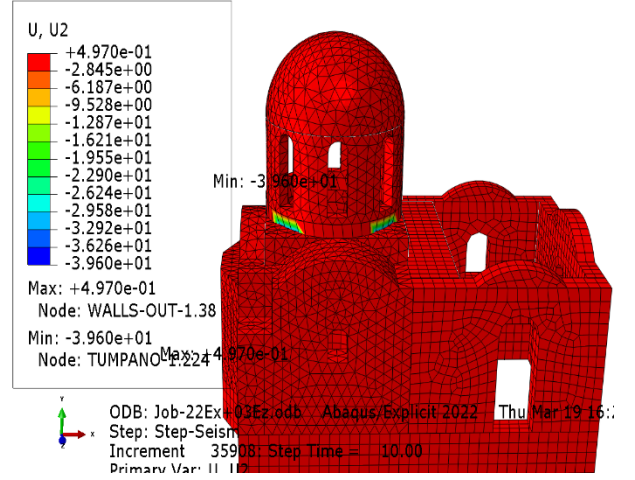
ΕΙΚΟΝΑ 7-21 : Τάσεις S13 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



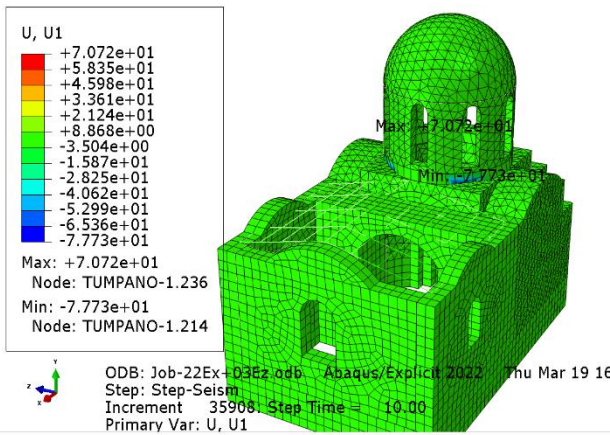
ΕΙΚΟΝΑ 7-22 : Τάσεις S23 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



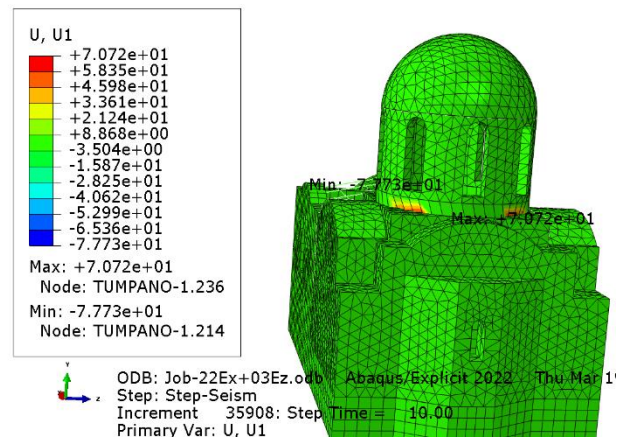
ΕΙΚΟΝΑ 7-23 : Τάσεις S23 (ΒΔ ΠΛΕΥΡΑ)



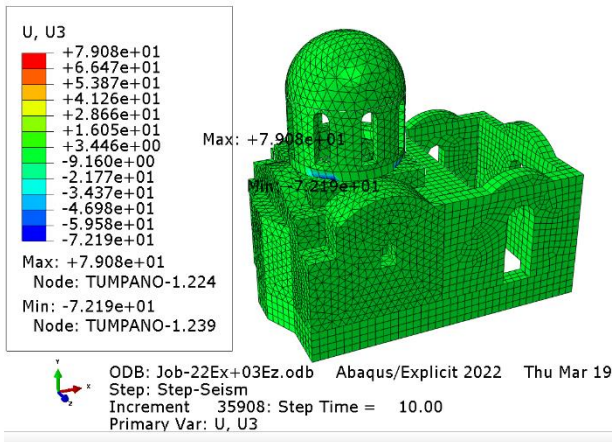
ΕΙΚΟΝΑ 7-24 : U2 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



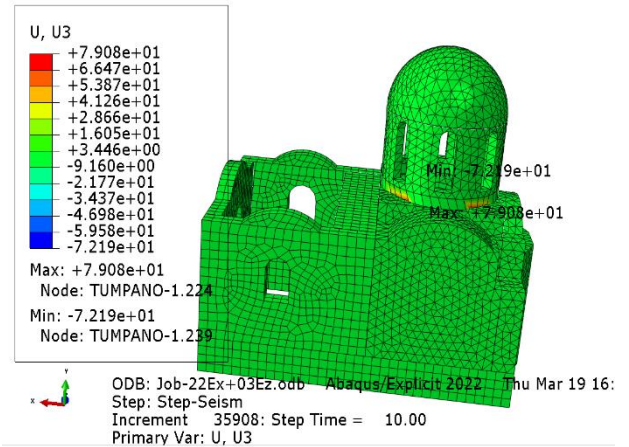
ΕΙΚΟΝΑ 7-25 : U1



ΕΙΚΟΝΑ 7-26 : U1 (ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-27 : U3 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)

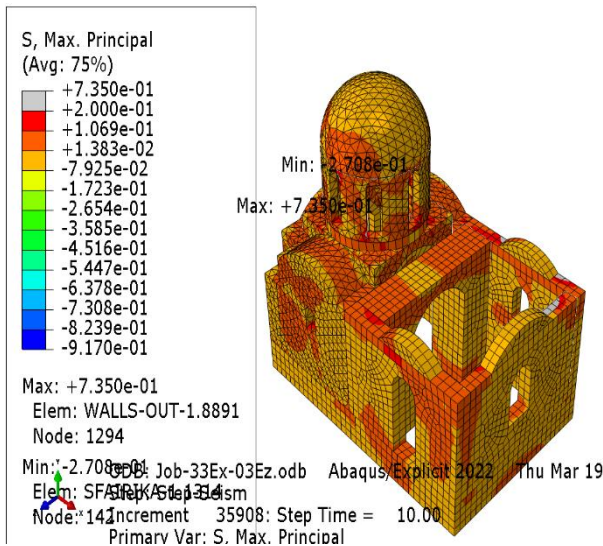


ΕΙΚΟΝΑ 7-28 : U3 (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)

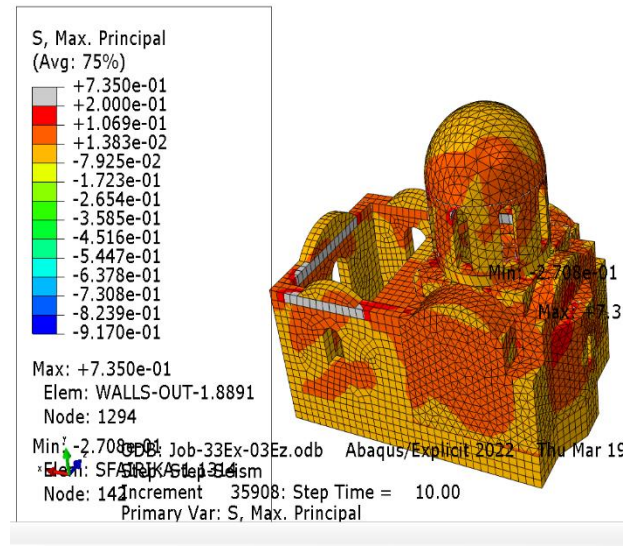
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,736 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,917 Mpa	ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΝΟΤΙΑ, ΔΥΤΙΚΗ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S11	+ 0,596 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,917 Mpa	ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ (ΣΤΕΨΗ)
S22	+ 0,53 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,59 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <0,953 Mpa	ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S12	+ 0,36 > + 0,1 (Mpa)	-0,29 > -0,1 (Mpa)	ΤΟΙΧΟΣ ΙΕΡΟΥ
S13	+ 0,31 > + 0,1 (Mpa)	-0,55 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ (ΣΕΝΑΖ), ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,23 > + 0,1 (Mpa)	-0,27 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 71 mm - 78 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U2	+ 0,49 mm - 39,6 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U3	+ 79 mm - 72 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ (ΒΑΣΗ)

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-2 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ex+0.3Ez)

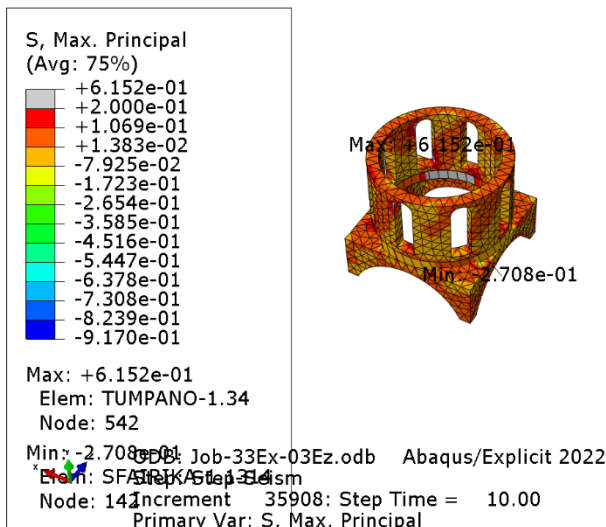
7.3. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ex-0.3Ez (“Job 33A”)



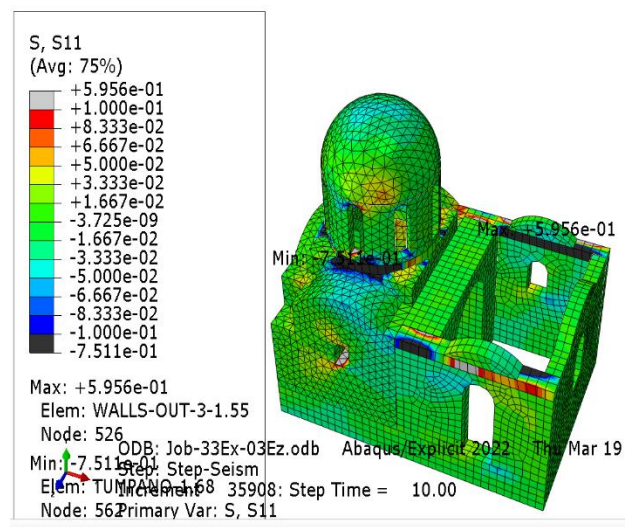
ΕΙΚΟΝΑ 7-29 : Τάσεις SMAX (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



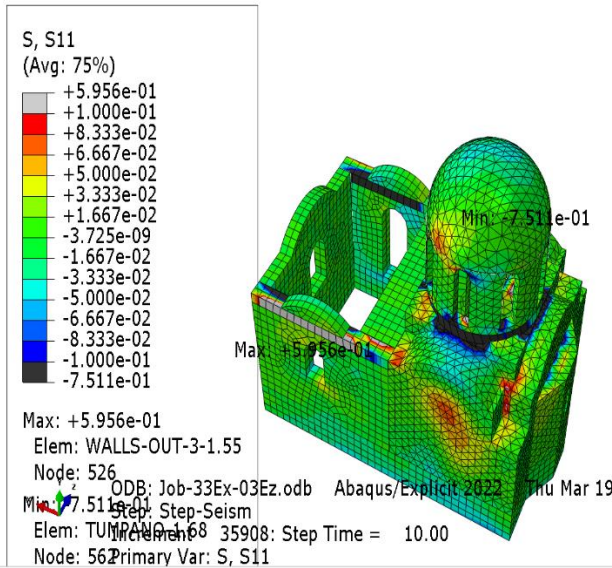
ΕΙΚΟΝΑ 7-30 : Τάσεις SMAX (ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΝΑΡΘΗΚΑ)



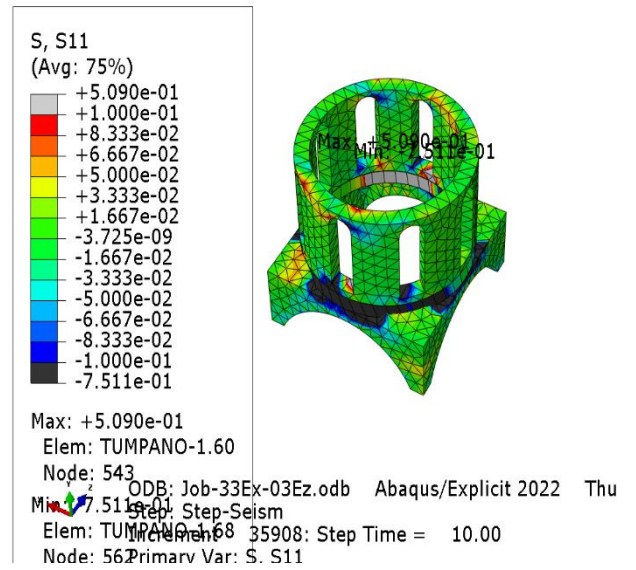
ΕΙΚΟΝΑ 7-31 : Τάσεις SMAX (ΤΥΜΠΑΝΟ)



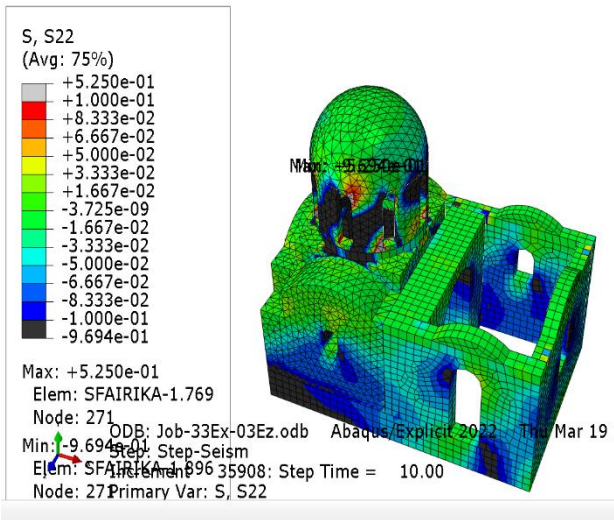
ΕΙΚΟΝΑ 7-32 : Τάσεις S11 (ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΓΗ)



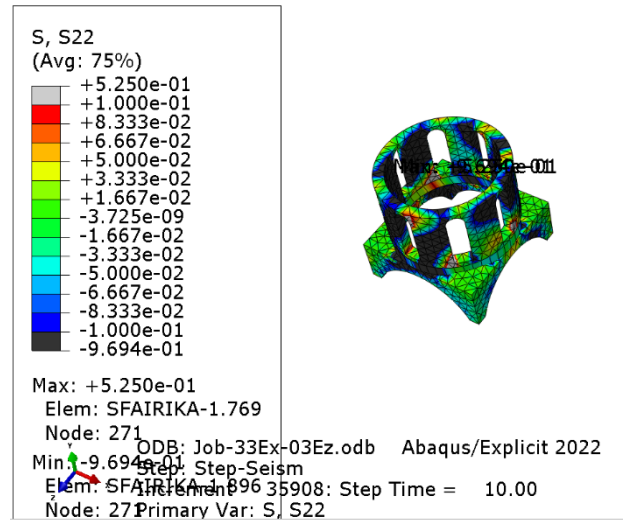
ΕΙΚΟΝΑ 7-33 : Τάσεις S11 (ΤΟΙΧΟΙ ΝΑΡΘΗΚΑ)



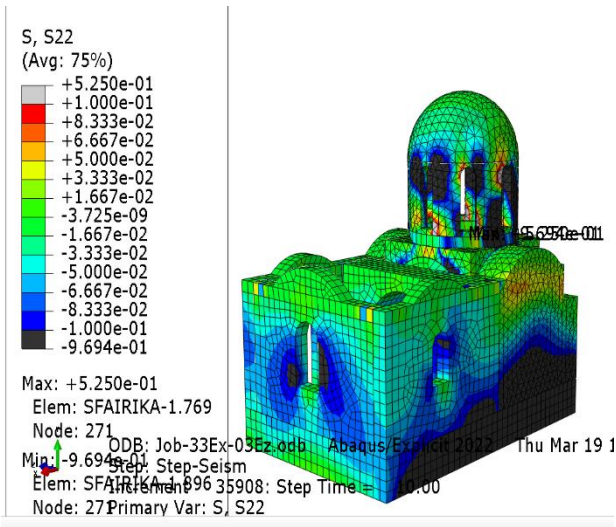
ΕΙΚΟΝΑ 7-34 : Τάσεις S11 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



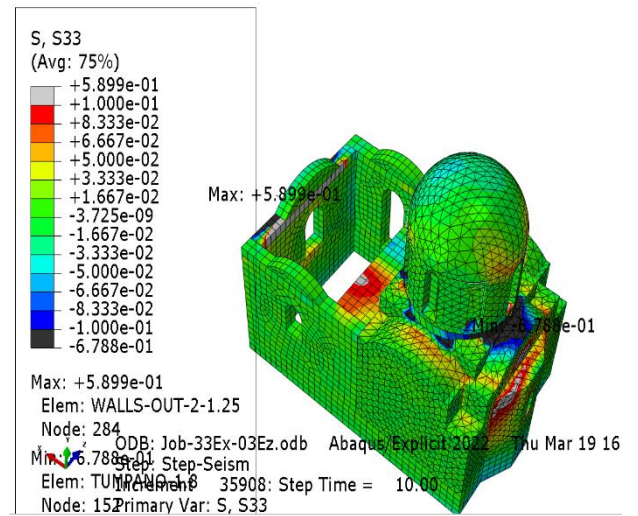
ΕΙΚΟΝΑ 7-35 : Τάσεις S22



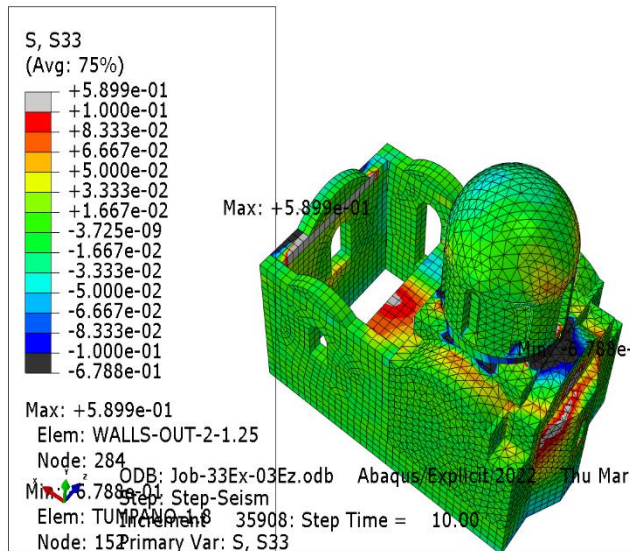
ΕΙΚΟΝΑ 7-36 : Τάσεις S22 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



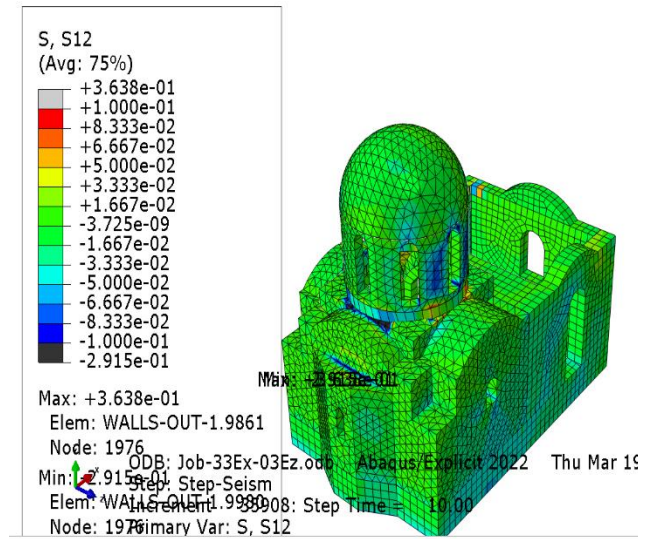
ΕΙΚΟΝΑ 7-37 : Τάσεις S22



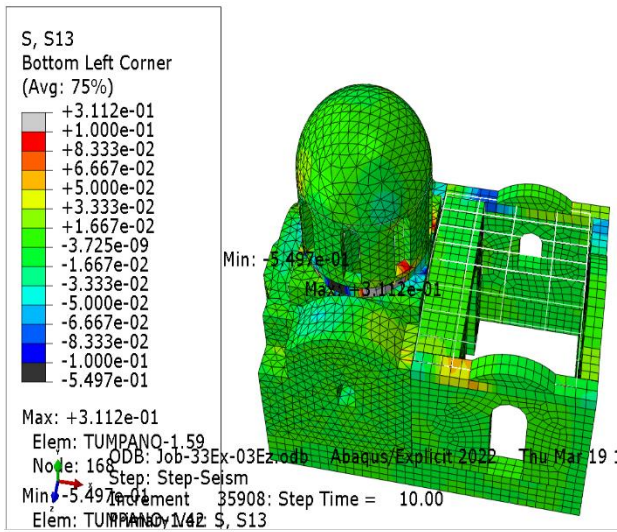
ΕΙΚΟΝΑ 7-38 : Τάσεις S33



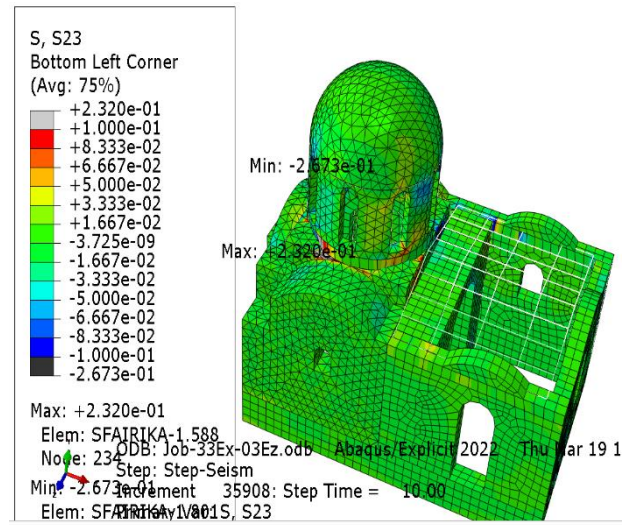
ΕΙΚΟΝΑ 7-39 : Τάσεις S33



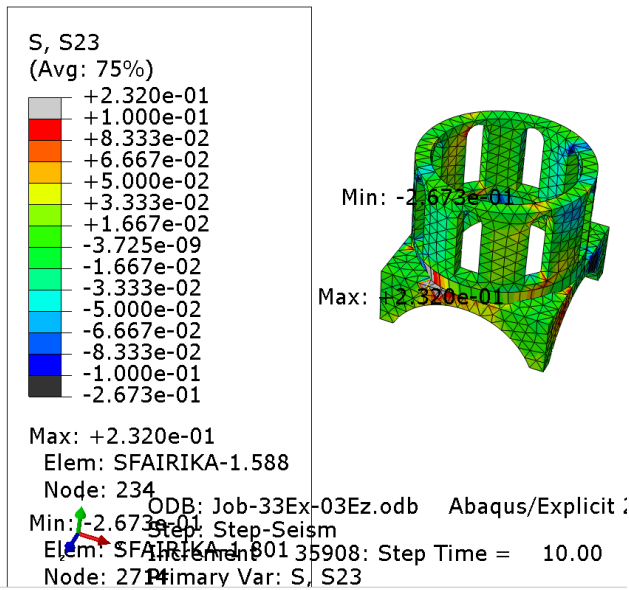
ΕΙΚΟΝΑ 7-40 : Τάσεις S12 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



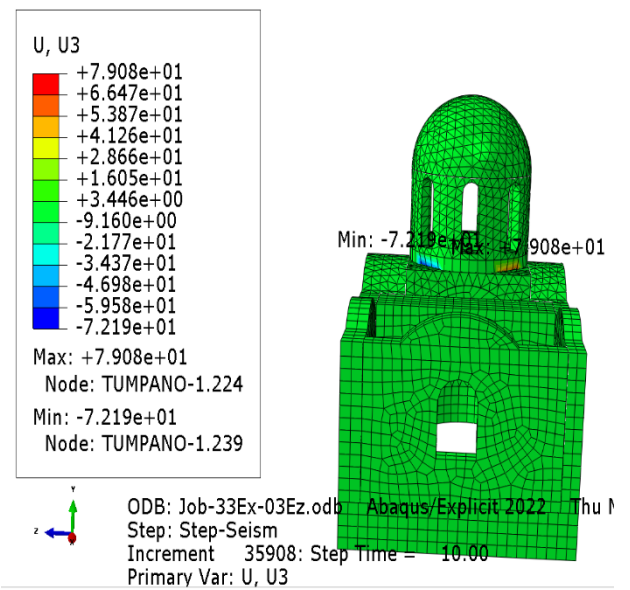
ΕΙΚΟΝΑ 7-41 : Τάσεις S13



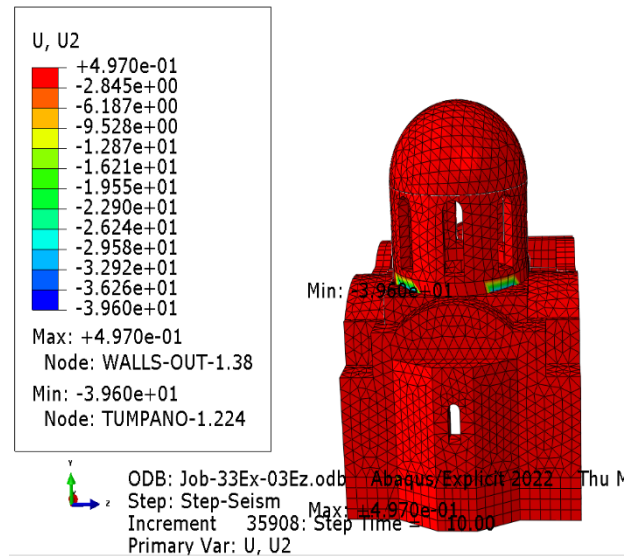
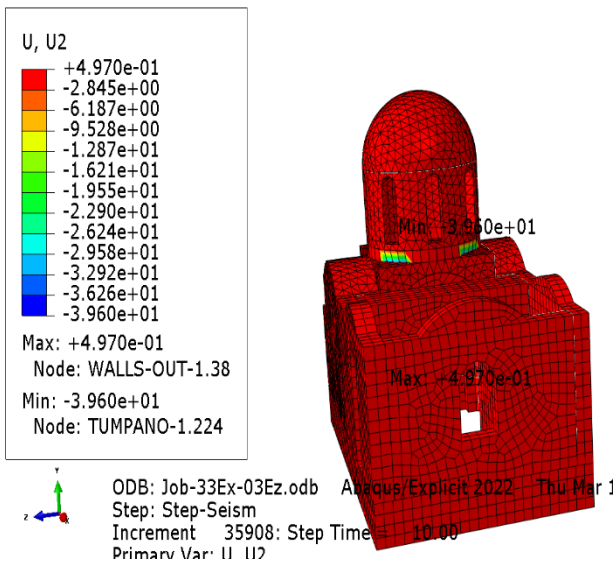
ΕΙΚΟΝΑ 7-42 : Τάσεις S23



ΕΙΚΟΝΑ 7-43 : Τάσεις S23 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ)

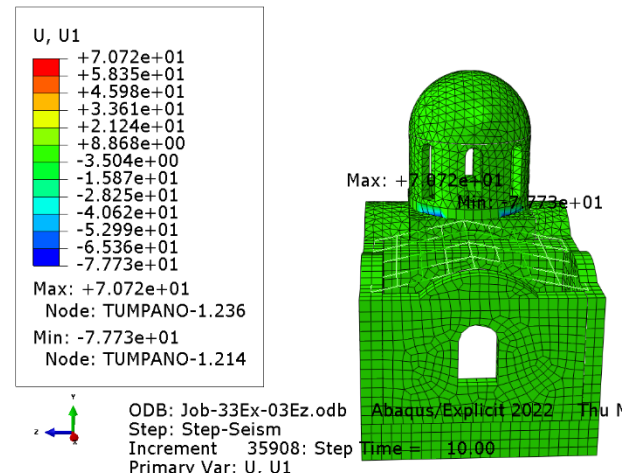
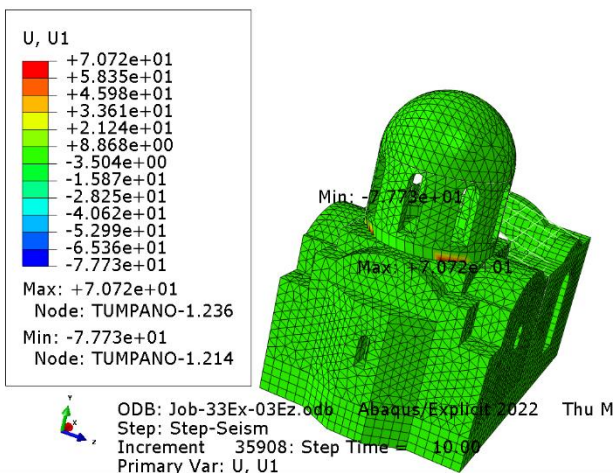


ΕΙΚΟΝΑ 7-44: Μετακινήσεις U3 (ΔΥΤΙΚΗ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-45 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U2 (ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΠΕΥΡΑ)

ΕΙΚΟΝΑ 7-44 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U2



ΕΙΚΟΝΑ 7-47 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U1 (ΔΥΤΙΚΗ ΠΕΥΡΑ)

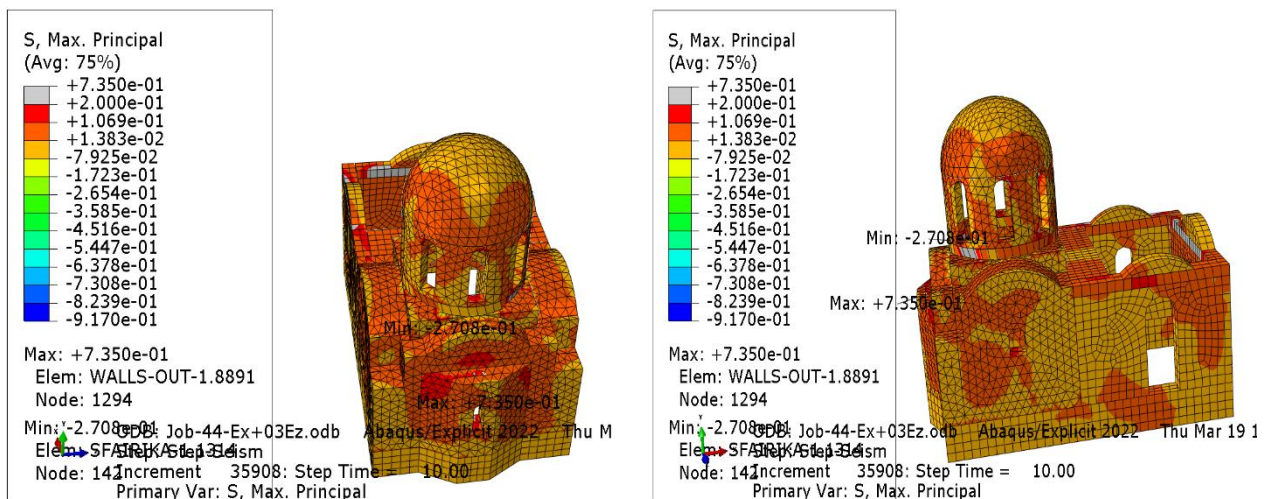
ΕΙΚΟΝΑ 7-46 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U1

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 1,2> + 0,2 (Μpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,18<0,917 Μpa ΣΦΑΙΡΙΚΑ	ΔΙΑΖΩΜΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ

S11	+ 0,7 > + 0,2 (Mpa)	-0,96 > -0,917 Mpa	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S22	+ 0,43 > + 0,2 (Mpa) ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑΚΑ	Χωρίς υπέρβαση, - 1,5 > -0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S33	+ 1,2 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,95 < 0,953 Mpa	ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ (ΔΙΑΖΩΜΑ)
S12	+ 0,48 > + 0,1 (Mpa)	-0,54 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S13	+ 0,3 > + 0,1 (Mpa) ΣΦΑΙΡΙΚΑ	-0,5 > -0,1 (Mpa) ΤΥΜΠΙΑΝΟ	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,34 > + 0,1 (Mpa)	-0,36 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 72 mm - 77 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U2	+ 0,68 mm - 39 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U3	+ 79 mm - 73 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ (ΒΑΣΗ)

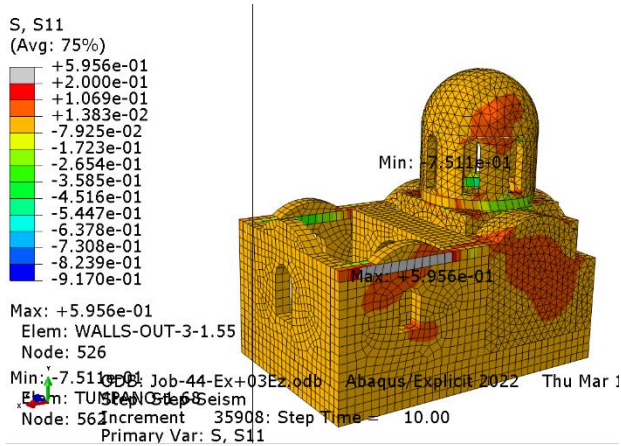
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-3 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ex-0.3Ez)

7.4. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ex+0.3Ez (“Job 44A”)

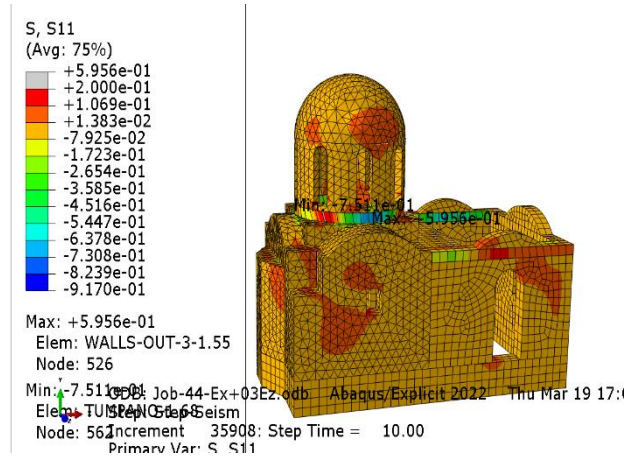


ΕΙΚΟΝΑ 7-48 : Τάσεις SMAX (ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΠΛΕΥΡΑ)

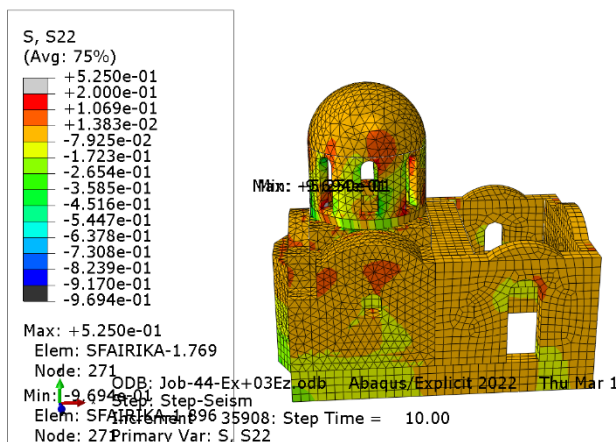
ΕΙΚΟΝΑ 7-49 : Τάσεις SMAX (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



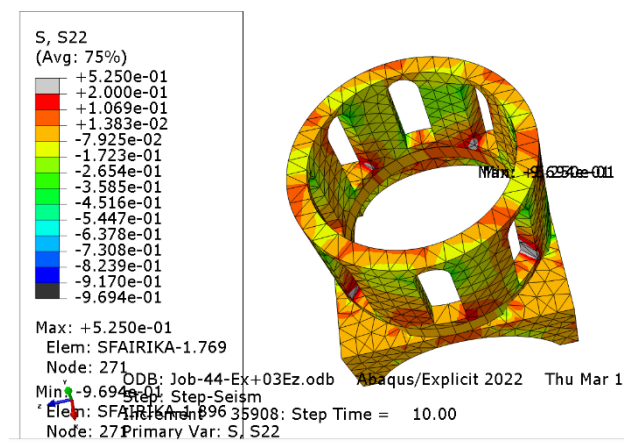
ΕΙΚΟΝΑ 7-50 : ΤΑΣΕΙΣ S11 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



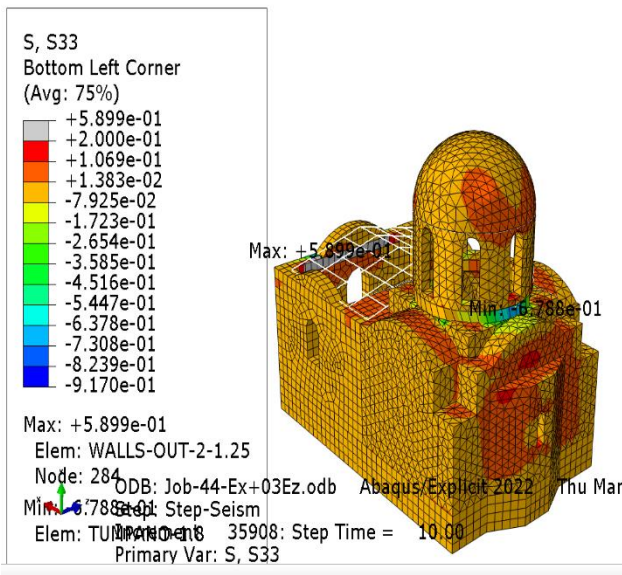
ΕΙΚΟΝΑ 7-51 : Τάσεις S11 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



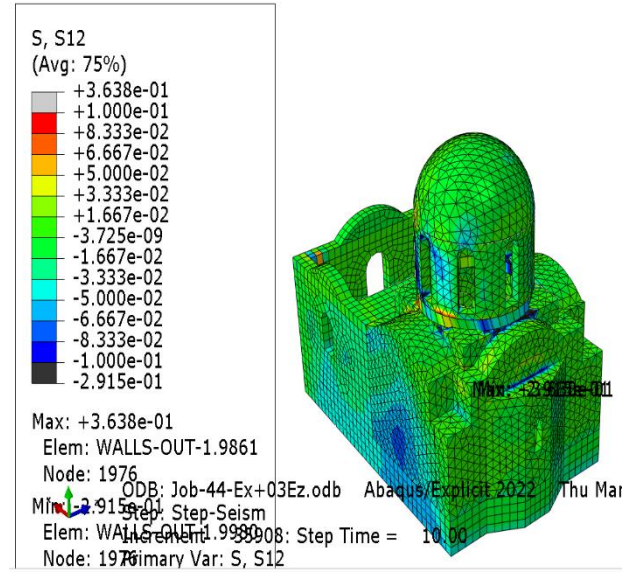
ΕΙΚΟΝΑ 7-52 : ΤΑΣΕΙΣ S22 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



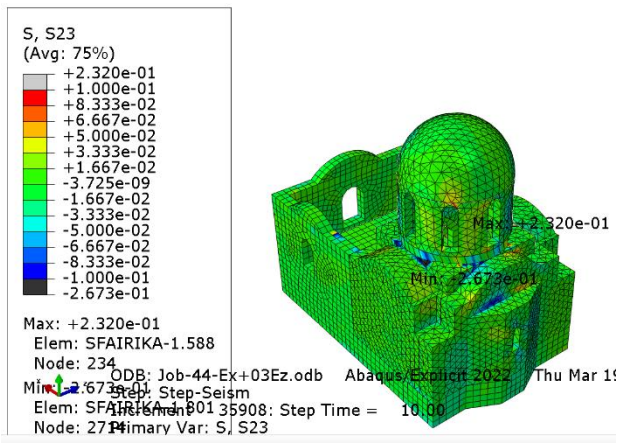
ΕΙΚΟΝΑ 7-53 : Τάσεις S22 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ-ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



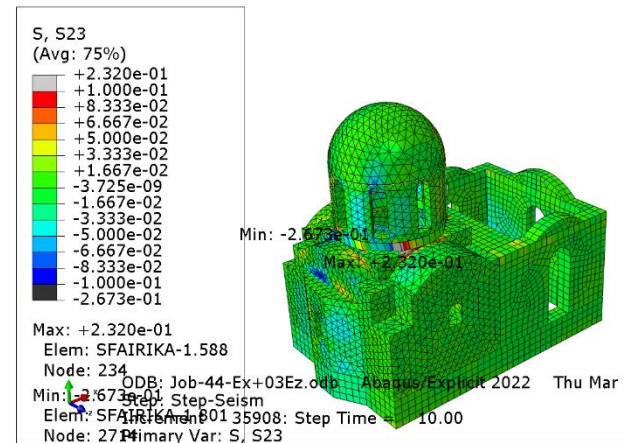
ΕΙΚΟΝΑ 7-54 : ΤΑΣΕΙΣ S33



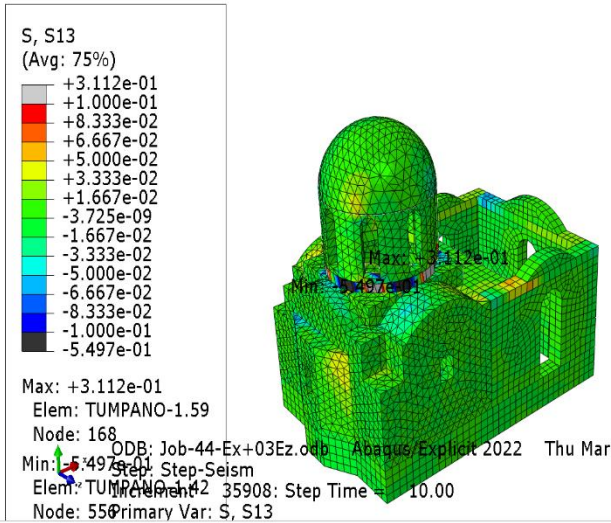
ΕΙΚΟΝΑ 7-55 : Τάσεις S12



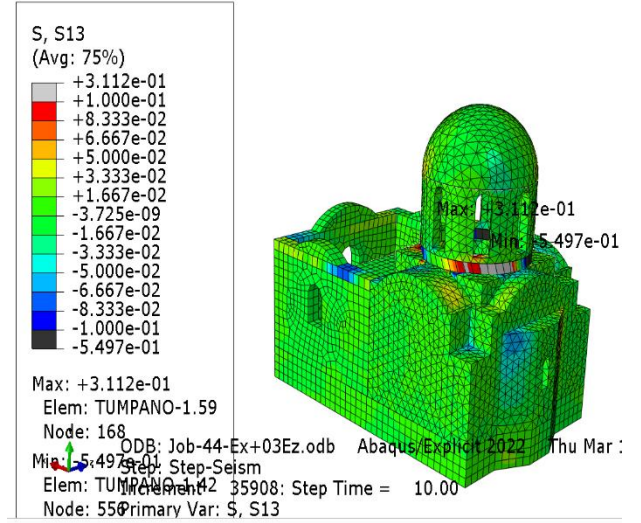
ΕΙΚΟΝΑ 7-56 : ΤΑΣΕΙΣ S23



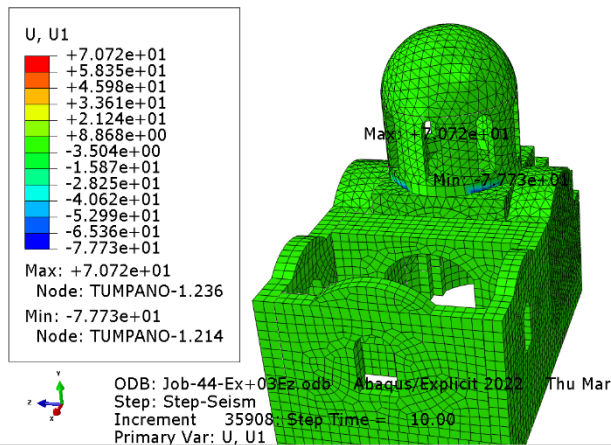
ΕΙΚΟΝΑ 7-57 : Τάσεις S23 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



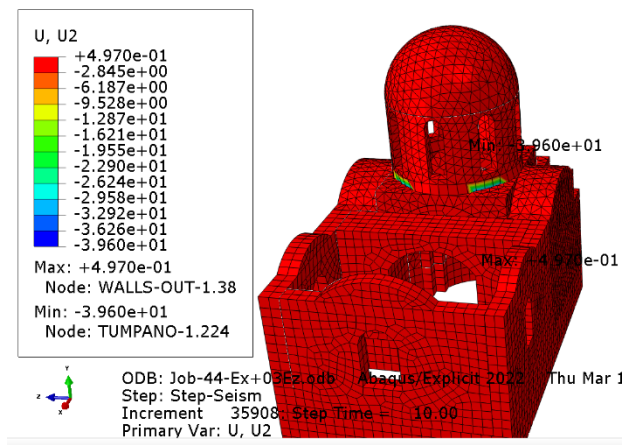
ΕΙΚΟΝΑ 7-58 : ΤΑΣΕΙΣ S13 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



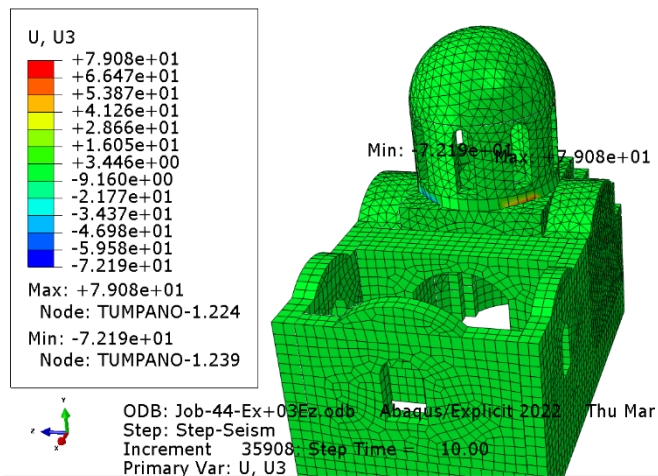
ΕΙΚΟΝΑ 7-59: Τάσεις S13 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-60 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U1



ΕΙΚΟΝΑ 7-61: ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U2

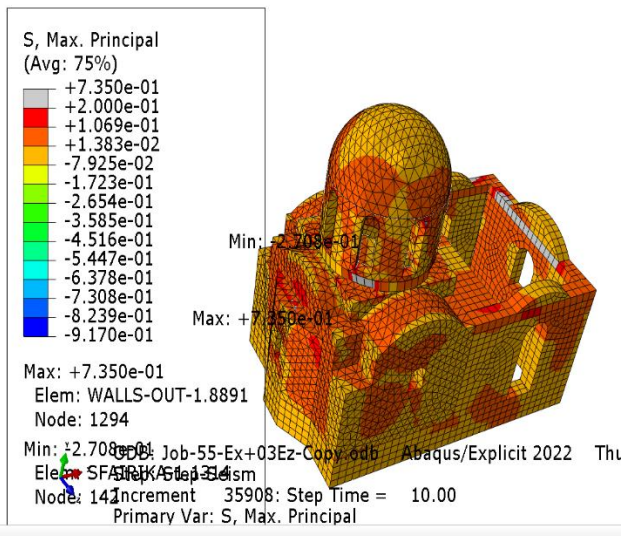


ΕΙΚΟΝΑ 7-62: ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U3

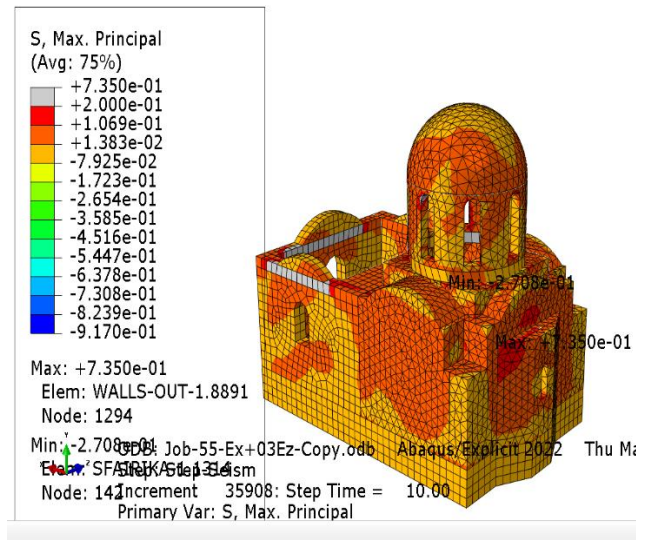
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,72 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,23 < -0,917 Mpa ΣΦΑΙΡΙΚΑ	ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΝΑΡΘΗΚΑ (ΔΙΑΖΩΜΑ)
S11	+ 0,5 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,68 < -0,917 Mpa ΣΦΑΙΡΙΚΑ	ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΔΥΤΙΚΗ (ΔΙΑΖΩΜΑ)
S22	+ 0,44 > + 0,2 (Mpa) (ΣΗΜΕΙΑΚΑ)	Χωρίς υπέρβαση - 0,85 Mpa < -0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,49 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,76 < -0,917 Mpa ΤΥΜΠΙΑΝΟ	ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΝΑΡΘΗΚΑ (ΣΕΝΑΖ)
S12	+ 0,37 > + 0,1 (Mpa)	-0,3 > -0,1 (Mpa)	ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ, ΣΦΑΙΡΙΚΑ (ΣΗΜΕΙΑΚΑ)
S13	+ 0,25 > + 0,1 (Mpa)	-0,46 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,24 > + 0,1 (Mpa)	-0,21 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 71 mm - 77 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U2	+ 52 mm - 39 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U3	+ 79,mm - 72 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-4 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ex-0.3Ez)

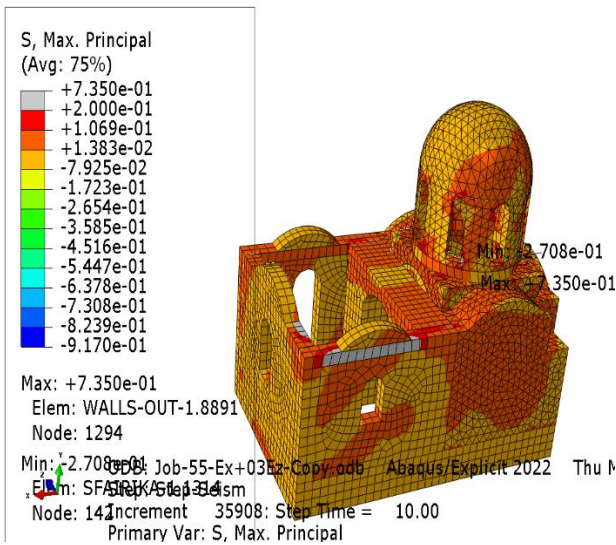
7.5. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ex-0.3Ez (“Job 55A”)



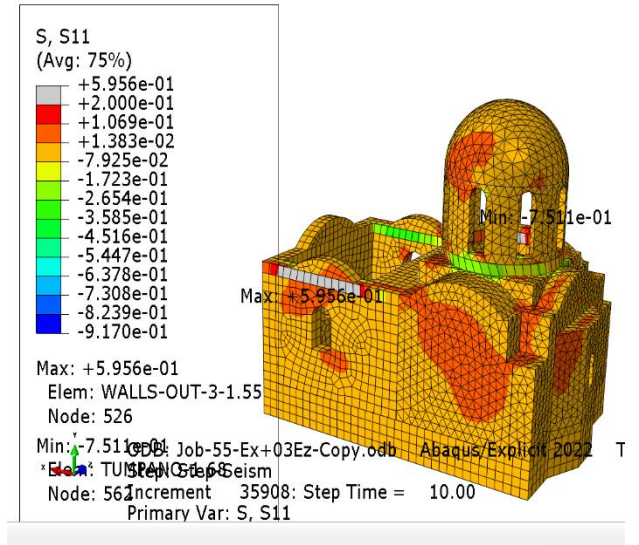
ΕΙΚΟΝΑ 7-63 : Τάσεις SMAX (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



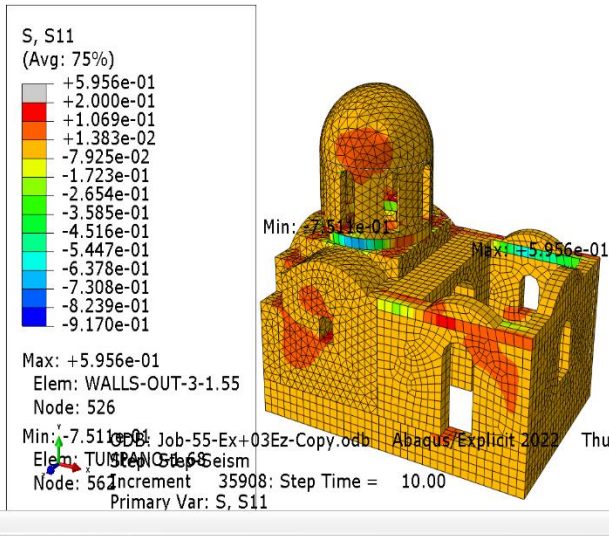
ΕΙΚΟΝΑ 7-64 : Τάσεις SMAX (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



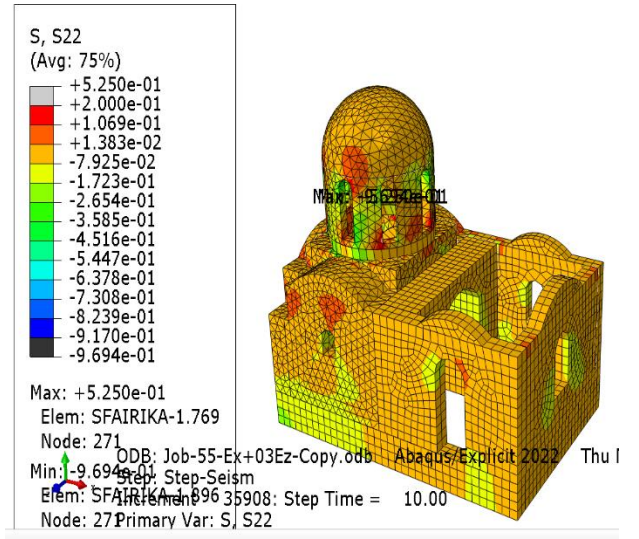
ΕΙΚΟΝΑ 7-65 : Τάσεις SMAX (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



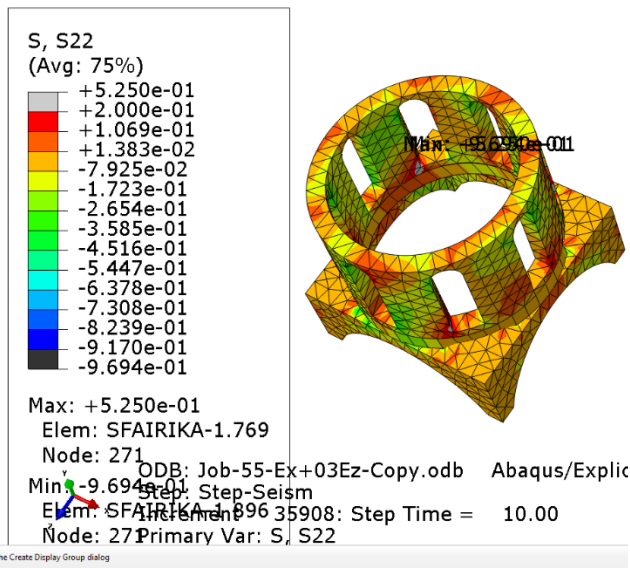
ΕΙΚΟΝΑ 7-66: Τάσεις S11 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



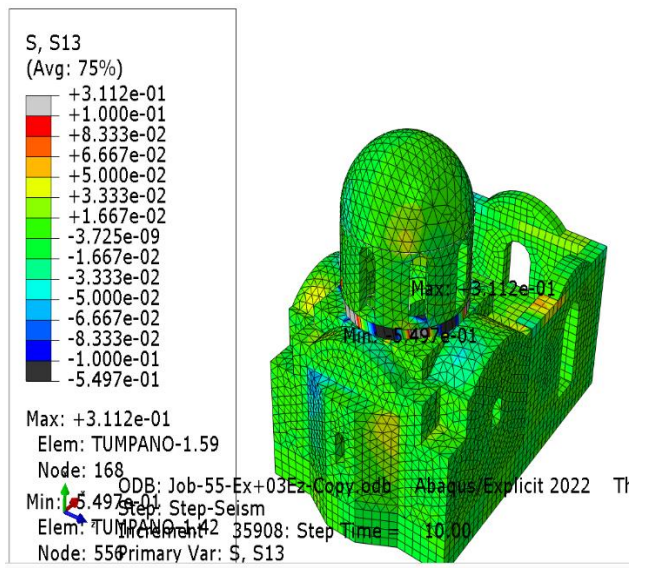
ΕΙΚΟΝΑ 7-67 : Τάσεις S11 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



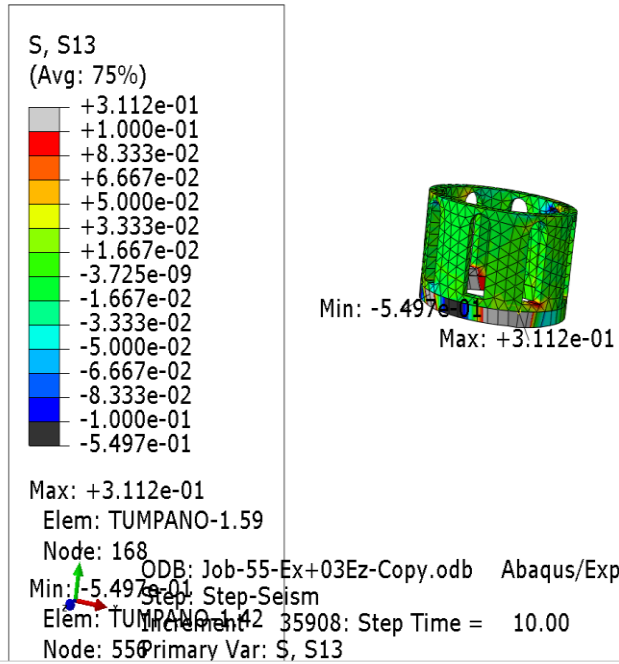
ΕΙΚΟΝΑ 7-68 : Τάσεις S22 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



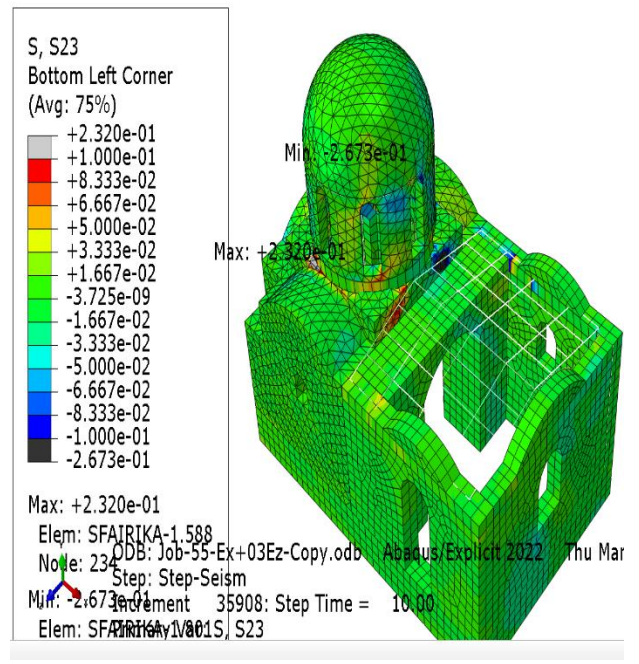
ΕΙΚΟΝΑ 7-69 : Τάσεις S22 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)



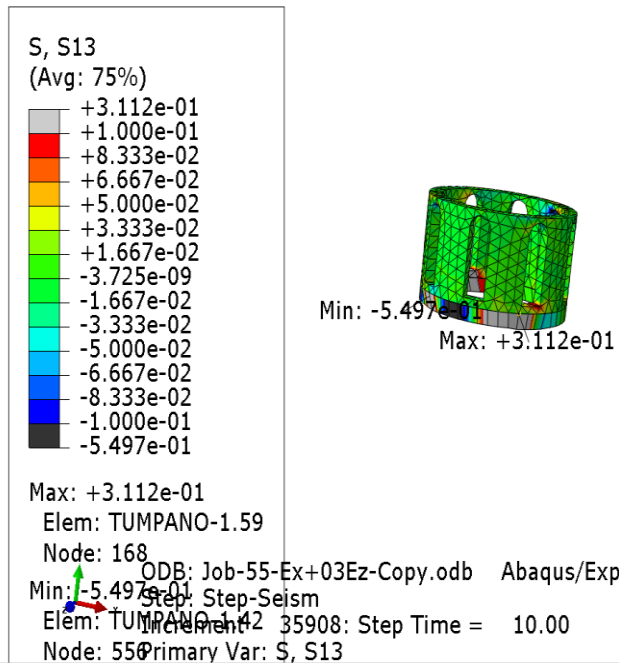
ΕΙΚΟΝΑ 7-70 : Τάσεις S13



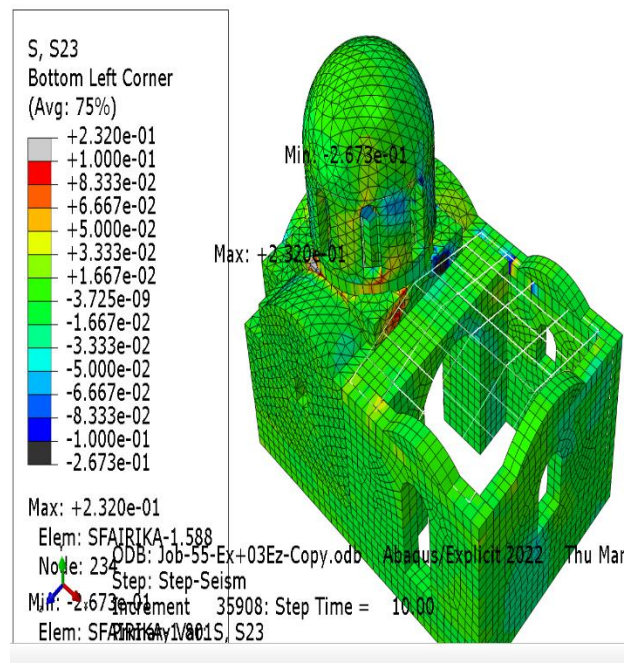
ΕΙΚΟΝΑ 7-71 : Τάσεις S13 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



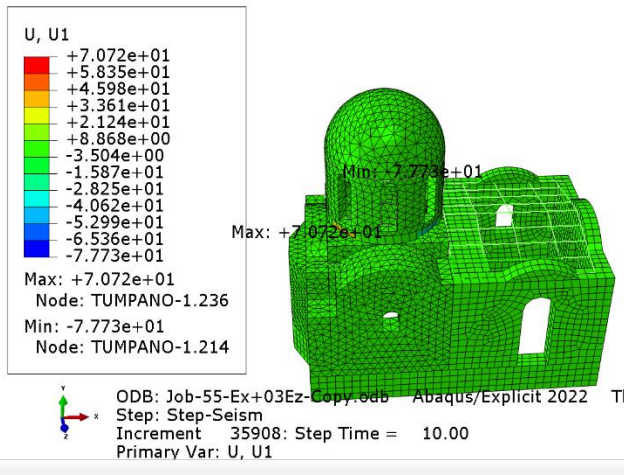
ΕΙΚΟΝΑ 7-72: Τάσεις S23 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



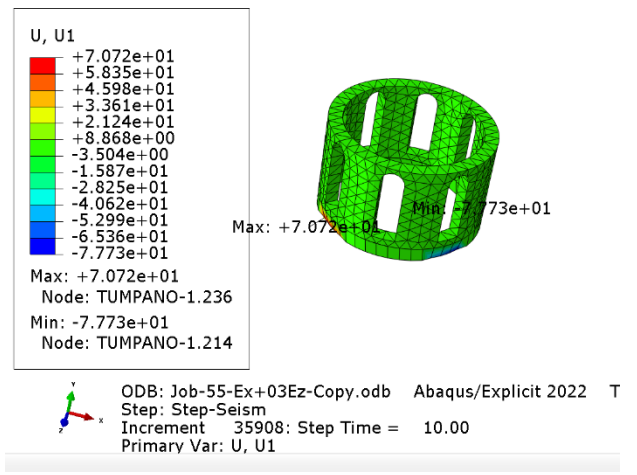
ΕΙΚΟΝΑ 7-73 : Τάσεις S13 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



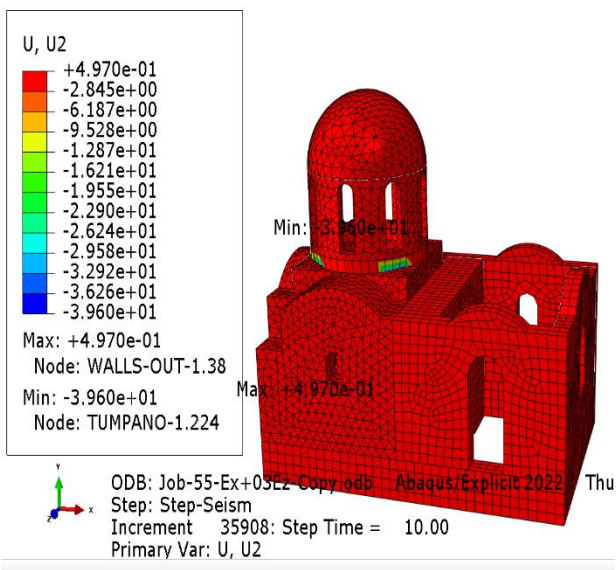
ΕΙΚΟΝΑ 7-74: Τάσεις S23 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



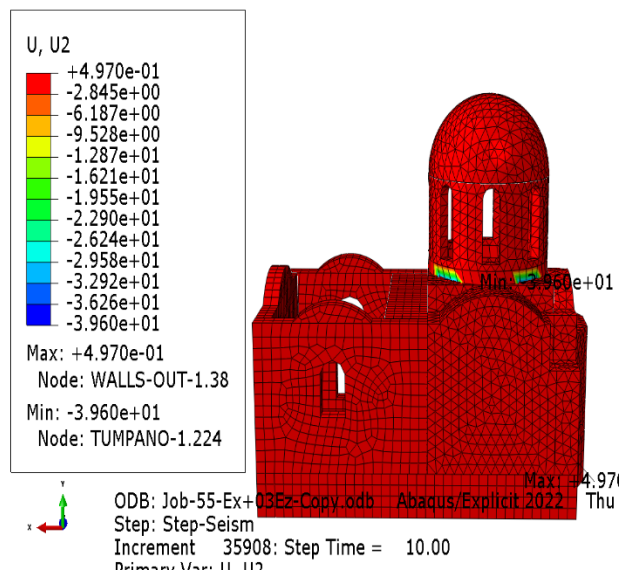
ΕΙΚΟΝΑ 7-75 : Μετακινήσεις U1 (Β. ΠΛΕΥΡΑ)



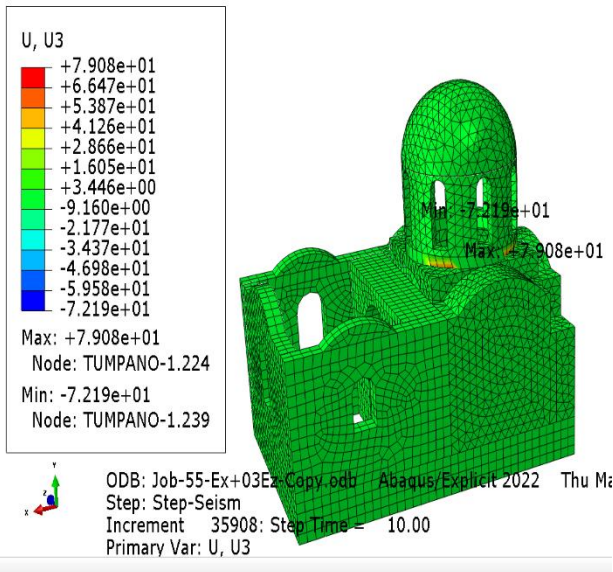
ΕΙΚΟΝΑ 7-76: Μετακινήσεις U1 (ΤΥΜΠΑΝΟ)



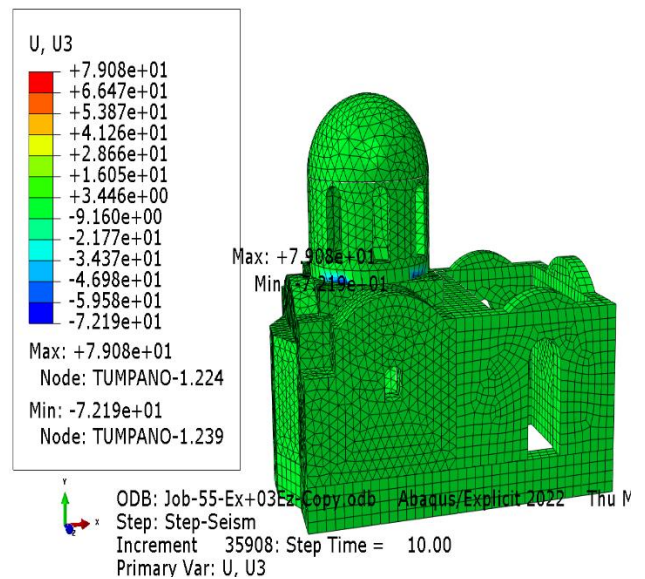
ΕΙΚΟΝΑ 7-77 : Μετακινήσεις U2 (Β. ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-78: Μετακινήσεις U2 (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-79 : Μετακινήσεις U3

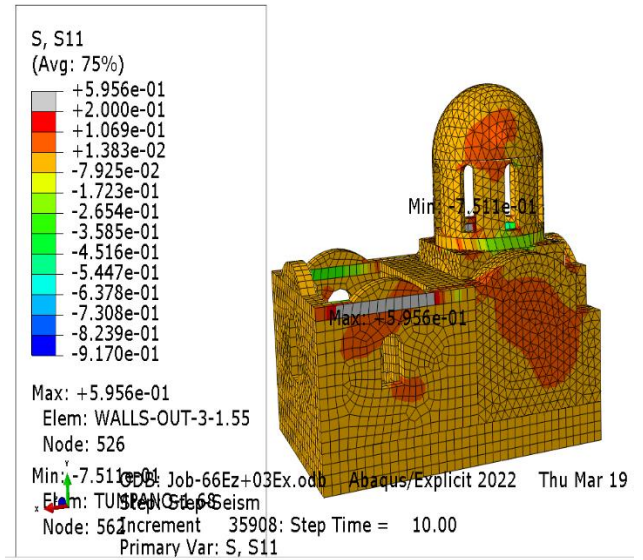
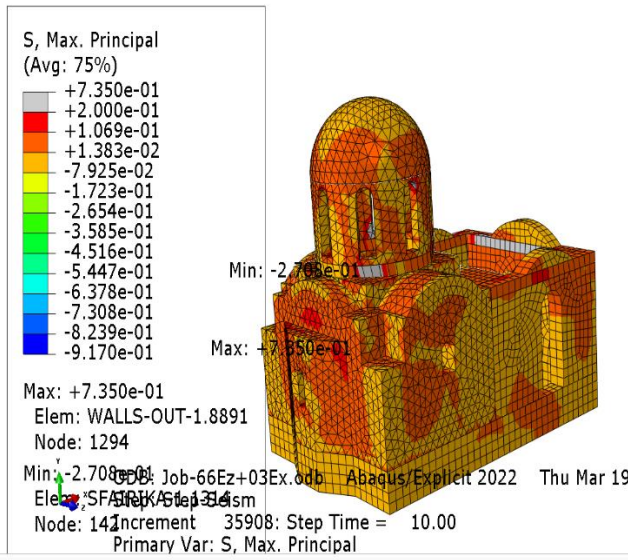


ΕΙΚΟΝΑ 7-80: Μετακινήσεις U3

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,73 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,27 < -0,917 Mpa ΣΦΑΙΡΙΚΑ	ΔΙΑΖΩΜΑ
S11	+ 0,59 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,75 < -0,917 Mpa, ΤΥΜΠΙΑΝΟ	ΔΙΑΖΩΜΑ
S22	+ 0,53 > + 0,2 (Mpa)	-0,97 Mpa > -0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,59 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,67 < -0,917 Mpa, ΤΥΜΠΙΑΝΟ	ΔΙΑΖΩΜΑ
S12	+ 0,36 > + 0,1 (Mpa)	-0,29 > -0,1 (Mpa)	ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ
S13	+ 0,31 > + 0,1 (Mpa)	-0,55 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,23 > + 0,1 (Mpa)	-0,27 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 71 mm - 78 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U2	+ 0,49 mm - 39,6 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U3	+ 79,1 mm - 72,2 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ

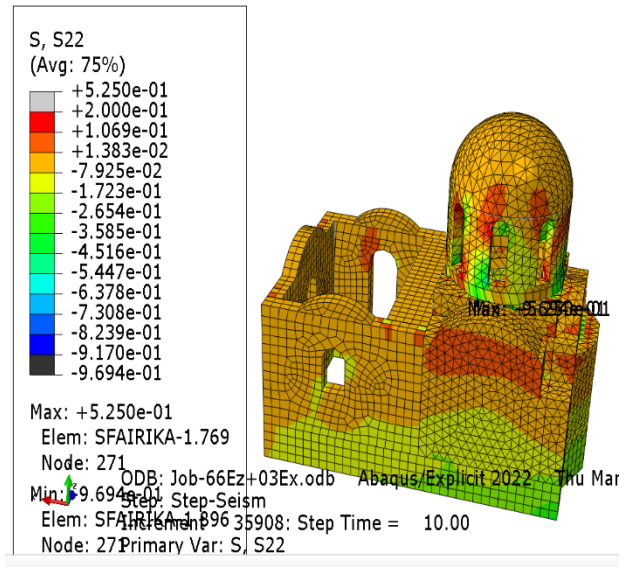
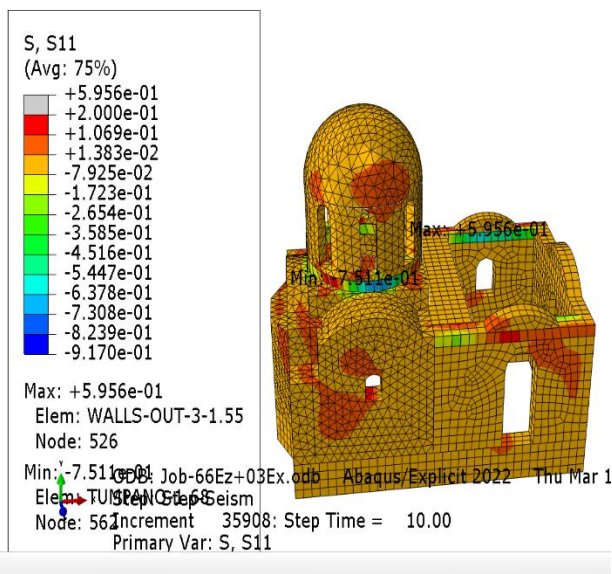
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-5 : Τάσεις, Μετακινήσεις (-Ex-0.3Ez)

7.6. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ez +0.3 Ex (“Job 66A”)



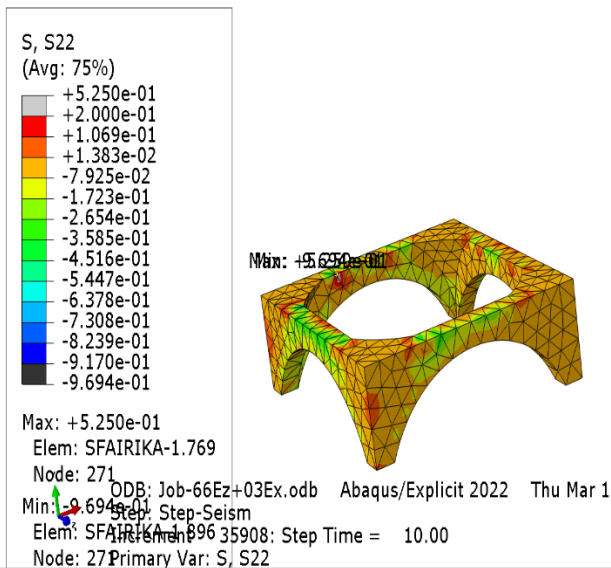
ΕΙΚΟΝΑ 7-81 : Τάσεις SMAX

ΕΙΚΟΝΑ 7-82 : Τάσεις S11 (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)

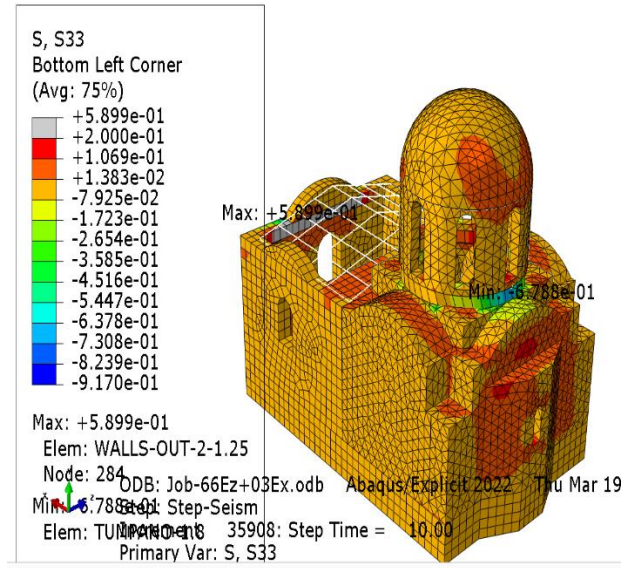


ΕΙΚΟΝΑ 7-83 : Τάσεις S11 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)

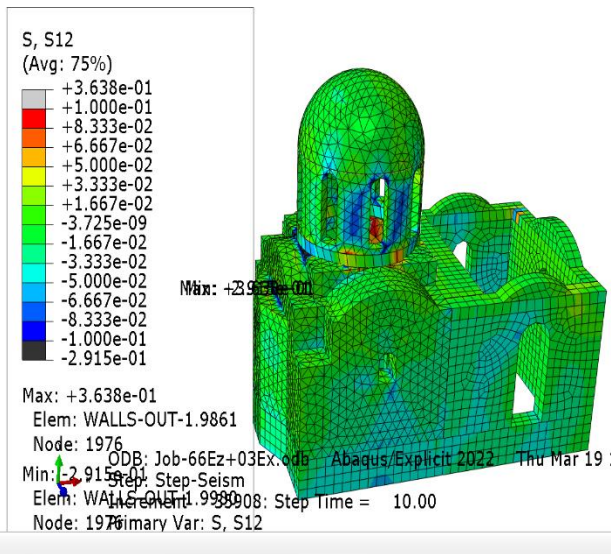
ΕΙΚΟΝΑ 7-84 : Τάσεις S22 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



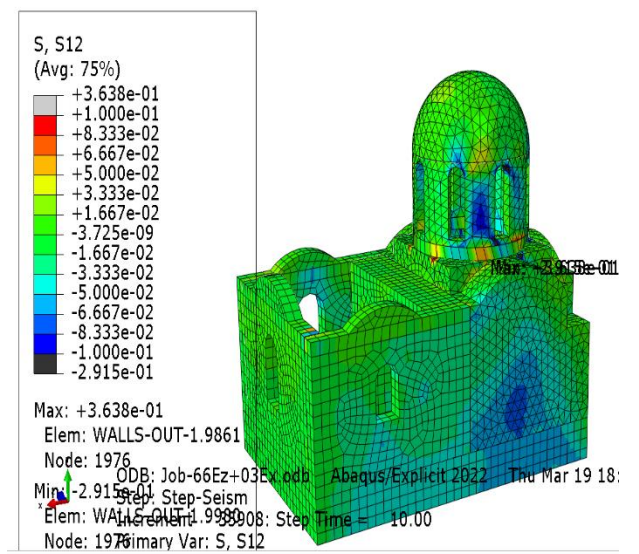
ΕΙΚΟΝΑ 7-85 : Τάσεις S22 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)



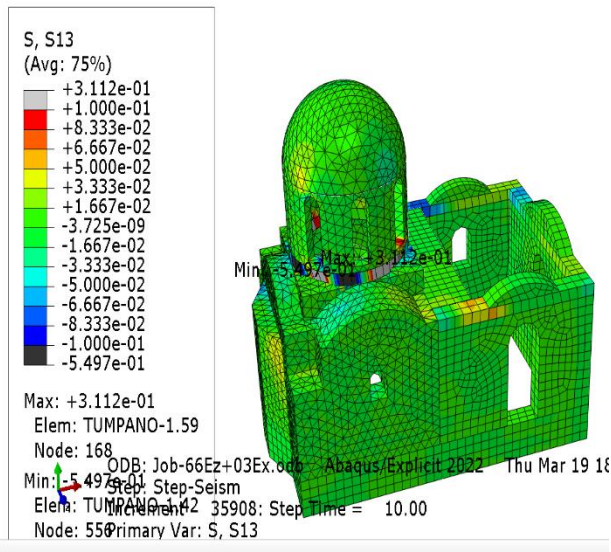
ΕΙΚΟΝΑ 7-86 : Τάσεις S33 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



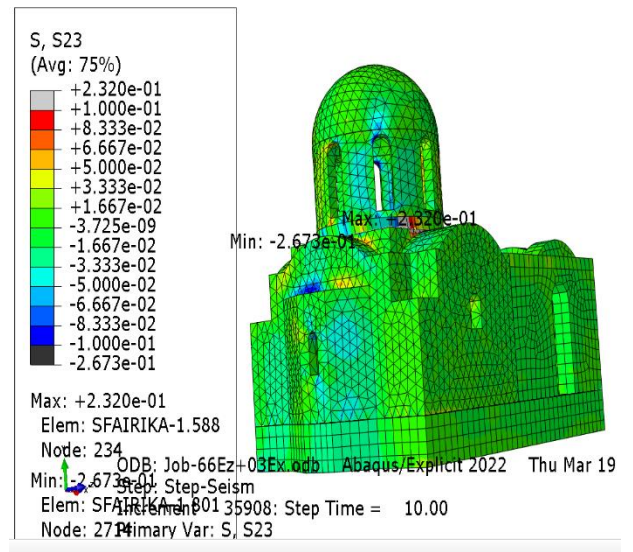
ΕΙΚΟΝΑ 7-87 : Τάσεις S12 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



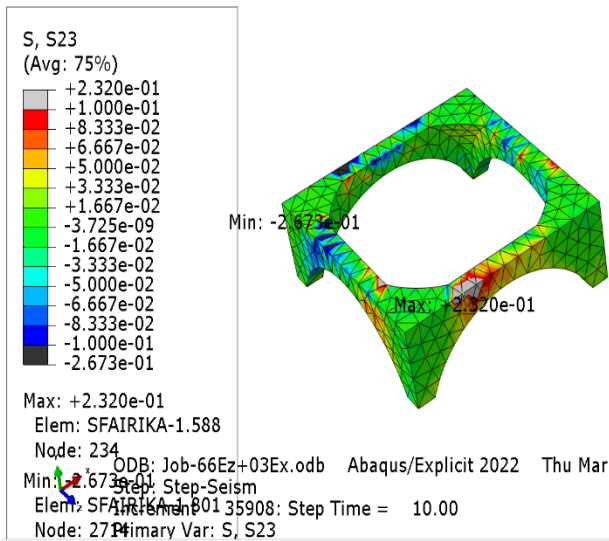
ΕΙΚΟΝΑ 7-88 : Τάσεις S12 (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



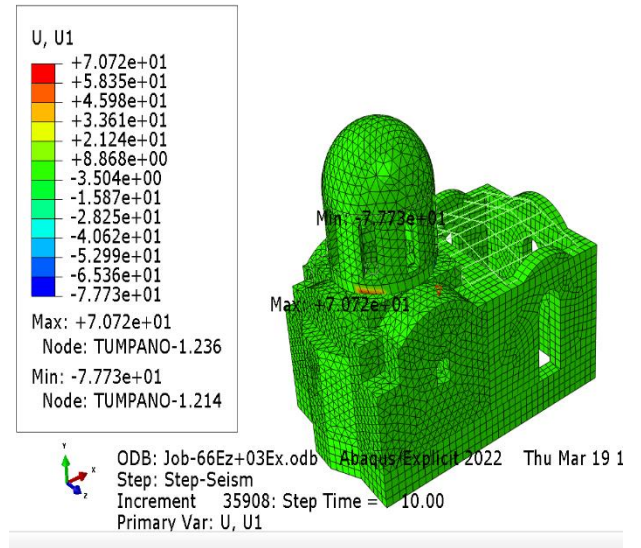
ΕΙΚΟΝΑ 7-89 : Τάσεις S13 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



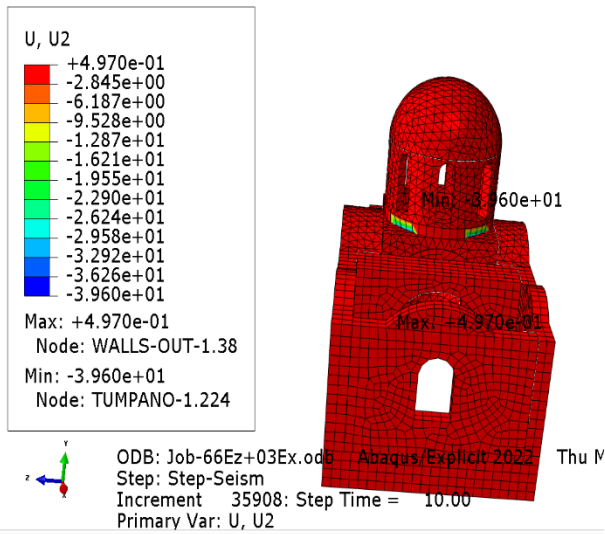
ΕΙΚΟΝΑ 7-90 : Τάσεις S23 (ΒΑ ΠΛΕΥΡΑ)



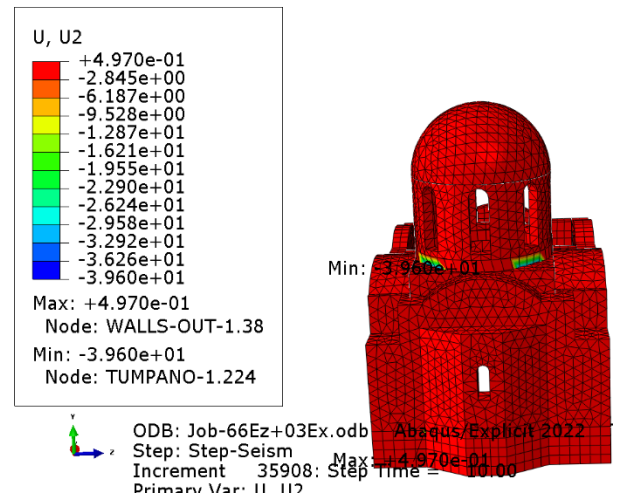
ΕΙΚΟΝΑ 7-91 : Τάσεις S13 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)



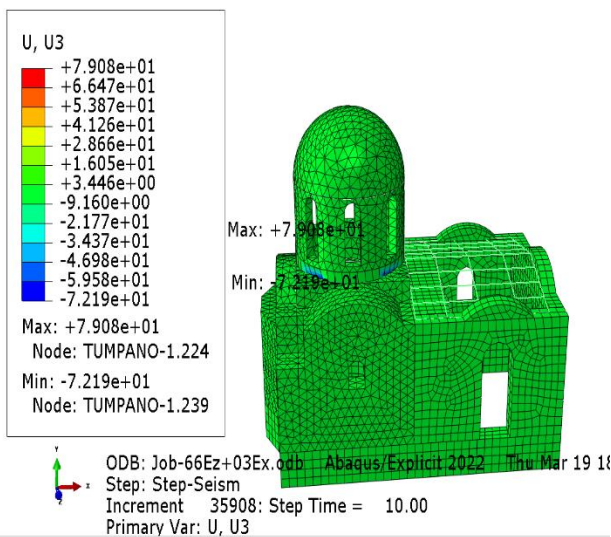
ΕΙΚΟΝΑ 7-92 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U1



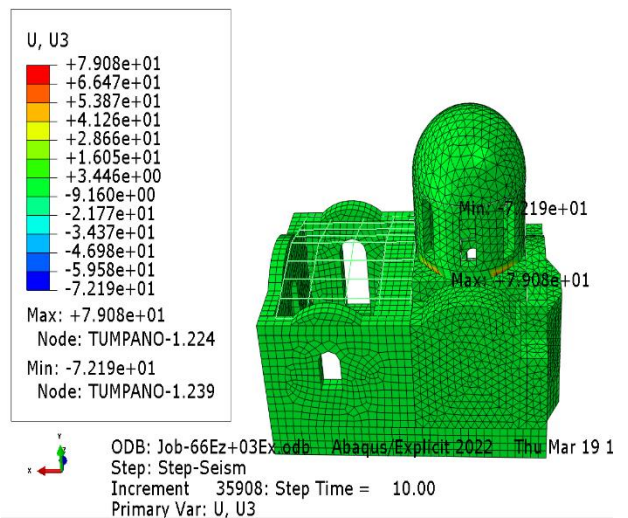
ΕΙΚΟΝΑ 7-93 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U2 (ΔΥΤΙΚΗ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-94 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U2 (ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΠΛΕΥΡΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 7-95 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U3 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



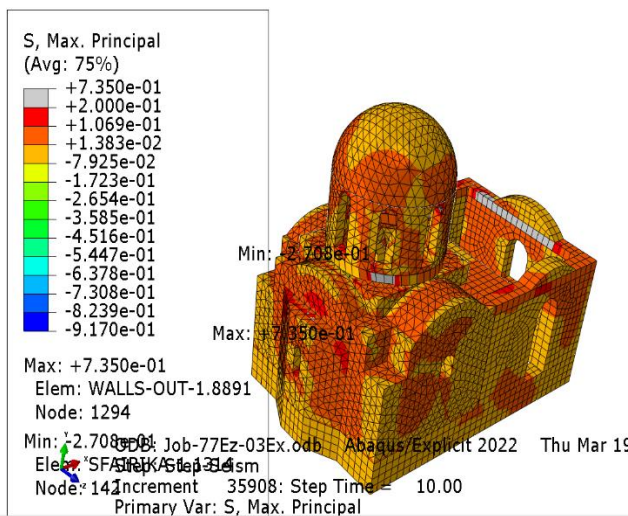
ΕΙΚΟΝΑ 7-96 : ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ U3 (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
--------------------------------------	-----------------	------------------	----------------------

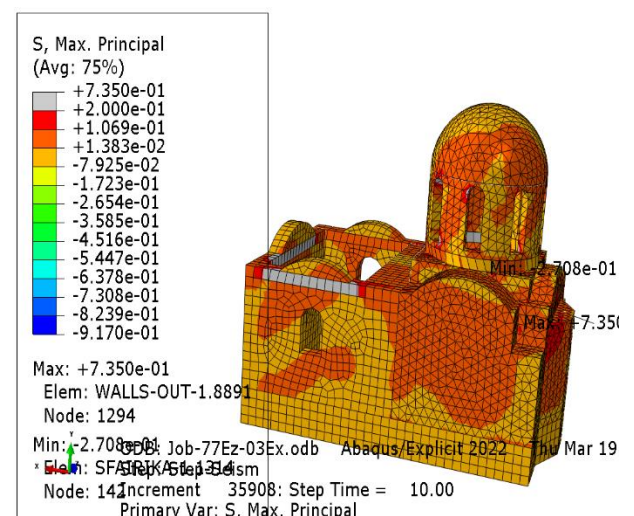
Smax	+ 0,1 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΔΙΑΖΩΜΑ, ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S11	+ 0,88 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΔΙΑΖΩΜΑ
S22	+ 0,52 > + 0,2 (Mpa)	-1,87 Mpa > -0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,6 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,72 < -0,917 Mpa	ΔΙΑΖΩΜΑ
S12	+ 0,33 > + 0,1 (Mpa) ΣΦΑΙΡΙΚΑ	-0,2 > -0,1 (Mpa) ΤΥΜΠΑΝΟ	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ
S13	+ 0,35 > + 0,1 (Mpa) ΤΥΜΠΑΝΟ	-0,31 > -0,1 (Mpa) ΣΦΑΙΡΙΚΑ	ΤΥΜΠΑΝΟ, ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S23	+ 0,38 > + 0,1 (Mpa)	-0,23 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+71 mm - 76 mm	-	ΤΥΜΠΑΝΟ
U2	+ 0,67 mm - 0,39 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ
U3	+ 80 mm - 70 mm	-	ΤΥΜΠΑΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-6 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ez +0.3 Ex)

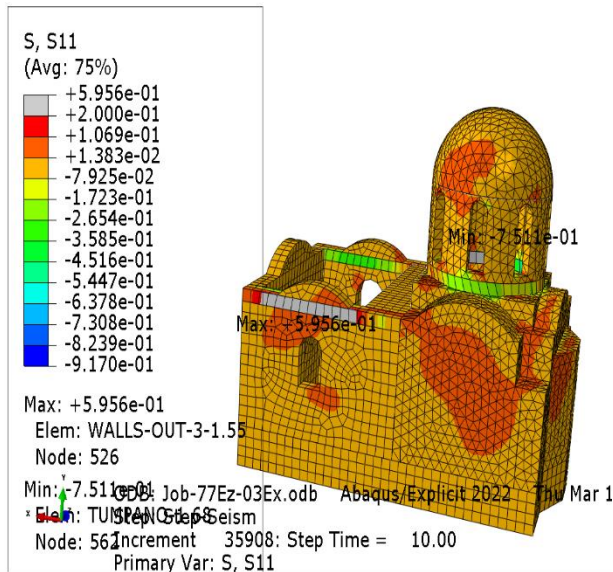
7.7. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό Ez -0.3 Ex (“Job 77a”)



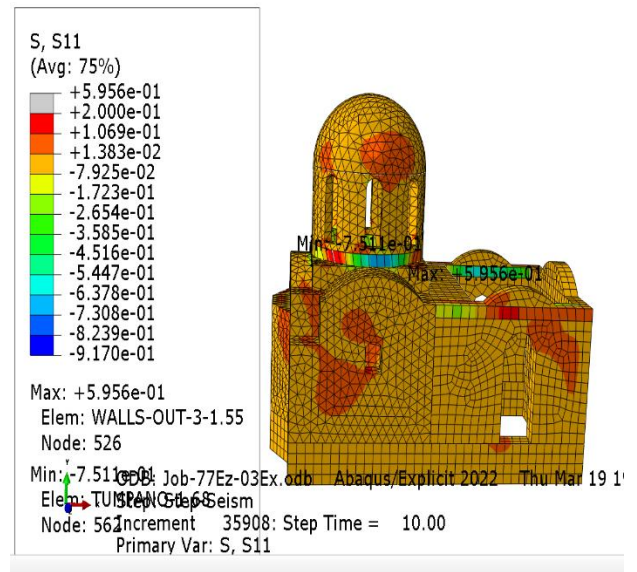
ΕΙΚΟΝΑ 7-97 : Τάσεις SMAX



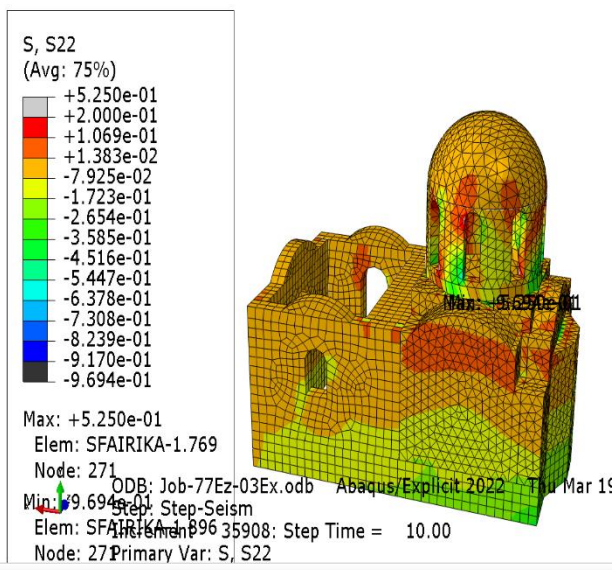
ΕΙΚΟΝΑ 7-98 : Τάσεις SMAX (ΝΑ ΠΛΕΥΡΑ)



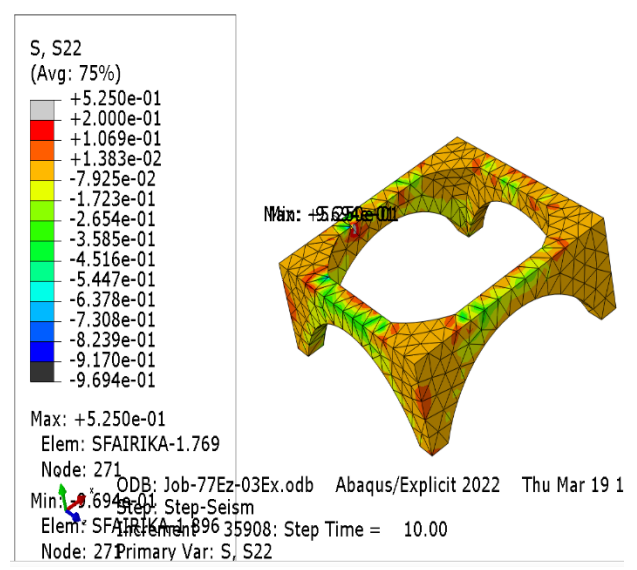
ΕΙΚΟΝΑ 7-99 : Τάσεις S11 (ΝΟΤΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



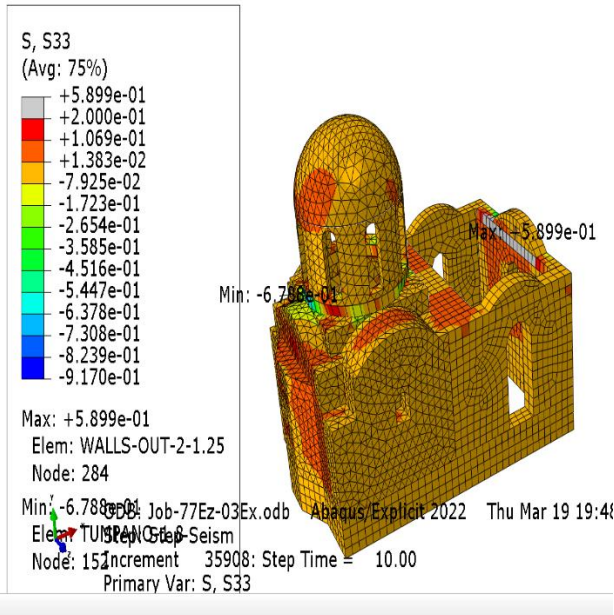
ΕΙΚΟΝΑ 7-100 : Τάσεις S11 (ΒΟΡΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑ)



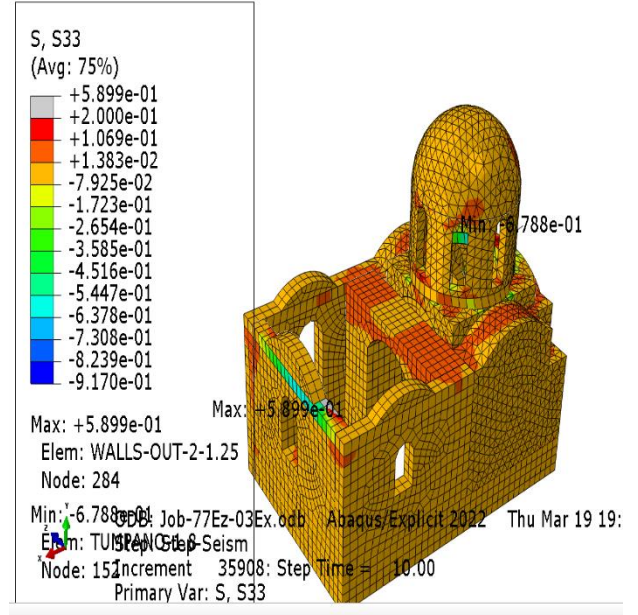
ΕΙΚΟΝΑ 7-101 : Τάσεις S22



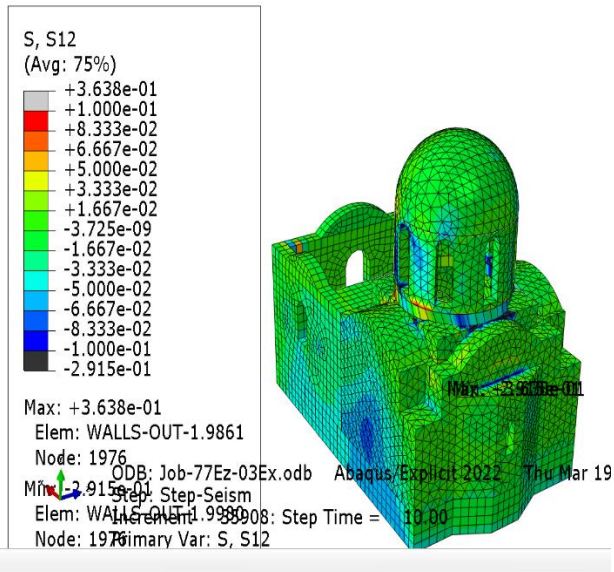
ΕΙΚΟΝΑ 7-102 : Τάσεις S22 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)



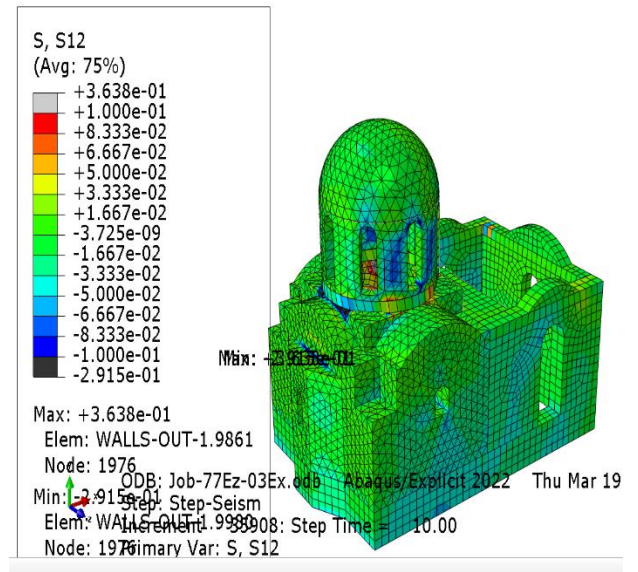
ΕΙΚΟΝΑ 7-103 : Τάσεις S33



ΕΙΚΟΝΑ 7-104 : Τάσεις S33

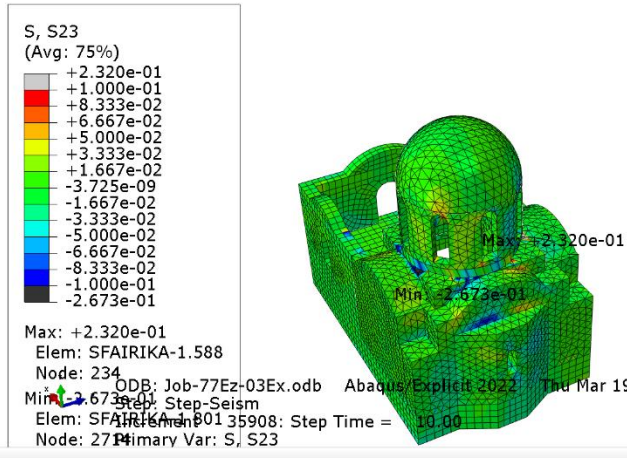


ΕΙΚΟΝΑ 7-105 : Τάσεις S12

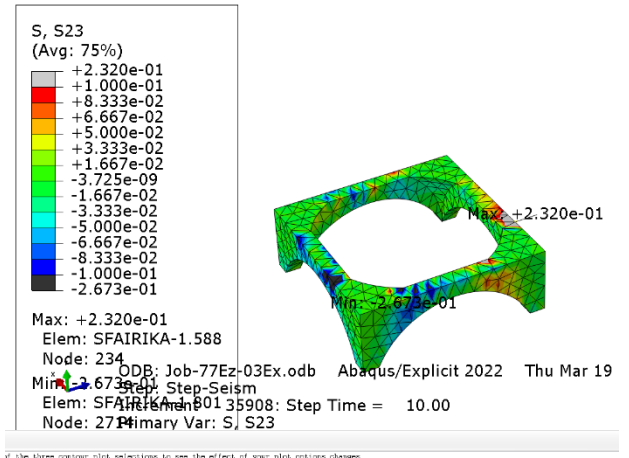


ΕΙΚΟΝΑ 7-106 : Τάσεις S12

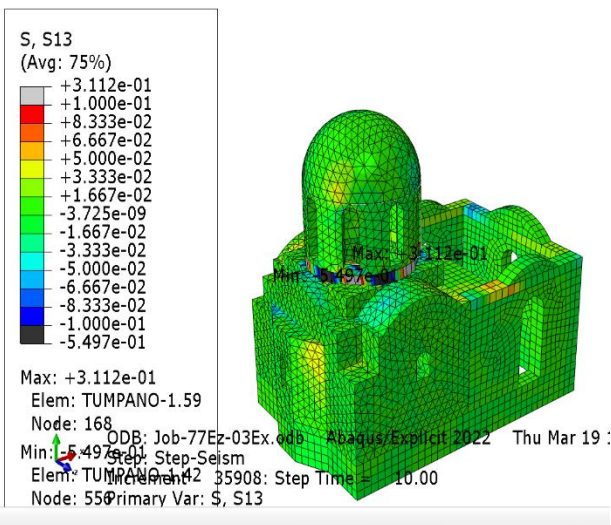
If the three contour plot selections to see the effect of your plot options changes.



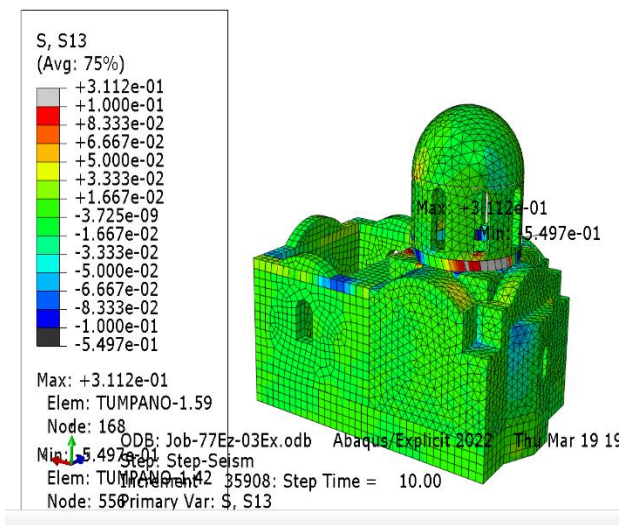
ΕΙΚΟΝΑ 7-107 : Τάσεις S23



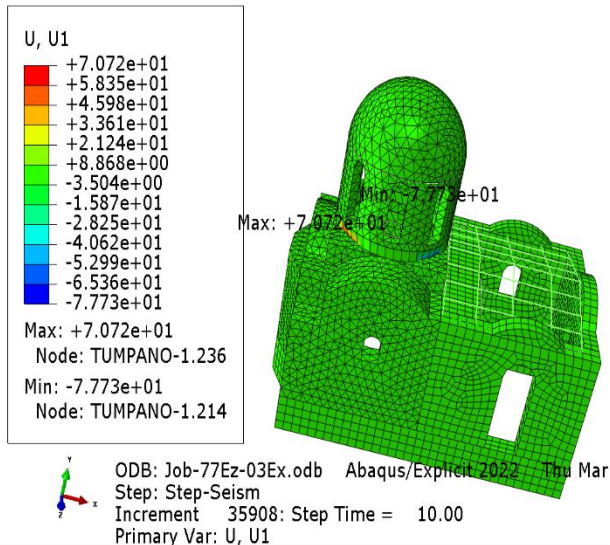
ΕΙΚΟΝΑ 7-108 : Τάσεις S23 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ)



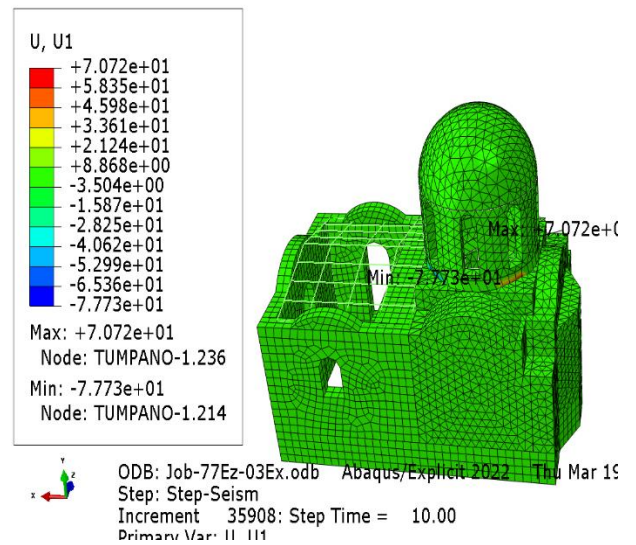
ΕΙΚΟΝΑ 7-109 : Τάσεις S13



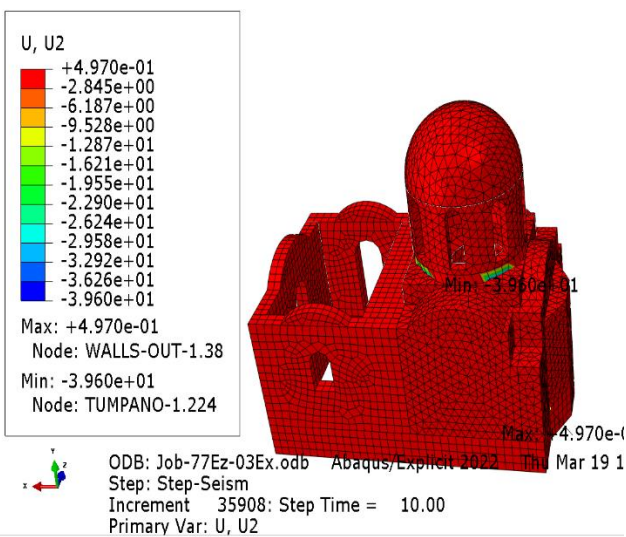
ΕΙΚΟΝΑ 7-110 : Τάσεις S13



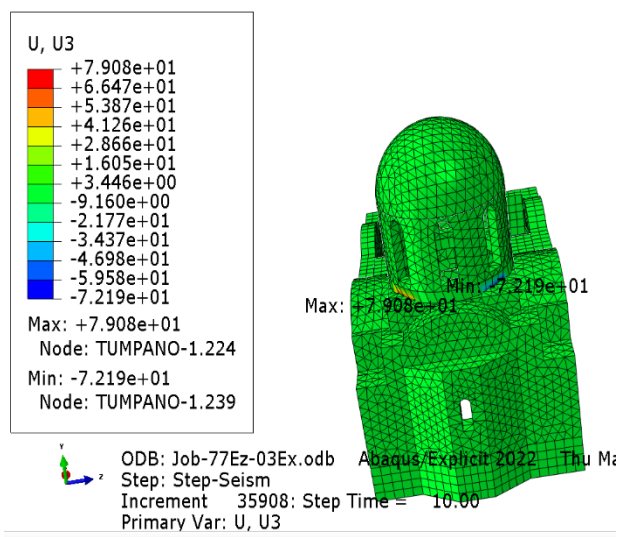
ΕΙΚΟΝΑ 7-111 : Μετακινήσεις U1



ΕΙΚΟΝΑ 7-112 : Μετακινήσεις U1



ΕΙΚΟΝΑ 7-113 : Μετακινήσεις U2



ΕΙΚΟΝΑ 7-114 : Μετακινήσεις U3

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,1 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, - 0,178 < -0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S11	+ 0,9 > + 0,2 (Mpa)	-0,96 > -0,917 Mpa	ΔΥΤΙΚΗ ΣΤΕΨΗ, ΥΜΠΑΝΟ

S22	+ 0,48 > + 0,2 (Mpa)	-0,85 Mpa < -0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ
S33	+ 0,58 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΝΑΡΘΗΚΑ
S12	+ 0,3 > + 0,1 (Mpa)	-0,178 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S13	+ 0,35 > + 0,1 (Mpa)	-0,68 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΑΝΟ
S23	+ 0,27 > + 0,1 (Mpa)	-0,56 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ, ΠΕΣΣΟΣ ΤΡΟΥΛΟΥ
U1	+ 71 mm - 77 mm	-	ΤΥΜΠΑΝΟ
U2	+ 0,59 mm - 39 mm	-	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΑΝΟ
U3	+ 78,31 mm - 73,31 mm	-	ΤΥΜΠΑΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-7 : Τάσεις, Μετακινήσεις (Ez -0.3 Ex)

7.8. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ez +0.3 Ex (“Job 88A”)

Για λόγους απλοποίησης, για τους δύο τελευταίους συνδυασμούς τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,88 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,115<-0,953/- 0,917 Mpa	ΔΥΤΙΚΟΣ, ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ, ΣΦΑΙΡΙΚΑ(MIN)
S11	+ 0,88 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,78<-0,953/- 0,917 Mpa	ΣΤΕΨΗ ΔΥΤΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ
S22	+ 0,42 > + 0,2 (Mpa)	-1,5>-0,953/-0,917 Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,41 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,77<-0,953/- 0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ, ΔΥΤΙΚΗ ΤΕΨΗ ΤΥΜΠΑΝΟ(MIN)
S12	+ 0,287 > + 0,1 (Mpa)	-0,245 > -0,1 (Mpa)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ
S13	+ 0,34 > + 0,1 (Mpa)	-0,69 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΑΝΟ
S23	+ 0,31 > + 0,1 (Mpa)	-0,197 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 71 mm - 77 mm	-	ΤΥΜΠΑΝΟ
U2	+ 61 mm - 39 mm	-	ΤΥΜΠΑΝΟ

U3	+ 80 mm - 70 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
-----------	--------------------	---	----------

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-8 : Τάσεις, Μετακινήσεις (-Ez +0.3 Ex)
7.9. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό -Ez -0.3 Ex (“Job 99A”)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,94 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,22 < -0,953 / - 0,917 Mpa	ΔΥΤΙΚΟΣ, ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ, ΣΦΑΙΡΙΚΑ (MIN)
S11	+ 0,94 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,88 < -0,953 / - 0,917 Mpa	ΝΟΤΙΟΣ ΤΟΙΧΟΣ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S22	+ 0,53 > + 0,2 (Mpa)	-0,96 > -0,953 / - 0,917 Mpa Mpa	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
S33	+ 0,42 > + 0,2 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, -0,78 < -0,953 / - 0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΙΕΡΟΥ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ (MIN)
S12	+ 0,25 > + 0,1 (Mpa)	-0,22 > -0,1 (Mpa)	ΕΞΩΤΕΡ. ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΤΥΜΠΙΑΝΟ (MIN)
S13	+ 0,34 > + 0,1 (Mpa)	-0,69 > -0,1 (Mpa)	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
S23	+ 0,31 > + 0,1 (Mpa)	-0,47 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 71 mm - 77 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U2	+ 0,52 mm - 39,5 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ
U3	+ 78 mm - 73 mm	-	ΤΥΜΠΙΑΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-9 : Τάσεις, Μετακινήσεις (-Ez +0.3 Ex)
7.10. Συμπεράσματα ελέγχων

- Από τα ως άνω αποτελέσματα προκύπτει ότι πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω μέτρα ενίσχυσης που θα αφορούν κυρίως την περιοχή του τυμπάνου και των σφαιρικών τριγώνων του ναού.
- Για τον νάρθηκα οι εναπομένουσες τάσεις συγκεντρώνονται στο σημείο τομής του σενάζ με το ανώτερο επίπεδο της τοιχοποιίας του νάρθηκα γεγονός που αποδεικνύει ότι το σενάζ

«δουλεύει» αφού αναπτύσσει τάσεις οι οποίες δεν υπερβαίνουν τα εφελκυστικά όρια του σκυροδέματος.

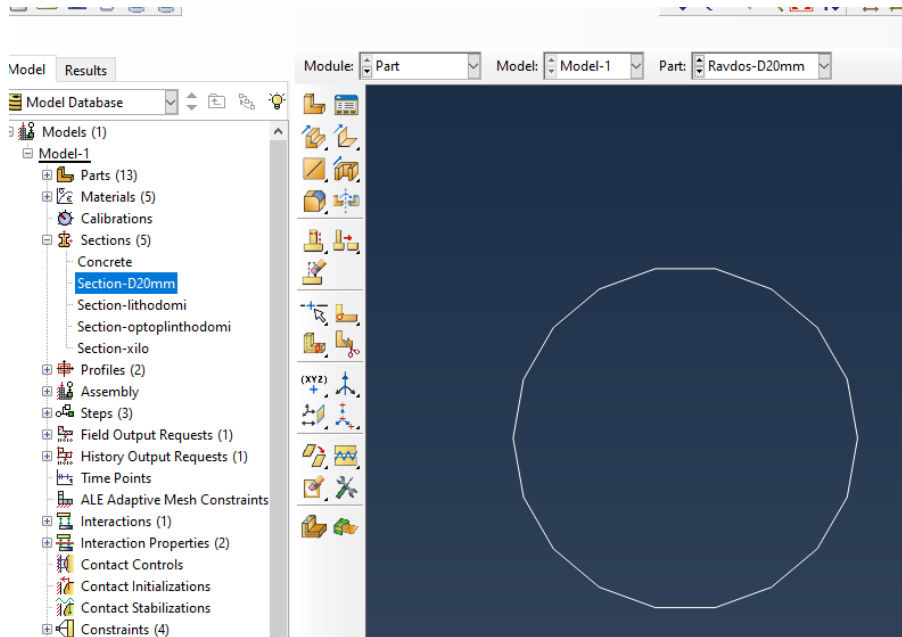
- Παρατηρούνται συστηματικά συγκεντρώσεις διατμητικών τάσεων S23 στην κορυφή της κόγχης του ιερού.
- Παρατηρούνται διατμητικές αστοχίες S23 στα σφαιρικά τρίγωνα (job22,job44)
- Παρατηρούνται εφελκυστικές αστοχίες S33 στο εσωτερικό τόξο και την κόγχη (job22,job44)
- Παρατηρούμε αστοχία και στον πεσσό του τρούλου S23 = -0,56 (job77)
- Παρατηρούμε αστοχία και στο εσωτερικό τόξο και στην κόγχη (job33)
- Η τοιχοποιία φαίνεται να μην υπερβαίνει τις εφελκυστικές της αντοχές και μάλιστα μειώθηκαν οι τιμές της μετά τις επεμβάσεις του 1936

8 Προτεινόμενες μέθοδοι αποκατάστασης μετά το σεισμό της Θεσσαλονίκης του 1978

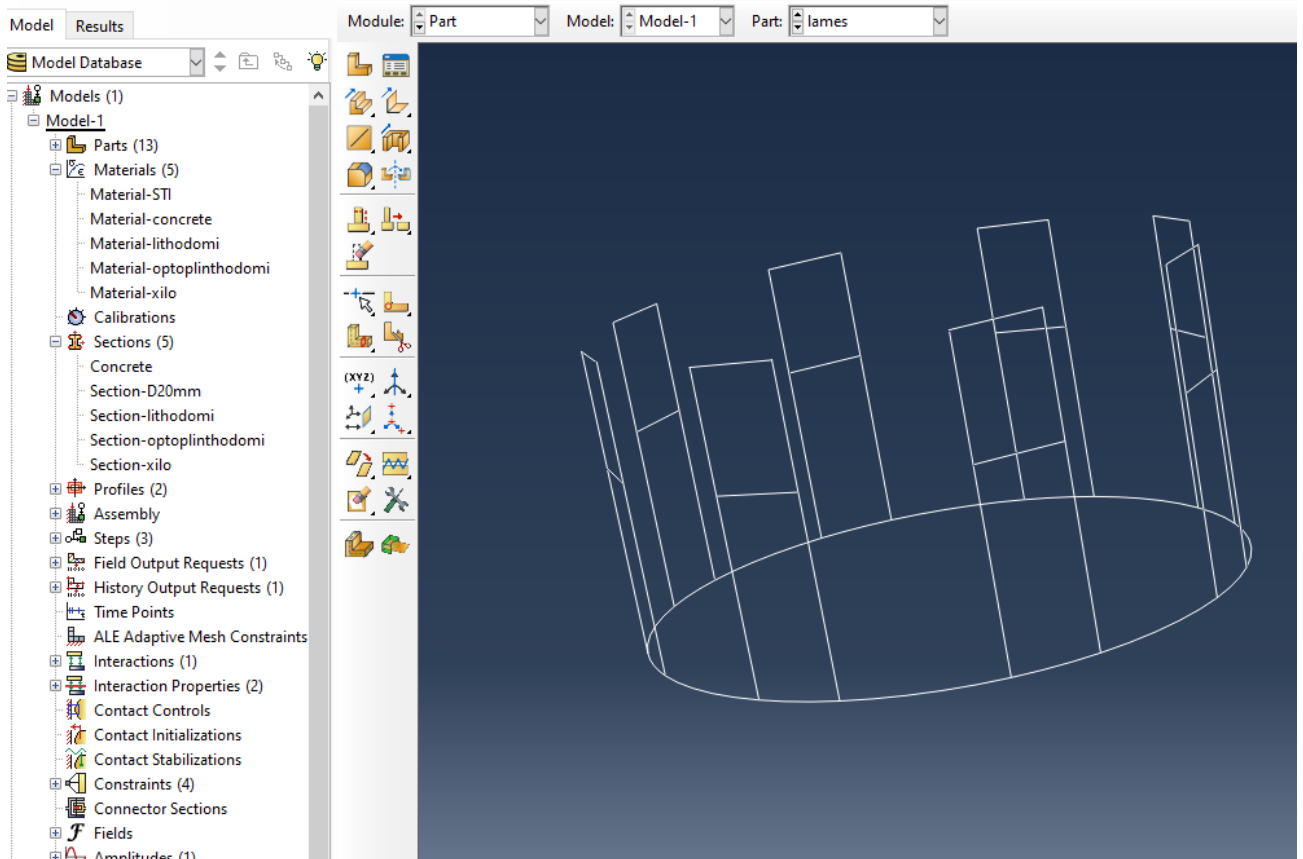
Για την αποκατάσταση των παραπάνω βλαβών και αστοχιών προτάθηκαν τα εξής:

- α) Τοποθέτηση μεταλλικού δακτυλίου στη βάση του τρούλλου με παράλληλη ενίσχυση του αρμολογήματος εξωτερικά
- β) Υποστύλωση των διατηρητέων τόξων με μεταλλικά πλαίσια λάμας κατάλληλης διατομής
- γ) Τοποθέτηση ελκυστήρων στα τόξα

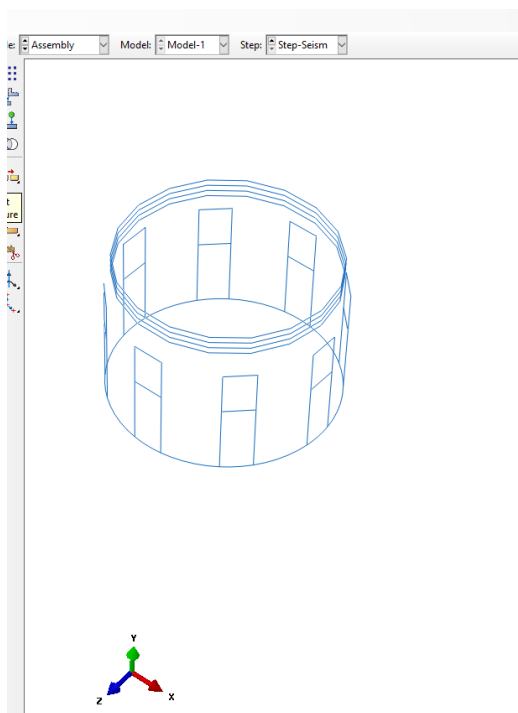
Τα παραπάνω μέτρα λαμβάνουν σημαντικά υπόψη τους την μορφολογία του ναού και προτείνονται στα πλαίσια των μικρότερων δυνατών επεμβάσεων ώστε να μην αλλοιωθεί το ύψος και ο χαρακτήρας του ναού. Επιπλέον θα πρέπει να γίνουν διερευνητικές τομές και να ληφθούν δοκίμια ώστε να επαληθευθούν οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά των υλικών που λαμβάνονται υπόψη κατά την επίλυση του μοντέλου. Ακολουθούν σκαριφηματικά σχέδια για τις παραπάνω προτάσεις. Τα νέα parts που δημιουργήθηκαν για το ενισχυμένο μοντέλο είναι: οι 4 ράβδοι με διάμετρο $d = 20\text{mm}$ οι οποίοι περιβάλλανε την βάση του τρούλλου “Ravdos-D20mm” και οι λάμες ενίσχυσης των ανοιγμάτων του τρούλλου με το όνομα “Lames”. Παρατίθενται οι ιδιότητες, η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά αυτών. Η ποιότητα χάλυβα είναι StI.



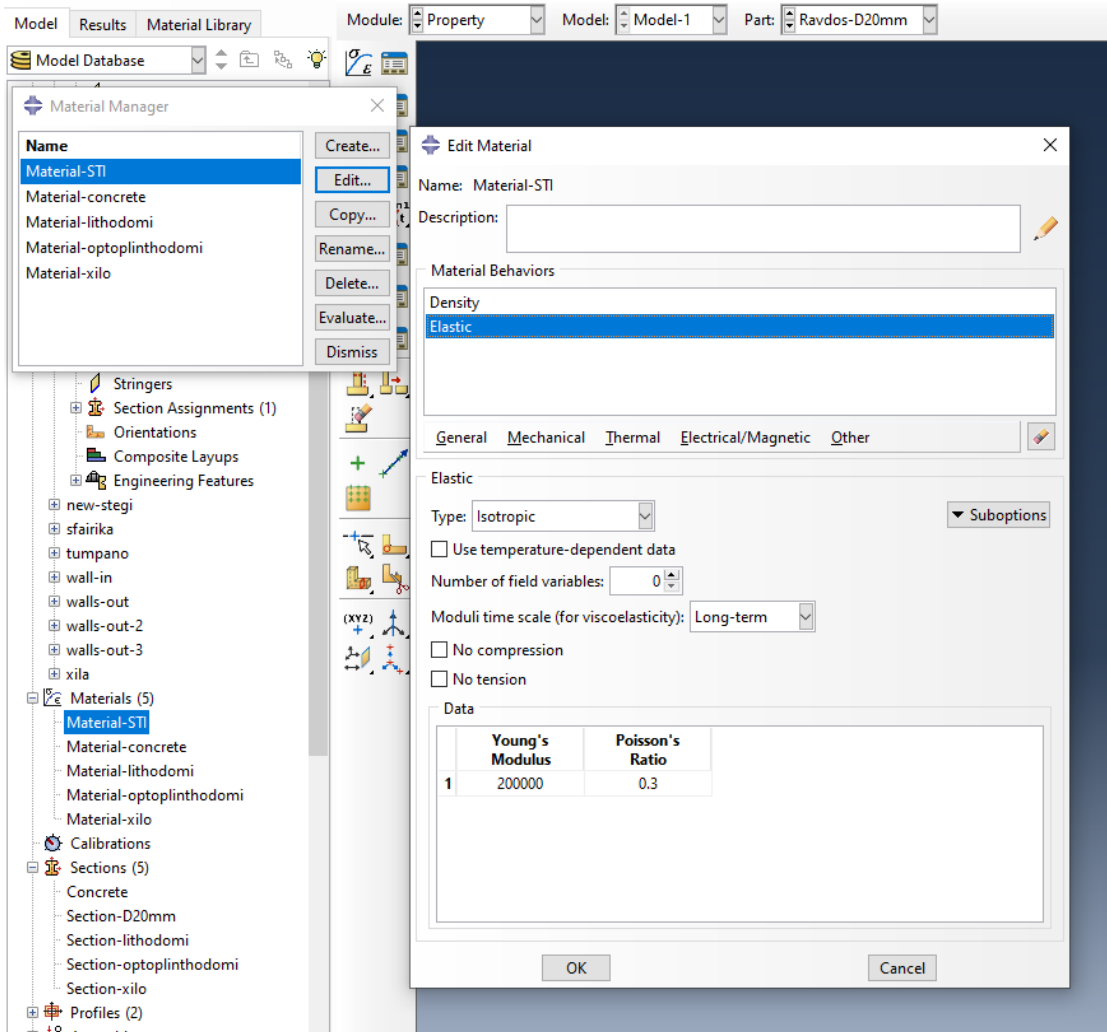
ΕΙΚΟΝΑ 8-1 : PART: “Ravdos-D20mm”



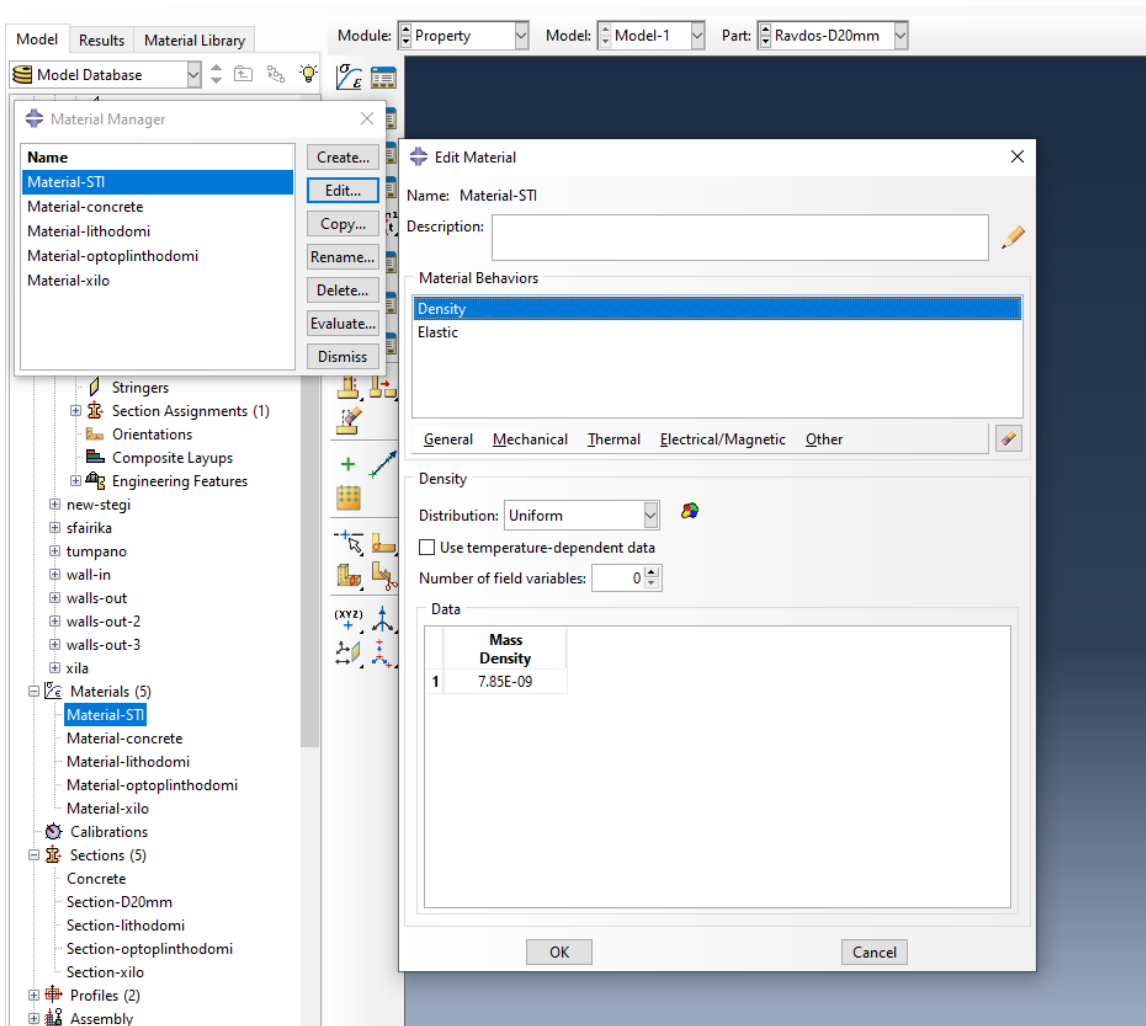
ΕΙΚΟΝΑ 8-2 : PART: “Lames”



ΕΙΚΟΝΑ 8-3 : PART: “Lames”, “Ravdoi-D20mm”



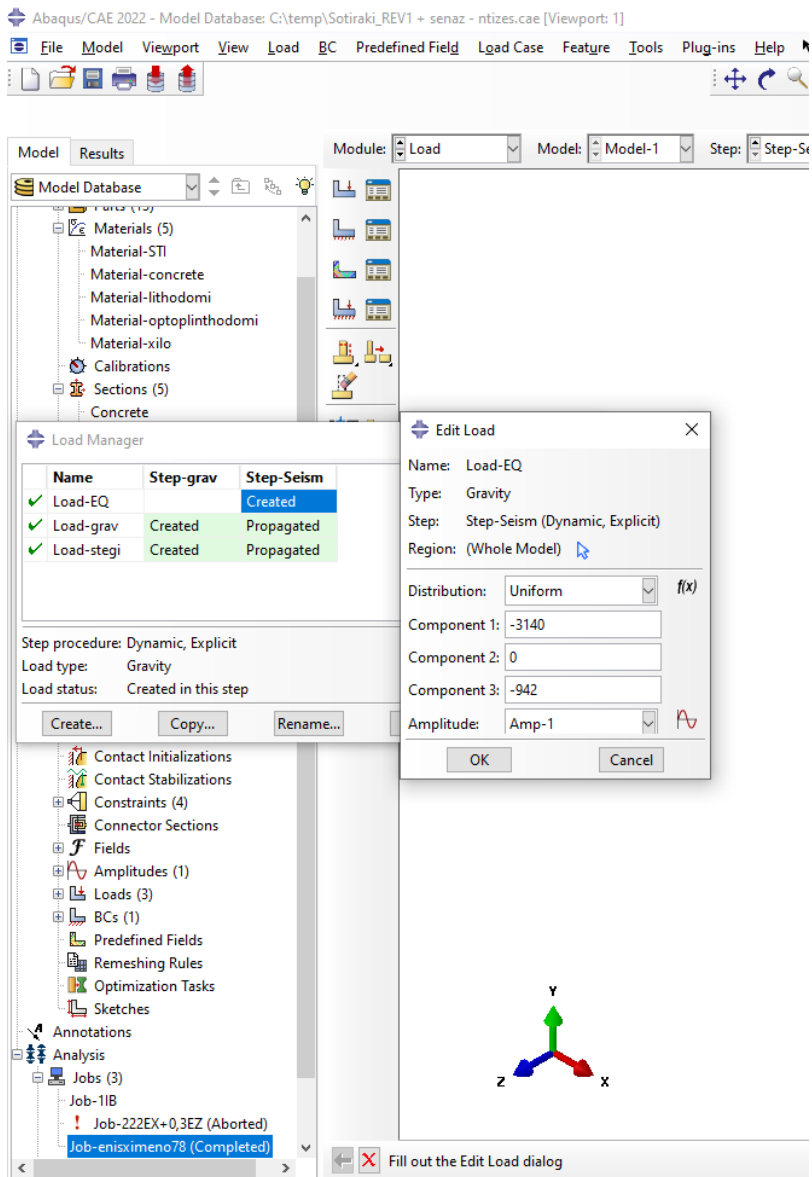
ΕΙΚΟΝΑ 8-4 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ “material-STI”



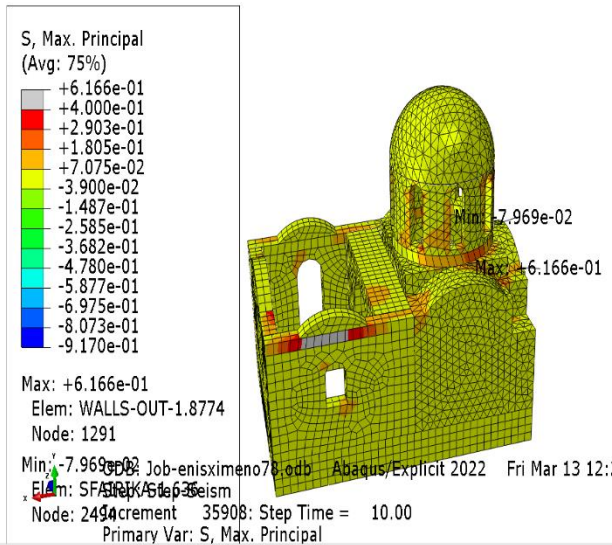
ΕΙΚΟΝΑ 8-5 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ “material-St1”

8.1. Αποτελέσματα τάσεων, βυθίσεων για το συνδυασμό $E_z + 0.3 E_x$ (Job “enisximeno78”)

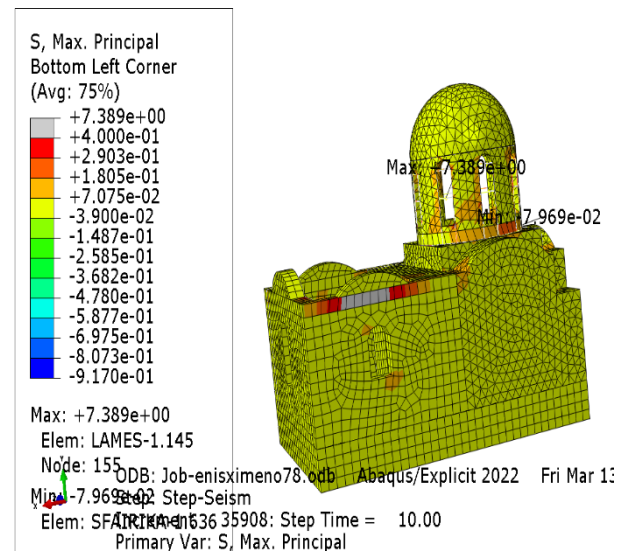
Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα και πίνακα για τον δυσμενέστερο σεισμικό συνδυασμό.



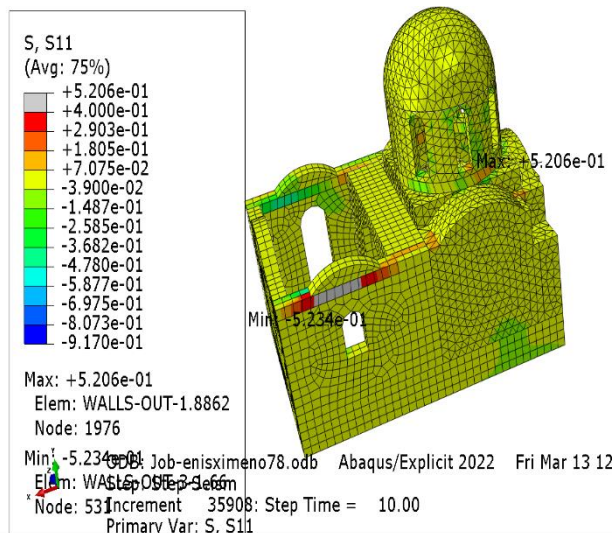
ΕΙΚΟΝΑ 8-6 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ “material-StI”



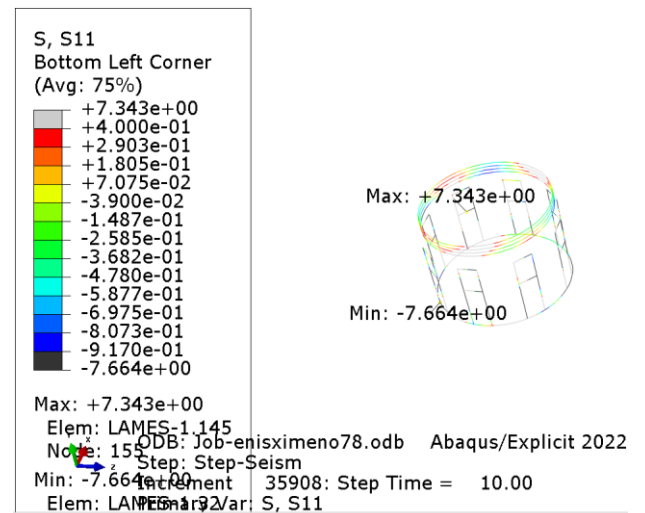
ΕΙΚΟΝΑ 8-7 : Τάσεις Smax (ΧΩΡΙΣ ΤΙΣ ΛΑΜΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΡΑΒΔΟΥΣ)



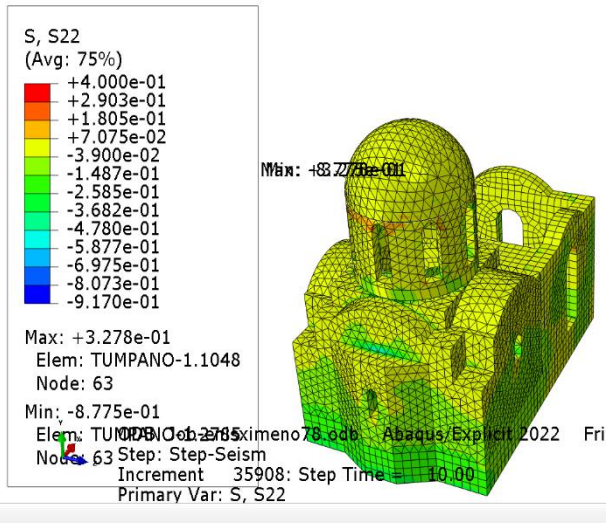
ΕΙΚΟΝΑ 8-8 : Τάσεις Smax (ΜΕ ΛΑΜΕΣ)



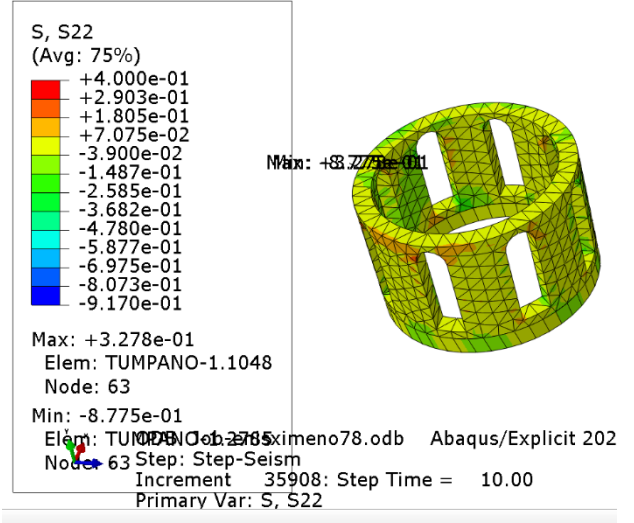
ΕΙΚΟΝΑ 8-9 : Τάσεις S11



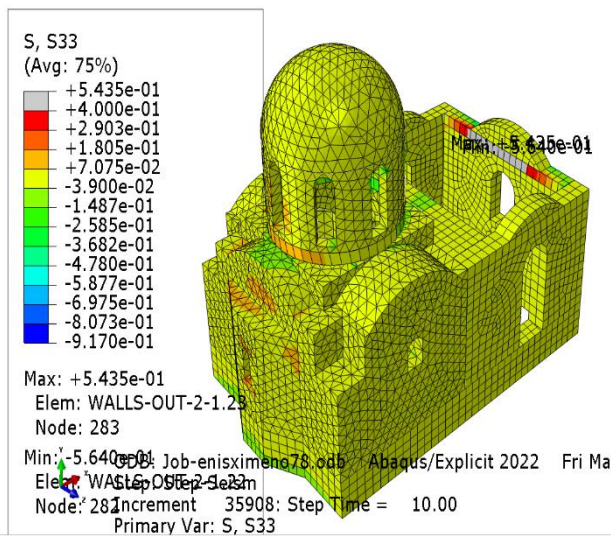
ΕΙΚΟΝΑ 8-10 : Τάσεις S11 (ΛΑΜΕΣ, ΡΑΒΔΟΙ)



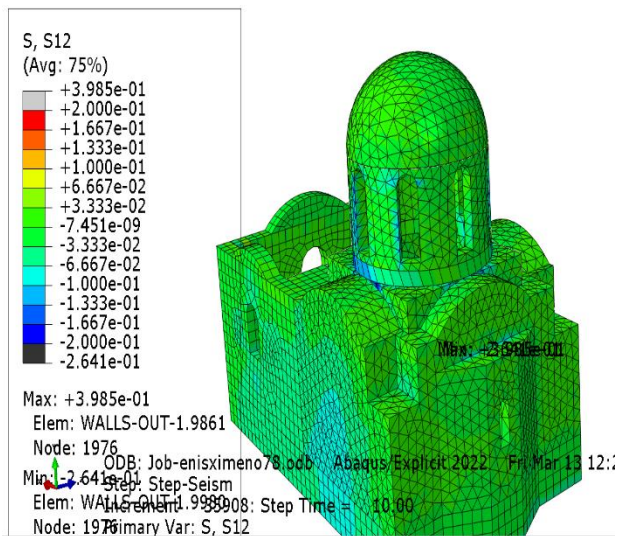
ΕΙΚΟΝΑ 8-11 : Τάσεις S22



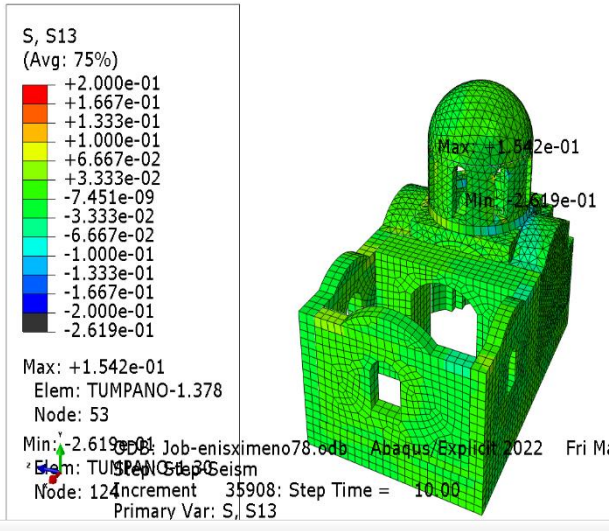
ΕΙΚΟΝΑ 8-12 : Τάσεις S22 (ΤΥΜΠΙΑΝΟ)



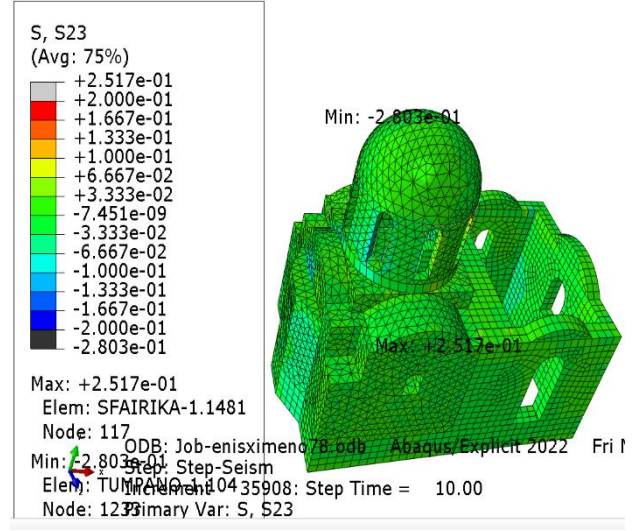
ΕΙΚΟΝΑ 8-11 : Τάσεις S33



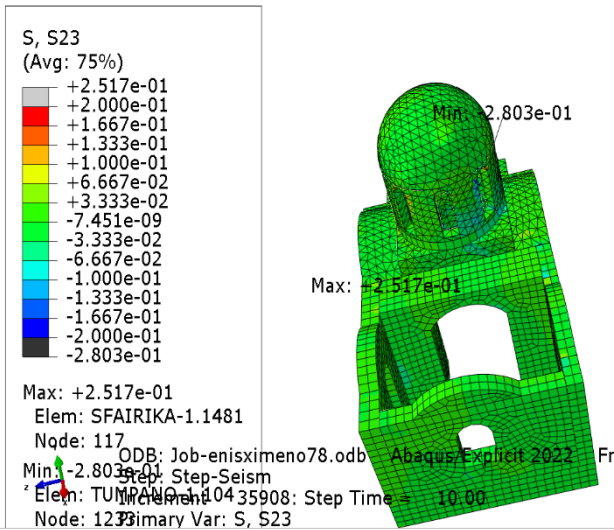
ΕΙΚΟΝΑ 8-12 : Τάσεις S12



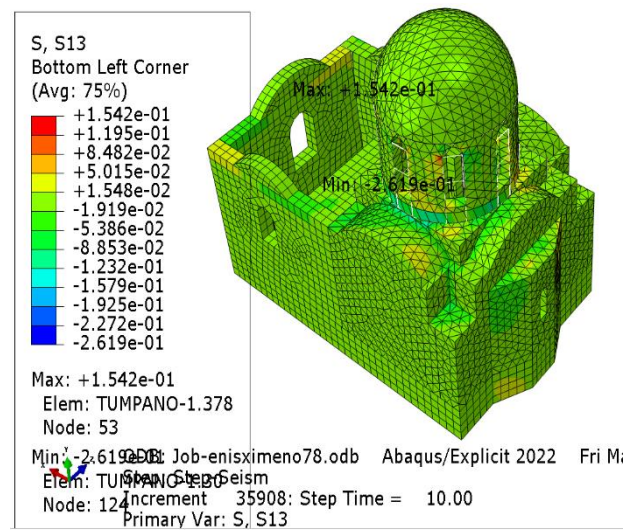
ΕΙΚΟΝΑ 8-13 : Τάσεις S12



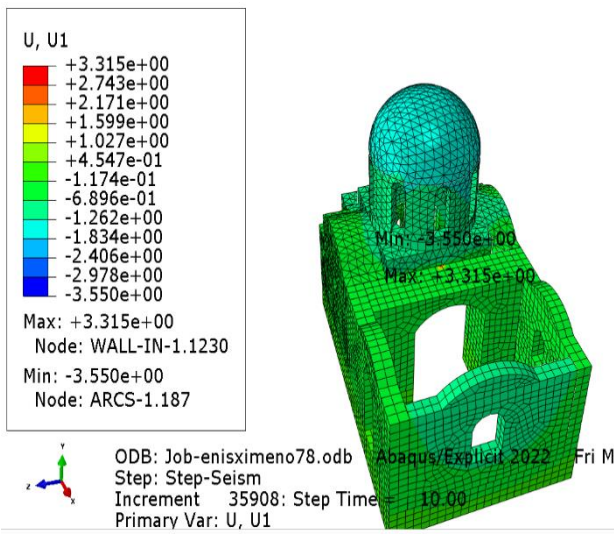
ΕΙΚΟΝΑ 8-14 : Τάσεις S23



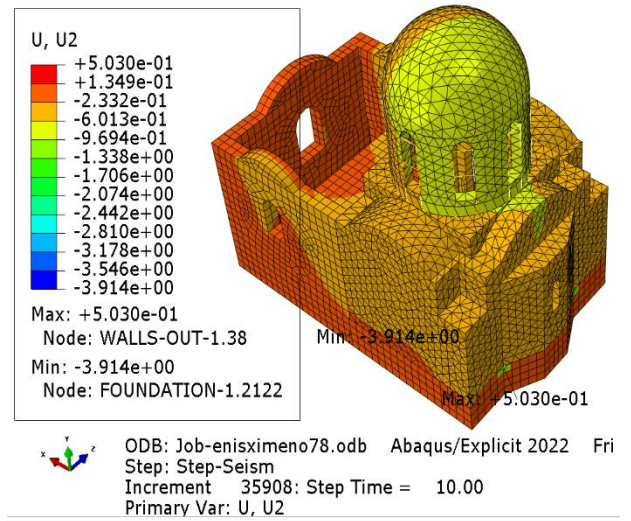
ΕΙΚΟΝΑ 8-15 : Τάσεις S23



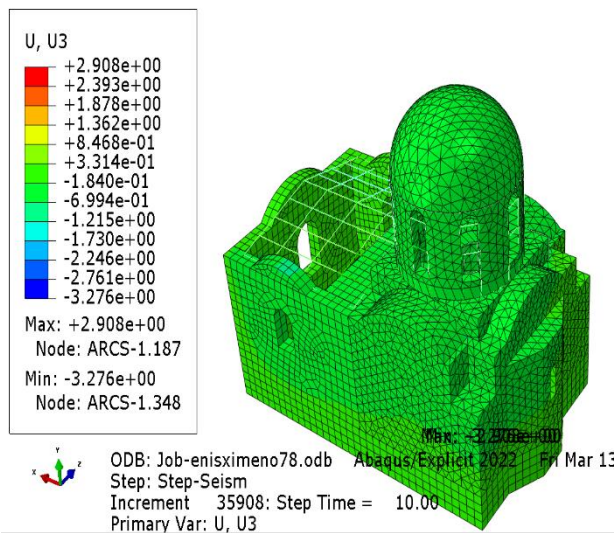
ΕΙΚΟΝΑ 8-14 : Τάσεις S13



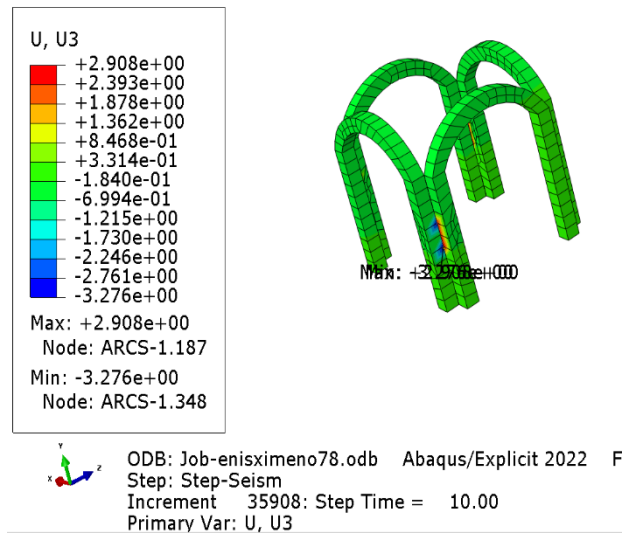
ΕΙΚΟΝΑ 8-15 : Μετακινήσεις U1



ΕΙΚΟΝΑ 8-16 : Μετακινήσεις U2



ΕΙΚΟΝΑ 8-17 : Μετακινήσεις U3



ΕΙΚΟΝΑ 8-18 : Μετακινήσεις U3 (ΤΟΞΑ)

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Smax	+ 0,62 > + 0,4 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S11	+ 0,52 > + 0,4 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΝΑΡΘΗΚΑ
S22	+ 0,33 < + 0,4 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S33	+ 0,54 > + 0,4 (Mpa)	Χωρίς υπέρβαση, <-0,917 Mpa	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S12	+ 0,39 > + 0,2 (Mpa)	-0,26 > -0,2 (Mpa)	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ
S13	+ 0,15 < + 0,2 (Mpa)	-0,26 > -0,2 (Mpa)	ΤΥΜΠΑΝΟ
S23	+ 0,23 > + 0,1 (Mpa)	-0,27 > -0,1 (Mpa)	ΣΦΑΙΡΙΚΑ
U1	+ 3,31 mm - 3,55 mm	-	ΤΟΞΑ
U2	+ 0,5 mm - 3,9 mm	-	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ, ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ
U3	+ 2,9 mm - 3,27 mm	-	ΤΟΞΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 8-1 : Τάσεις, Μετακινήσεις (+Ex +0,3 Ez)

- Όπως προκύπτει, υπάρχει σαφής βελτίωση στις μεγάλες μετακινήσεις και τάσεις που υπήρχαν στην περιοχή του τυμπάνου.
- Η σύγκριση της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων και των λαμών γίνεται με την τιμή 200 Mpa και προφανώς δεν υπερβαίνεται. Για αυτόν τον λόγο στα αποτελέσματα παρουσιάζεται μόνον ο φέρον οργανισμός.
- Η σύγκριση των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων γίνεται πλέον με τη τιμή 0,4 Mpa μια και στην αρμολόγηση έχει χρησιμοποιηθεί πλέον και τσιμεντοκονίαμα. Τέλος για τον ίδιο λόγο οι διατμητικές τάσεις συγκρίνονται με την τιμή της αντοχής 0,2 Mpa.
- Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα η εικόνα του τυμπάνου και των σφαιρικών έχει διορθωθεί πλήρως μια και δεν υπάρχει υπέρβαση τάσεων πια. Οι μετακινήσεις είναι ελάχιστες και εντός των αποδεκτών ορίων.
- Οι παραμένουσες υπερβάσεις τάσεων έχουν να κάνουν με συγκεκριμένα τμήματα της τοιχοποιίας του ιερού και του νάρθηκα που εξηγούνται στην παρ. 8.10

- Οι τάσεις που αναπτύσσονται στα νέα γραμμικά μεταλλικά στοιχεία (λάμες, ράβδοι) αποδεικνύουν ότι το παρόν σύστημα ενίσχυσης «δουλεύει». Οι τάσεις αυτές προφανώς και δεν είναι σημαντικές σε σχέση με μία τυπικά αντοχή 200Μpa που έχει ένα μεταλλικό στοιχείο.
- Στο πεσσό του τρούλου βελτιώνεται το εντατικό πεδίο.

9 Συμπεράσματα – Προτάσεις αποκατάστασης

- Συμπερασματικά οι εργασίες που υλοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική ήταν οι εξής:
- Διερευνήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS ο ιερός ναός του Σωτήρος, όπου προσομοιώθηκε στον χώρο η γεωμετρία και τα υλικά του ναού.
- Έλαβαν χώρα οι αναλύσεις για σεισμική διέγερση του μνημείου στην αρχική του μορφή χωρίς δηλαδή καμία επέμβαση ενισχύσεων.
- Ακολουθήσαν η επίλυση και οι αναλύσεις για το μνημείο θέτοντας στο μοντέλο τις απαιτούμενες χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών καθώς και τις ενισχύσεις, ήτοι δέσιμο του τρούλλου στη βάση του με beton, περιμετρικό σενάζ στην περιοχή του νάρθηκα, που προέκυψαν μετά από τις επεμβάσεις στο μνημείο περί το 1936 .
- Εν συνεχεία επιλύθηκε για σεισμική διέγερση το μοντέλο του ναού με τις επεμβάσεις που έλαβαν χώρα μετά τον σεισμό του 1978.
- Μετά την συλλογή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα διαγράμματα τάσεων και μετακινήσεων έγινε η πρόταση πρόσθετων ενισχύσεων μετά την σεισμική αποτίμηση και των επεμβάσεων που έλαβαν χώρα περί το 1981.
- Μετά από την ανάλυση του μοντέλου του μνημείου χωρίς επεμβάσεις (κεφάλαιο 6) πιστοποιήθηκαν και ποσοτικοποιήθηκαν οι ανεπάρκειες από τις οποίες προέκυψε ότι η μεγαλύτερη καταπόνηση σε όρους τάσεων και μετακινήσεων συμβαίνει στον τρούλλο (τύμπανο, τρούλλος, σφαιρικά) και στην περιοχή του νάρθηκα στην στέψη της τοιχοποιίας.
- Ο ναός μετά τις ενισχύσεις του 1936 (κεφάλαιο 7) παρουσίασε βελτιώσεις κάνοντας απαραίτητη όμως τη διερεύνηση περαιτέρω επεμβάσεων που θα αφορούσαν κυρίως την

περιοχή του τυμπάνου και των σφαιρικών τριγώνων του ναού.

- Τα σενάζ – διαζώματα σκυροδέματος βελτίωσαν αισθητά τη σεισμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας. Ωστόσο εντοπίστηκαν και πάλι κάποιες αστοχίες στα σφαιρικά τρίγωνα και στου πεσσούς του τρούλου.
- Στο κεφάλαιο 8 έλαβε χώρα η πρόταση και η ανάλυση περαιτέρω επεμβάσεων με χρήση μεταλλικών στοιχείων στην περιοχή του τυμπάνου με σκοπό την αύξηση της φέρουσας ικανότητας της περιοχής του τρούλλου
- Από τις αναλύσεις παρατηρούμε ότι τα μεταλλικά στοιχεία συμμετέχουν στην απόκριση του φορέα και η εικόνα βελτιώθηκε εμφανώς μειώνοντας το εντατικό πεδίο
- Ως πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να διερευνηθεί η επιρροή του εδάφους και της θεμελίωσης του φορέα στην απόκριση υπό σεισμική διέγερση. Προτείνεται λοιπόν η εκτέλεση ερευνητικών τομών εδάφους και η λήψη δειγμάτων υλικού της θεμελίωσης του φορέα καθώς και η εξακρίβωση της γεωμετρίας της θεμελίωσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Ευρωκώδικας 0 : Βάσεις σχεδιασμού δομημάτων, EN 1990.
- [2] Ευρωκώδικας 1: Δράσεις σε δομήματα - Μέρος 1-1: Γενικές δράσεις - Πυκνότητες, ίδια βάρη και επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια, EN 1991-1-1, ΕΛΟΤ EN 1991-1- 1: .2002/NA:2010.
- [3] Ευρωκώδικας 1: Δράσεις σε δομήματα - Μέρος 1-3: Γενικές δράσεις - Φορτία χιονιού, .EN 1991-1-3, ΕΛΟΤ EN 1991-1-3: 2003/NA: 2010.
- [4] Ευρωκώδικας 1: Δράσεις σε δομήματα - Μέρος 1-4: Γενικές δράσεις - Δράσεις ανέμου, EN 1991-1-4, ΕΛΟΤ EN 1991-1-4: 2005/NA: 2010.
- [5] .Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός κατασκευών από τοιχοποιία - Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες για κατασκευές από οπλισμένη και άοπλη τοιχοποιία, EN 1996-1-1, ΕΛΟΤ EN 1996-1-1: 2006/NA: 2010.
- [6] Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός κατασκευών από τοιχοποιία - Μέρος 2: Θέματα σχεδιασμού, επιλογή υλικών και κατασκευή τοιχοποιίας, EN 1996-2, ΕΛΟΤ EN 1996-2: 2006/NA: 2010.
- [7] Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός κατασκευών από τοιχοποιία – Μέρος 3: Απλοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού για κατασκευές από άοπλη τοιχοποιία, EN 1996-3, ΕΛΟΤ EN 1996-3: 2006/NA 2010.
- [8] Κανονισμός Επεμβάσεων - ΚΑΝ.ΕΠΕ., 3η Αναθεώρηση 2022 Κανονισμός για Αποτίμηση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας - Κ.Α.Δ.Ε.Τ., Αθήνα 2022
- [9] Manos Georgios, Kotoulas Lambros, Matsou V, Felekidou Olga, Arnaoutiw J, Katakalos Konstantinos (2022). The Performance of Two Unreinforced Masonry Churches in Greece under Gravitation and Earthquake Actions. Protection of Historical Constructions. Cham. Springer International Publishing. τόμ.209 σ.691-710.

- [10] Katakalos Konstantinos, Arnaoutis Ioannis A, Manos Georgios (2021). Identification of failure mechanism of the ottoman bath (hamam) at apollonia (pazarouda) exploitation of historical data. Case Studies in Construction Materials. τόμ.14 αρ.С σ.e00475.
- [11] Manos Georgios, Melidis Lazaros, Felekidou Olympia, Katakalos Konstantinos (2022). The Dynamic Response of a Vertical Dry-Stone Masonry Assembly as a Mock-Up of Masonry Wall fortifications. Protection of Historical Constructions. Cham. Springer International Publishing. τόμ.209 σ.266-283.
- [12] Μελέτη στερεώσεως ιερού ναού μεταμόρφωσης του Σωτήρος με σύμπραξη του υπουργείου πολιτισμού και επιστημών , της ΥΑΕΣΒΕ (πηγή εφορεία αρχαιοτήτων Θεσσαλονίκης) (1979)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής