



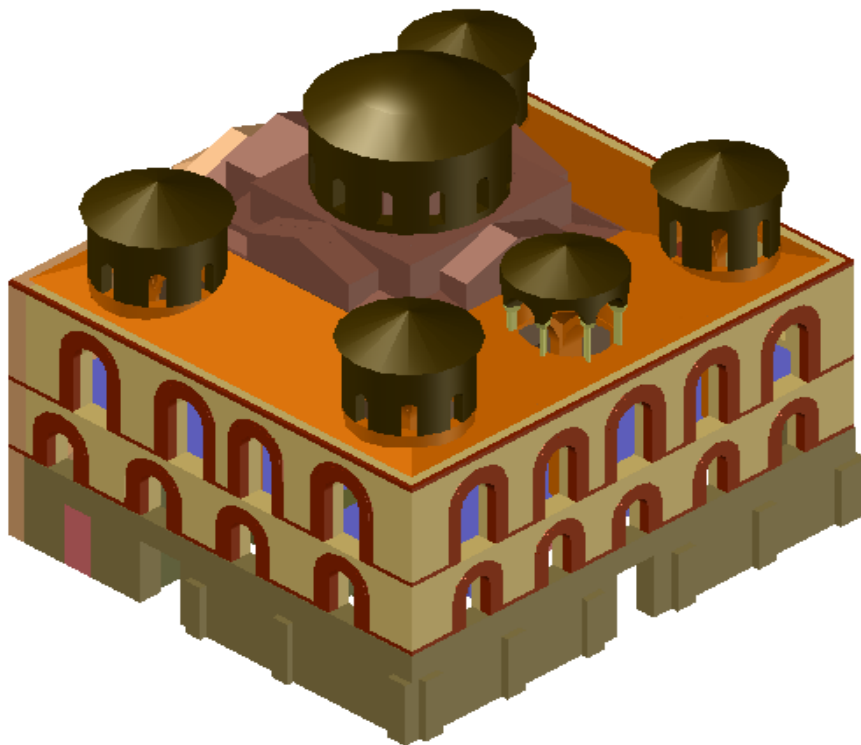
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΝΑΟΥ ΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΑΣ ΠΑΡΗΓΟΡΗΤΙΣΣΑΣ ΑΡΤΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Α. Κυνηγού

Επιβλέπων: Κουμούσης Βλάσης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ
ΙΕΡΟΥ ΝΑΟΥ ΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΑΣ
ΠΑΡΗΓΟΡΗΤΙΣΣΑΣ ΑΡΤΑΣ**

Ονοματεπώνυμο φοιτήτριας:

Κυνηγού Μαρία

Επιβλέπων καθηγητής:

Κουμούσης Βλάσης, Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών
Μηχανικών

Ακαδημαϊκό έτος:

2014-2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουμούση Βλάση. Πρώτον, γιατί μου κίνησε την περιέργεια να μελετήσω το ναό της Παναγίας Παρηγορήτισσας αναφέροντας μου το ιδιαίτερο σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου και άρα είναι ο εμπνευστής αυτής της εργασίας. Δεύτερον, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και τη συνεχή εμπύχωσή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις που μου μετέδωσε. Η συνεχής βοήθεια που μου προσέφερε και ο ενθουσιασμός που έδειξε συντέλεσαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ το Μωυσίδη Αργύρη και το Σφονδύλη Δημήτρη για τις πολύτιμες συμβουλές τους όσο αναφορά το λογισμικό ABAQUS. Χωρίς τις γνώσεις τους δεν θα ήταν δυνατή η δημιουργία του τελικού μοντέλου και η διενέργεια σημαντικών αναλύσεων.

Ακόμη, ευχαριστώ την Αρχαιολογική Εταιρεία, καθώς και τη 18^η Εφορία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων Άρτας, που μου έδωσαν πρόσβαση στο βιβλίο η “Παρηγορήτισσα της Άρτης” του Αναστάσιου Ορλάνδου.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν και την αγάπη τους όλο το διάστημα των φοιτητικών μου χρόνων, αλλά και για την υπομονή που έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Αφιέρωμα στον Ορλάνδο

Ο Αναστάσιος Ορλάνδος (1887-1979) ήταν αρχιτέκτων-πολιτικός μηχανικός, αρχαιολόγος και ακαδημαϊκός. Ήταν, ακόμη, ιδρυτικό μέλος της Αρχαιολογικής Εταιρείας και άφησε σπουδαία κληρονομιά στον επιστημονικό κόσμο, καθώς έγραψε βιβλία για πάρα πολλά μνημεία και ήταν πρωτεργάτης στις εργασίες αναστήλωσης τους. Αν ο Ορλάνδος δεν είχε μελετήσει το ναό της Παναγίας Παρηγορήτισσας δεν θα ήταν εφικτή η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Κι αυτό, γιατί ο τρισδιάστατος σχεδιασμός του ναού έγινε βάσει των σχεδίων του Α. Ορλάνδου, που είχε αποτυπώσει το ναό, αλλά και γιατί στο βιβλίο που έχει συγγράψει υπάρχουν πολλές χρήσιμες και σημαντικές πληροφορίες για το ναό της Παναγίας Παρηγορήτισσας.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η στατική και δυναμική ανάλυση του ιερού βυζαντινού ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας που βρίσκεται στην Άρτα. Ο ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας χτίστηκε σε δύο φάσεις και η περίοδος της τελικής ανέγερσής του χρονολογείται το 13^ο αι. μ.Χ., περίοδο όπου η Άρτα ήταν πρωτεύουσα του Δεσποτάτου της Ηλείου. Ο ναός είναι χτισμένος από φέρουσα τοιχοποιία, έχει μεγάλο κυβικό σχήμα και στην οροφή φέρει έξι τρούλους, τον κεντρικό, τέσσερις περιμετρικούς και ένα κιονοστήρικτο ανοιχτό ουρανίσκο.

Το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου είναι μοναδικό και ιδιαίτερα τολμηρό, καθώς συμμετέχουν σε αυτό 43 μαρμάρيني κίονες. Ο τρούλος στηρίζεται σε τέσσερις καμάρες που στηρίζονται σε ζεύγη μαρμάρινων κίωνων, τα οποία εδράζονται σε οριζόντιους προβόλους, οι οποίοι είναι πακτωμένοι μέσα στον τοίχο. Οι πρόβολοι αυτοί εδράζονται αντίστοιχα σε ζεύγη μαρμάρινων κίωνων, τα οποία με τη σειρά τους πατάνε σε δεύτερη σειρά οριζόντιων προβόλων, που είναι κι αυτοί πακτωμένοι μέσα στον τοίχο και εδράζονται σε παραστάδες. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της στατικής και σεισμικής συμπεριφοράς τόσο του συνολικού φορέα, όσο και του συστήματος στήριξης του κεντρικού τρούλου.

Πρώτο σημαντικό κομμάτι της εργασίας είναι η σχεδίαση του ναού σε τρισδιάστατη μορφή με τη χρήση του προγράμματος AutoCAD. Ο σχεδιασμός έγινε βάσει των σχεδίων του Α. Ορλάνδου, ο οποίος είχε αποτυπώσει το ναό το 1963. Επόμενο σημαντικό κομμάτι είναι η μόρφωση του αριθμητικού προσομοιώματος με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση τρισδιάστατα τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία δεύτερης τάξης. Σε κάθε μέλος του φορέα η διακριτοποίηση έγινε ξεχωριστά με την τεχνική του ελεύθερου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, διότι δεν επιλέχθηκε η ίδια πυκνότητα δικτύου σε όλα τα μέλη του φορέα. Γενικά, το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων δεν έγινε πολύ πυκνό στα πιο ογκώδη μέλη, για να ελεγχθεί το μέγεθος του μοντέλου, όμως δόθηκε βαρύτητα στα μέλη που καταπονούνται περισσότερο και έχουν μεγαλύτερη διακύμανση στην κατανομή των τάσεων. Το τελικό προσομοίωμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από 685888 πεπερασμένα στοιχεία και έχει 3421020 βαθμούς ελευθερίας. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα υλικά προσομοίωσης προέκυψαν από τη βιβλιογραφία. Για τη θεμελίωση θεωρήθηκε ότι οι τοίχοι είναι τοποθετημένοι σε βάθος 1μ. μέσα στο έδαφος.

Στο τελικό μοντέλο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Διενεργήθηκε στατική ανάλυση για την οριακή κατάσταση αστοχίας λαμβάνοντας υπόψη το ίδιο βάρος της κατασκευής, το φορτίο της στέγης και το φορτίο του χιονιού. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι ιδιομορφές του φορέα. Επίσης, έγιναν ιδιομορφικές αναλύσεις χωρίς κάποια μέλη του προσομοιώματος, ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των επιμέρους

αυτών μελών στη δυσκαμψία του συνολικού φορέα και στο σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου.

Ακόμη, διενεργήθηκαν δυναμικές αναλύσεις, που λαμβάνουν υπόψη την επαλληλία των ιδιομορφών, ώστε να διερευνηθεί η σεισμική απόκριση του φορέα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πέντε δυναμικές φασματικές αναλύσεις για διαφορετικές περιπτώσεις σεισμικής φόρτισης, εξετάστηκε μέσα από αυτές και η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού στο σύστημα στήριξης τους κεντρικού τρούλου. Τέλος, διενεργήθηκαν δύο δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, για το σεισμό του Αιγίου που συνέβη το 1995 με σεισμικό μέγεθος $M_w=6.4$ και το σεισμό της Λευκάδας που συνέβη το 2003 με σεισμικό μέγεθος $M_w=6.2$.

Μετά από κάθε ανάλυση παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά αποτελέσματα που προκύπτουν και συγκρίνονται. Κατά την προβολή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται η παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα, οι τάσεις Von Mises, που δείχνουν τη γενική καταπόνηση των μελών, και κάποιες από τις κύριες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε κάποιες κρίσιμες περιοχές. Έχει δοθεί έμφαση στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στα στοιχεία που εμφανίζουν τις μέγιστες καταπονήσεις, αλλά και στα στοιχεία που συμμετέχουν στο σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου. Στις περιπτώσεις των δυναμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας έχουν παρουσιαστεί, επίσης, οι μετακινήσεις και τάσεις για το δυσμενέστερο χρονικό βήμα, καθώς και τα σημαντικότερα διαγράμματα χρονοϊστορίας.

Από την ανάλυση που έγινε με το συγκεκριμένο προσομοίωμα είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι περιοχές του φορέα που είναι πιο ευάλωτες και μπορεί να οδηγηθούν σε κάποια μορφή αστοχίας. Οι περιοχές αυτές μπορεί να χρειάζονται ενίσχυση, καθώς και μια πιο λεπτομερή ανάλυση και επανασχεδιασμό. Από όλες τις αναλύσεις που έχουν γίνει είναι σαφές ότι πρόκειται για πολύ δύσκαμπτη κατασκευή, αφού αποτελείται από στιβαρή φέρουσα τοιχοποιία. Μόνο από την επιβολή των κατακόρυφων φορτίων ο φορέας δεν επιβαρύνεται σημαντικά, αλλά είναι πιο ευπαθής σε πλευρικά φορτία που οφείλονται σε σεισμούς.

Οι ιδιομορφές και τα ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας που υπολογίστηκαν υποδεικνύουν την μοναδικότητα και πολυπλοκότητα του ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας. Από την ιδιομορφική ανάλυση, ακόμη, συμπεραίνεται ότι ο φορέας είναι πιο εύκαμπτος και συνεπώς ευπαθής κατά τη διεύθυνση X, όπως κι ότι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι πάρα πολύ δύσκαμπτος. Στις δυναμικές φασματικές αναλύσεις αναπτύσσονται σημαντικές τάσεις αλλά με εξαίρεση το κέλυφος του ανοιχτού ουρανίσκου τα μέλη του φορέα εμφανίζουν τάσεις μικρότερες των αντοχών των υλικών. Αντιθέτως, λόγω των σεισμικών φορτίσεων του Αιγίου και της Λευκάδας αρκετά μέλη αναπτύσσουν τάσεις μεγαλύτερες των αντοχών των υλικών. Δυσμενέστερη φόρτιση είναι η χρονοϊστορία του σεισμού της Λευκάδας.

Όσο αναφορά το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου, σε όλες τις αναλύσεις οι μαρμάρινοι κίονες δεν αναπτύσσουν μεγάλες τάσεις Von Mises σε σχέση με τη θλιπτική τους αντοχή σε αντίθεση με την τοιχοποιία του κυρίως ναού που κινδυνεύει σε αστοχία. Σε περίπτωση, όμως, σεισμού είναι πολύ πιθανό να σχηματιστούν ρωγμές στους μαρμάρινους κίονες. Ακόμη, το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την κατακόρυφη συνιστώσα το σεισμού. Τέλος, συμπεραίνεται ότι οι ξύλινοι ελκυστήρες παίζουν σημαντικό ρόλο στη συγκράτηση των καμαρών που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.

Συμπεραίνεται, συνεπώς, ότι το βάρος του κεντρικού τρούλου το αναλαμβάνει, κυρίως, η τοιχοποιία του κυρίως ναού και η περιμετρική τοιχοποιία και μερικώς οι μαρμάρινοι κίονες, παρά την πρώτη εντύπωση που αφήνει η αρχιτεκτονική διαμόρφωση.

Κύριο συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι σε περίπτωση ενός σεισμού μεγάλου εύρους η κατασκευή καταπονείται σημαντικά και μπορεί να οδηγηθεί σε τοπικές ή και πιο μεγάλου εύρους αστοχίες. Το συμπέρασμα αυτό σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες φθορές που υπάρχουν σε συγκεκριμένα μέρη του ναού υποδεικνύουν ότι πρέπει να γίνει περαιτέρω συστηματική πειραματική και αναλυτική μελέτη που θα καθορίσει τις απαιτούμενες επισκευές και ενισχύσεις, οι οποίες θα βελτιώσουν τη γενική συμπεριφορά του μνημείου.

Abstract

The subject of this thesis is the static and dynamic analysis of the sacred Byzantine church of Panagia Paregoritissa, which is located in Arta. The church of Panagia Paregoritissa was built in two stages and the final stage dates back to the 13th century a.C.; at the time Arta was the capital of the Despotato of Epirus. The church is a masonry construction, it has large cubic shape and at the roof it has six domes, one central, four perimetric and a dome which is supported by marble columns.

The support system of the central dome is unique and particularly audacious, since part of it are 43 marble columns. The dome is carried by four arches, which are supported by pairs of marble columns, which are placed onto horizontal marble cantilevers. These cantilevers are placed onto another pairs of marble columns, which are carried by a second row of cantilevers. The aim of this thesis is to perform the static and seismic analysis of the whole model and more specifically the support system of the central dome.

The first important part of this work is the graphical 3D representation of the church with the use of the software AutoCAD. The geometry is based on the drawings of A. Orlandos, who had documented and measured the building in 1963. Next part is the development of the numerical model of the church with the use of the finite element analysis software ABAQUS. For the simulation 3D quadratic tetrahedral elements were used. Every part of the model was meshed independently with the free mesh generator of the program. In general, the mesh of the more massive parts was not dense, to control the size of the model, except for the parts which develop the highest stress and have a significant stress variations. The final model, which was created, consists of 685888 3D finite elements and has 3421020 degrees of freedom. The characteristic values of the mechanical properties of the different materials were selected from bibliography and relevant references. The foundation level was considered 1m below the ground level.

The final model was analyzed considering an elastic behavior of the materials. A static analysis was performed to determine the limit state corresponding to self-weight, the load of the cladding at the roof and the load due to snow. After that the eigenfrequencies of the model were computed. In addition, modal analyses were conducted without some parts of the model, in order to examine the influence of these parts to the stiffness of the whole model and the support system of the central dome.

Also, a dynamic analysis was performed, following the mode superposition method to determine the seismic excitation response. More specifically, five response spectrum analyses were conducted for different cases of seismic loading. Through the response spectrum analyses the influence of the vertical component of the earthquake to the support system of the central dome was

investigated. Finally, two dynamic time history analyses were conducted for the earthquake that occurred in Aigio in 1995 of seismic magnitude $M_w=6.4$ and for the earthquake that occurred in Leukada in 2003 of seismic magnitude $M_w=6.2$.

The main results of every analysis are presented and compared. More specifically, deformed geometry of the model is presented, the Von Mises stresses that give an overall measure of stressing as well as compressive and tensile stresses at some critical regions. The stresses which develop in elements that are part of the support system of the central dome are emphasized. In the case of time history analyses the max displacement and stresses for the crucial time step and the most significant time history diagrams are also presented.

Through this analysis it is possible to identify the regions of the model which are vulnerable and can lead to some type of failure. These regions may also need repair and /or strengthening and further a more detailed analysis and redesign. Through all the analyses cases that have been carried out it is clear that the construction is very stiff, since it is built by firm masonry. The vertical loads alone do not over stress the construction, which is mainly vulnerable to lateral loads due to earthquakes.

The mode shapes and the effective masses, which were computed, indicate the uniqueness and complexity of the church of Panagia Paregoritissa. From the results of the modal analysis it is concluded that the construction is more flexible and therefore vulnerable in the X direction and that in the vertical direction it is quite stiff. During the response spectrum analyses high stresses are developed but with the exception of the dome shell, which is supported by marble columns, the elements are moderately stressed lower than their strength. On the contrary, due to the seismic loads of Aigio and Leukada several elements develop stresses higher than the strength of the materials. The crucial load case is the time history of the earthquake that occurred in Leukada.

With reference to the support system of the central dome, during all the analyses the marble columns, which support the central dome, do not develop significant Von Misses stresses, unlike the masonry of the ledger, which is vulnerable to failure. However, in the case of an earthquake it is possible the marble columns to develop significant cracks or may break. Also, the support system of the central dome is not affected particularly by the vertical component of the earthquake. Finally, the timbered beams are very important to restrain the arches that support the central dome.

It turns out that the weight of the central dome is carried primarily by the masonry of the ledge and the surrounding walls and partly by the marble columns besides the aesthetics that leave the opposite impression.

The main conclusion of the present study is that in case of a strong earthquake the structure will suffer significant stresses that may lead to local or more extended failure. This together with the already accumulated damage in certain part of the church point to further systematic experimental and analytical studies that will determine the adequate repair and strengthening measures, which will enhance the overall performance of this monumental church.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	2
1.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΒΥΖΑΝΤΙΝΩΝ ΝΑΩΝ	3
1.2.1 Είδη θολωτών κατασκευών	3
1.2.2 Αρχιτεκτονικοί τύποι βυζαντινών ναών	5
1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
2. Η ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ	9
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ	9
2.2 ΕΙΔΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	10
2.3 ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΒΥΖΑΝΤΙΝΩΝ ΕΚΚΛΗΣΙΩΝ	11
3. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΡΗΓΟΡΗΤΙΣΣΑΣ	14
3.1 ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΩΝ ΧΩΡΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	14
3.2 ΧΡΟΝΙΚΟ ΚΑΙ ΦΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	15
3.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	17
3.3.1 Εισαγωγή	17
3.3.2 Εξωτερική εμφάνιση του κτιρίου	17
3.3.3 Το εσωτερικό του καθολικού	20
3.4 ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	25
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	27
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΤΟΛΕΣ ΤΟΥ AUTOCAD 3D	29
4.3 ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	30
4.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΟΛΩΝ	33
4.4.1 Σταυροθόλια	33
4.4.2 Ημισφαιρικοί θόλοι	34
4.4.3 Τρούλοι	36
4.5 ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	37
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	42
5.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	42

5.2 ΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ABAQUS	43
5.2.1 Το λογισμικό ABAQUS	43
5.2.2 Γεωμετρία προσομοιώματος	44
5.2.3 Υλικά προσομοίωσης	47
5.2.4 Η δημιουργία της συνδεσμολογίας	50
5.2.5 Ο προσδιορισμός των αλληλεπιδράσεων	50
5.2.6 Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων	51
5.2.7 Ορισμός στήριξης του φορέα	57
5.2.8 Υποβολή αναλύσεων και προβολή αποτελεσμάτων	57
6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	59
6.1 ΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	59
6.1.1 Μόνιμα και κινητά φορτία της κατασκευής	59
6.1.2 Συνδυασμοί φορτίσεων	60
6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ABAQUS	60
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	62
6.3.1 Μετατοπίσεις	62
6.3.2 Τάσεις	64
7. ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ	69
7.1 ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ABAQUS	69
7.2 ΠΡΟΒΟΛΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ	69
7.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΜΕΛΩΝ ΣΤΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	74
8. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	76
8.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ	76
8.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS	77
8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	79
8.3.1 $X+0.3Y$	79
8.3.2 $Y+0.3X$	86
8.3.3 $0.7Z$	92
8.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ	98
8.4.1 $X+0.3Y+0.3Z$	98
8.4.2 $Y+0.3X+0.3Z$	101

9. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ	104
9.1 ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ	104
9.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΙΓΙΟΥU ...	106
9.2.1 Διαγράμματα χρονοϊστορίας.....	106
9.3.2 Μέγιστες μετατοπίσεις.....	109
9.3.3 Μέγιστες τάσεις.....	111
9.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ	117
9.3.1 Διαγράμματα χρονοϊστορίας.....	117
9.3.2 Μέγιστες μετατοπίσεις.....	120
9.3.3 Μέγιστες τάσεις.....	122
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	129
Παράρτημα	132
Βιβλιογραφία	135

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η Άρτα είναι πρωτεύουσα του νομού Άρτας και η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ηπείρου μετά τα Ιωάννινα. Η πόλη της Άρτας έχει σπουδαία βυζαντινή παράδοση από την εποχή του Δεσποτάτου της Ηπείρου (13^ο αιώνα μ.Χ.) και φημίζεται για τις βυζαντινές εκκλησίες της, όπως αυτή της Αγίας Θεοδώρας, των Βλαχερνών, του Αγίου Βασιλείου και της Παναγίας Παρηγορήτισσας.

Το Δεσποτάτο της Ηπείρου ιδρύθηκε το 1205 μ.Χ. από τον Μιχαήλ Α΄ Κομνηνό Δούκα με έδρα την Άρτα στην αρχή και πολύ αργότερα τα Ιωάννινα. Η σύσταση του δεσποτάτου στηρίχτηκε στις υφιστάμενες διοικητικές και εκκλησιαστικές δομές που προϋπήρχαν από την μεσοβυζαντινή περίοδο (8^ο-12^ο αιώνας) και ήταν ένα από τα κράτη που δημιουργήθηκαν μετά την κατάλυση της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας κατά την Τέταρτη Σταυροφορία το 1204 μ.Χ. Μαζί με την Αυτοκρατορία της Νίκαιας και την Αυτοκρατορία της Τραπεζούντας θεωρούνταν ότι είναι νόμιμη συνέχεια της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας. Αρχικά, περιελάμβανε τα εδάφη της Ηπείρου και της Αιτωλοακαρνανίας. Γρήγορα επεκτάθηκε στα Ιόνια Νησιά καθώς και σε σημαντικά τμήματα της Αλβανίας, της Θεσσαλίας, της Μακεδονίας και της Θράκης.



Εικόνα 1.1: Το Δεσποτάτο της Ηπείρου.

Η Άρτα, πρωτεύουσα του Δεσποτάτου της Ηπείρου, κοσμήθηκε από τον ηγεμονεύοντα οίκο των Αγγέλων Δουκών με περιλαμπρα δημόσια οικοδομήματα. Η μεγάλη ακμή και ο υψηλός πολιτισμός του Δεσποτάτου μαρτυρούνται από το πλήθος λαμπρών ναών και οχυρών που, τα περισσότερα, σώζονται μέχρι και σήμερα. Από τα γνωστά μνημεία του Δεσποτάτου, την πρώτη θέση κατέχει τόσο από άποψη μεγέθους, όσο και από άποψη πρωτότυπης αρχιτεκτονικής συνθέσεως, αλλά και λόγω ψηφιδωτής και

γλυπτής διακοσμήσεως, ο ναός που είναι αφιερωμένος στον Ευαγγελισμό της Θεοτόκου, ή πιο γνωστός, ως ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας.

Από τα μέσα του 13^{ου} αιώνα το Δεσποτάτο άρχισε να παρακμάζει και να συρρικνώνεται στα αρχικά του όρια, ενώ κατά διαστήματα υποτάχθηκε στους Σέρβους και στο κράτος της Νικαίας. Το έτος 1449 μ.Χ. κατακτήθηκε από τους Οθωμανούς με ηγέτη τον Κάρλο Β Τόκκο, ενώ το έτος 1788 η Άρτα περιήλθε στην εξουσία του Αλή Πασά Τεπελενλή, η οποία τερματίστηκε με την πτώση και τον αποκεφαλισμό του το 1822. Κατά τη διάρκεια της Ελληνικής επανάστασης στην περιοχή της Άρτας και στα γύρω χωριά έγιναν πολλές ιστορικές μάχες. Πιο συγκεκριμένα, στις 15-17 Νοεμβρίου του 1821 έγινε η ομώνυμη μάχη της Άρτας στην οποία έλαβαν μέρος οι γενναίοι οπλαρχηγοί Γεώργιος Καραϊσκάκης και Μάρκος Μπότσαρης. Μετά το 1822 η Άρτα περιήλθε στην εξουσία του Χουρσίτ Πασά και αργότερα του Κιουταχί Πασά. Το 1881 απελευθερώθηκε και προσαρτήθηκε μαζί με τη Θεσσαλία στο Ελληνικό κράτος.

1.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΒΥΖΑΝΤΙΝΩΝ ΝΑΩΝ

Κατά τη βυζαντινή εποχή χτίστηκαν πολλοί ναοί μεγαλοπρεπείς, οι οποίοι αποτελούσαν σύμβολο εξουσίας για τη βυζαντινή αυτοκρατορία. Σήμερα, οι ναοί αυτοί συνιστούν σημαντικό κομμάτι των μνημείων παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς και ξεχωρίζουν για την ιδιαίτερη αρχιτεκτονική τους. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα είδη θολωτών κατασκευών που εφαρμόζονταν στη βυζαντινή ναοδομία και παρατίθενται κάποιοι αρχιτεκτονικοί τύποι των βυζαντινών ναών.

1.2.1 Είδη θολωτών κατασκευών

Τόξα

Το ημικυκλικό τόξο αποτελεί την απλούστερη μορφή θόλου που χρησιμοποιούνταν στους βυζαντινούς ναούς. Οι ωθήσεις που αναπτύσσονται στα τόξα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες. Το τόξο για να μπορεί να τις παραλάβει πρέπει να έχει διαστασιοποιηθεί με το κατάλληλο πάχος, να έχει επαρκή στήριξη και να υπάρχει ακαμψία μεταξύ τόξου και στήριξης. Ρόλο, φυσικά, παίζει και το μέγεθος του ανοίγματος, το οποίο, όταν μεγαλώνει αυξάνονται οι καμπτικές ροπές που ασκούνται. Τα τόξα κατασκευάζονταν με τη βοήθεια ξυλότυπου.

Ημικυλινδρικοί θόλοι (καμάρες)

Η μορφή του ημικυλινδρικού θόλου προκύπτει από την κίνηση του ημικυκλικού τόξου πάνω σε άξονα κάθετο στο επίπεδό του. Οι ημικυλινδρικοί θόλοι έχουν συμπεριφορά ημικυκλικού τόξου, αλλά οι ωθήσεις που ασκούνται δεν είναι πάντα κατανεμημένες ομοιόμορφα και μπορεί να συγκεντρώνονται σε ορισμένα σημεία. Η κατασκευή των καμαρών γινόταν με ή χωρίς ξυλότυπο.

Αρκετές φορές, χτίζονταν με τη μεσολάβηση σφενδονίων κατά μήκος τους. Τα σφενδόνια ήταν εγκάρσια ημικυκλικά τόξα που λειτουργούσαν αφενός, ως ενισχυτικές ζώνες, αφετέρου χώριζαν το θόλο σε μικρότερα τμήματα, τα οποία λειτουργούσαν ως αυτόνομες κατασκευές.

Σταυροθόλια

Τα σταυροθόλια καλύπτουν τετράγωνους ή ορθογώνιους χώρους και προκύπτουν από τη συμβολή δύο κυλινδρικών θόλων με κοινή ή διαφορετική διάμετρο. Μέσα από τις διαγώνιες ακμές που δημιουργούνται από την τομή των δύο θόλων μεταφέρονται οι ωθήσεις στις στηρίξεις του σταυροθολίου. Τα σταυροθόλια μπορεί να είναι και υπερυψωμένα, δηλαδή η συμβολή των θόλων να γίνεται σε μεγαλύτερο ύψος.

Ρηχοί ημισφαιρικοί θόλοι (ασπίδες)

Οι παραπάνω θολωτές κατασκευές χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη τετράγωνων χώρων. Στην οροφή των χώρων αυτών δημιουργούνταν σφαιρικοί θόλοι που κατασκευάζονταν από πλίνθους τοποθετημένους σε οριζόντιους δακτυλίους. Οι θόλοι μπορεί να ήταν δομημένοι και από πλίνθους σε κατακόρυφους δακτυλίους, όταν προέρχονταν από σταυροθόλια που λόγω υπερύψωσης είχαν μεταβληθεί σε σφαιρικές επιφάνειες. Τα κελύφη των ρηχών θόλων έχουν το ίδιο πάχος και έχουν καλή στατική συμπεριφορά. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν το βέλος των θόλων είναι μικρότερο του $\frac{1}{4}$ του ανοίγματος, που ισχύει συνήθως, οι τάσεις είναι παντού θλιπτικές και οι ροπές μηδενικές, συνεπώς δεν υπάρχει πρόβλημα κατάρρευσης. Από την άλλη όταν οι θόλοι είναι πολύ χαμηλωμένοι αυξάνονται οι αντιδράσεις των στηρίξεων, άρα πρέπει να είναι επαρκείς οι διατομές τους.



(α)



(β)

Εικόνα 1.2: (α) Σταυροθόλια (β) Ημισφαιρικός θόλος του Αγίου Θωμά της Βιτανόβα.

Ημισφαιρικοί θόλοι (τρούλοι)

Οι τρούλοι στεγάζουν κι αυτοί τετράγωνους χώρους των βυζαντινών ναών. Οι ημισφαιρικοί θόλοι εδράζονται σε μία οριζόντια κυκλική στεφάνη, από την οποία διαβιβάζονται τα φορτία σε κατακόρυφα πλευρικά τόξα μέσω

σφαιρικών τριγώνων. Τα τρίγωνα αυτά ονομάζονται λοφία. Ο τρόπος στήριξης των τρούλων ποικίλει και καθορίζει και τον αρχιτεκτονικό τύπο του βυζαντινού ναού. Για το λόγο αυτό γίνεται πιο εκτενής αναφορά παρακάτω των συστημάτων στήριξης των ημισφαιρικών θόλων. Οι τρούλοι δομούνται από πλίνθους τοποθετημένους σε οριζόντιους ή παράλληλους στα μέτωπα των τόξων δακτυλίους. Το κέλυφος των τρούλων δεν έχει παντού ομοιόμορφο πάχος και λόγω του μεγάλου βέλους τους δημιουργούνται εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις. Επομένως, έχουν χειρότερη στατική συμπεριφορά σε σχέση με τους ρηχούς θόλους.

1.2.2 Αρχιτεκτονικοί τύποι βυζαντινών ναών

- Πρωτοβυζαντινή περίοδος (640-843 μ.Χ.)

Βασιλική

Ο τύπος προέρχεται από τους αρχαίους ναούς των Ελλήνων, μετέπειτα παραλήφθηκε από τους Ρωμαίους και τέλος από τους Χριστιανούς. Οι τελευταίοι έχτισαν τις γνωστές παλαιοχριστιανικές βασιλικές, από τις οποίες προήλθε η βασιλική της βυζαντινής περιόδου, αλλά είχε μικρότερο μέγεθος. Οι βασιλικές είναι επιμήκη κτίρια με κάτοψη ορθογωνική, τα οποία διαιρούνται σε κλίτη μέσω κιονοστοιχιών. Τα κλίτη μπορεί να είναι τρία, πέντε, επτά ή και εννέα. Το μεσαίο κλίτος είναι υπερυψωμένο και πιο ευρύχωρο και καλύπτεται από αμφικλινή στέγη, ενώ τα υπόλοιπα κλίτη από μονοκλινή. Συχνά το μεσαίο κλίτος καταλήγει σε αψίδα (κόγχη). Μέρη των βασιλικών ναών είναι ο κυρίως ναός, το ιερό, το υπερώο, κοινώς γυναικωνίτης, και ο νάρθηκας, ο οποίος επικοινωνεί με τον κυρίως ναό μέσω τρίβηλου.



Εικόνα 1.3: Τρούλος Αγίας Σοφίας Κωνσταντινούπολης.

Τρουλαία βασιλική

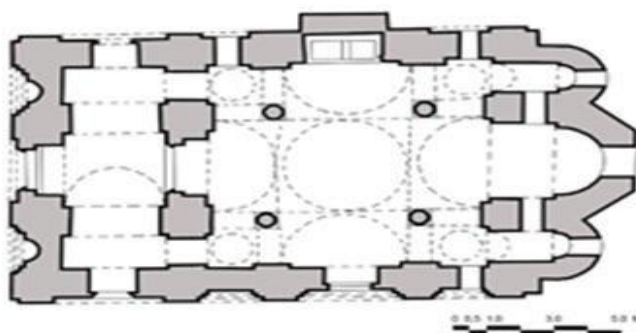
Αποτελεί εξέλιξη της παλαιοχριστιανικής βασιλικής, με βασικές καινοτομίες ότι το μήκος του κτιρίου μειώνεται και ο κεντρικός χώρος του κυρίως ναού

καλύπτεται με τρούλο. Ο τρούλος στηρίζεται σε τέσσερις μεγάλους πεσσούς με τη μεσολάβηση σφαιρικών τριγώνων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα βασιλικής με τρούλο είναι ο ναός της Αγίας Σοφίας στη Κωνσταντινούπολη.

- Μεσοβυζαντινή περίοδος (843-1204 μ.Χ.)

Σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο

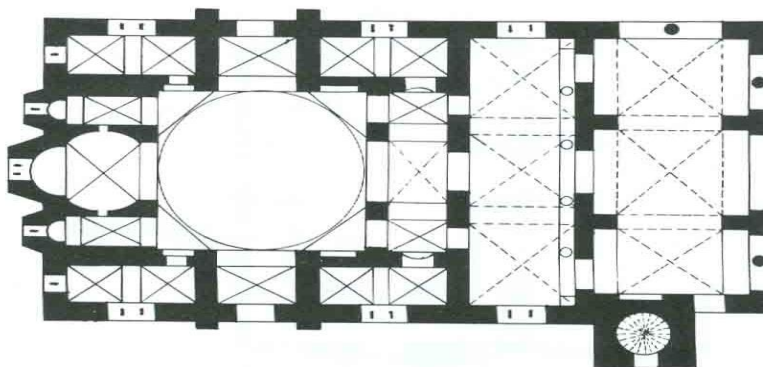
Οι ναοί που ανήκουν σε αυτό τον τύπο έχουν περίπου τετράγωνη κάτοψη, ενώ σημαντική ιδιαιτερότητά τους είναι ότι σχηματίζεται εσωτερικά και εξωτερικά σταυρός. Ο τρούλος στηρίζεται όπως στην τρουλαία βασιλική μέσω σφαιρικών τριγώνων σε τέσσερα στηρίγματα, αλλά εδράζεται σε τέσσερα τόξα. Τα τόξα αποτελούν τα μέτωπα τεσσάρων καμαρών οι οποίες σχηματίζουν τον εγγεγραμμένο σταυρό.



Εικόνα 1.4: Κάτοψη ναού σταυροειδούς εγγεγραμμένου τύπου.

Οκταγωνικός τύπος

Στον οκταγωνικό τύπο ο τρούλος καλύπτει όλο το χώρο του κυρίως ναού που εδράζεται σε οκτώ στηρίγματα. Στον τρούλο δημιουργούνται οκτώ σφαιρικά τρίγωνα εκ των οποίων τα τέσσερα εδράζονται σε καμάρες στις πλευρές και τα άλλα τέσσερα εδράζονται σε ημιχώνια ή κόγχες στις γωνίες. Είδη οκταγωνικού τύπου είναι ο σύνθετος και ο απλός οκταγωνικός. Ο απλός έχει κόγχες στις γωνίες και περιβάλλεται από παραστάδες στο εξωτερικό για την αντιστήριξη του τρούλου, συνεπώς δεν έχει περίστωο. Αντιθέτως, ο σύνθετος περιβάλλεται από περίστωο μέσα από το οποίο γίνεται σταυροειδής οκταγωνικός και έχει ημιχώνια στις γωνίες.



Εικόνα 1.5: Κάτοψη ναού οκταγωνικού τύπου.

- Υστεροβυζαντινή περίοδος (1204-1453 μ.Χ.)

Μικτός τύπος

Οι ναοί μικτού τύπου έχουν διάταξη βασιλικής στο ισόγειο και εγγεγραμμένου σταυροειδούς με τρούλο στον όροφο.

Σταυρελίστεγος τύπος

Πρόκειται για θολοσκεπή ναό, μονόκλιτο ή τρίκλιτο, του οποίου η κατά μήκος καμάρα διακόπτεται από μία εγκάρσια υπερυψωμένη καμάρα, με αποτέλεσμα στη στέγη να διαμορφώνεται σαφώς το σχήμα του σταυρού.

1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα παράγραφο δίνεται μία σύντομη περιγραφή των κεφαλαίων που συντελούν τη δομή της εργασίας. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της στατικής και σεισμικής συμπεριφοράς του ιερού ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας που βρίσκεται στην Άρτα, έμφαση δίνεται στο σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου.

Μετά την εισαγωγή, όπου έγινε μία ιστορική αναδρομή και περιγράφηκαν τα είδη των θολωτών κατασκευών και οι τύποι των βυζαντινών ναών, ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο, που παρουσιάζονται συνοπτικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας και οι κατηγορίες της τοιχοποιίας. Ακόμη, περιγράφονται οι τεχνικές με τις οποίες χτίζονταν τα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία κατά τη βυζαντινή εποχή. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο ιερός ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας. Αναφέρονται οι φάσεις κατασκευής του, παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωμετρία του κτιρίου και τα υλικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί. Τέλος, αναφέρονται συνοπτικά οι φθορές που έχει υποστεί ο ναός με το πέρασμα των χρόνων και οι επεμβάσεις που έχουν γίνει.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το πρώτο σημαντικό κομμάτι της εργασίας που είναι ο τρισδιάστατος σχεδιασμός του ναού με τη χρήση του προγράμματος AutoCAD. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα σχεδιασμού του κτιρίου και κάποιες από τις εντολές που εφαρμόστηκαν στο AutoCAD. Στη συνέχεια στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά το δεύτερο μεγάλο μέρος της εργασίας, που είναι η μόρφωση του αριθμητικού προσομοιώματος του φορέα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS. Τα συγκεκριμένα κεφάλαια αφορούν, κυρίως, όποιον θα ήθελε να κάνει στην πράξη ένα αντίστοιχο προσομοίωμα.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η στατική ανάλυση που έγινε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Όλες οι αναλύσεις που έχουν γίνει είναι ελαστικές και στα αποτελέσματα προβάλλεται η παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα και δίνεται έμφαση όσο αναφορά τις τάσεις στα στοιχεία που καταπονούνται περισσότερο. Στο έβδομο κεφάλαιο προβάλλονται οι

κυριότερες ιδιομορφές του φορέα που προέκυψαν από την ιδιομορφική ανάλυση και εξετάζεται η επιρροή επιμέρους μελών στη συνολική δυσκαμψία του φορέα.

Επόμενο είναι το όγδοο κεφάλαιο, στο οποίο περιγράφεται η δυναμική φασματική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε και τα αποτελέσματά της για τους διαφορετικούς συνδυασμούς σεισμικής φόρτισης. Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλύσεις χρονοϊστορίας που έγιναν για το σεισμό του Αιγίου και το σεισμό της Λευκάδας. Για τις συγκεκριμένες αναλύσεις έχουν παρουσιαστεί τα σημαντικότερα διαγράμματα χρονοϊστορίας, οι μέγιστες μετατοπίσεις που παρουσιάζονται για κάθε διεύθυνση και οι τάσεις των περισσότερο καταπονούμενων μελών για το δυσμενέστερο χρονικό βήμα.

Στο δέκατο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων και εξάγονται συμπεράσματα για τη σεισμική συμπεριφορά του φορέα και του συστήματος στήριξης του κεντρικού τρούλου.

2. Η ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Εδώ και χιλιάδες χρόνια ο άνθρωπος χρησιμοποιεί την τοιχοποιία ως δομικό υλικό. Κάποια από τα έργα που χτίστηκαν στο παρελθόν έχουν διασωθεί και αποτελούν σήμερα πολιτιστική κληρονομιά για τους λαούς, αφού χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερο κατασκευαστικό και αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον. Για το λόγο αυτό η τοιχοποιία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα δομικά υλικά και είναι αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημόνων τις τελευταίες δεκαετίες.

Πριν τη δεκαετία του '70 δεν ήταν γνωστή η μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας, αλλά δημιουργήθηκε η ανάγκη προσδιορισμού της για τη συντήρηση των μνημείων και των παλαιών κατασκευών. Η τοιχοποιία είναι μια σύνθεση λιθοσωμάτων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω κονιάματος. Εξαιτίας του ότι είναι πολύμορφο υλικό δεν είναι εύκολος ο ακριβής προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας, καθώς οι εμπειρικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί, προβλέπουν με ακρίβεια μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα από τα οποία έχουν προέλθει. Πλέον υπάρχει κανονισμός για τις κατασκευές από τοιχοποιία, ο Ευρωκώδικας 6, ο οποίος κυκλοφόρησε μόλις το 1989.

Όσο αναφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, παρουσιάζει σχετικά χαμηλές αντοχές και εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά. Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται από την αντοχή των λιθοσωμάτων και του κονιάματος. Από την άλλη η αντοχή έναντι εφελκυσμού και διατμήσεως εξαρτάται από τη συνάφεια μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος. Η τοιχοποιία μπορεί να αναλάβει σημαντικά θλιπτικά φορτία, αλλά μικρά οριζόντια επειδή έχει χαμηλή εφελκυστική αντοχή.

Σημαντικό μειονέκτημά της είναι ότι σε περίπτωση σεισμού, όπου η κατασκευή υποβάλλεται σε μεγάλο εύρους ανακυκλιζόμενες μετατοπίσεις, η αντίστασή της μειώνεται δραστικά. Αν η εφελκυστική αντοχή ξεπεραστεί αστοχεί τοπικά με ψαθυρό τρόπο, καθώς δεν είναι σημαντική η ανακατανομή των τάσεων. Έτσι, περιορίζεται ο δυνατός αριθμός των ορόφων και αυξάνεται το κόστος κατασκευής, διότι απαιτούνται μεγάλες διατομές. Συνεπώς στην Ελλάδα, λόγω της αυξημένης σεισμικότητας προτιμούνται οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι της τοιχοποιίας. Αντίθετα, σε άλλες χώρες με χαμηλή σεισμικότητα η τοιχοποιία χρησιμοποιείται ευρέως. Οι κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία έχουν πλεονεκτήματα όπως, η απλότητα, η γρήγορη εκτέλεση και το χαμηλό κόστος κατασκευής.

2.2 ΕΙΔΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Οι τοιχοποιίες κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος των λιθοσωμάτων από τα οποία είναι δομημένες, τη λειτουργία τους στο φορέα και τον τρόπο δόμησης τους. Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική κατάταξη της τοιχοποιίας.

A) Ανάλογα με το είδος των λιθοσωμάτων

Τοιχοποιία από φυσικούς λίθους (Λιθοδομές)

Οι τοιχοποιίες αυτές δομούνται από φυσικούς λίθους, οι οποίοι μπορεί να έχουν υποστεί μικρό ή μεγάλο βαθμό επεξεργασίας για να αποκτήσουν κατάλληλο σχήμα, ώστε να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή. Επιπλέον, ανάλογα με το συνδετικό κονίαμα που χρησιμοποιείται διαχωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες.

- Ξηρολιθοδομή: αποτελείται από ακατέργαστους φυσικούς λίθους, χωρίς να συνδέονται μέσω κονιάματος.
- Λιθοδομή: η τοιχοποιία γενικότερα που αποτελείται από φυσικούς λίθους, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι με τη χρήση κονιάματος.
- Χυτή τοιχοποιία: κατασκευάζεται από πλαστικά μείγματα πηλού, κροκάλων και σκυροδέματος τα οποία καλυπώνονται και στη συνέχεια σκληραίνονται και προκύπτει ένα ενιαίο σύνολο τοίχου.

Τοιχοποιία από τεχνητούς λίθους (Πλινθοδομές)

- Ωμοπλινθοδομή: Κατασκευάζεται από ωμόπλινθους, δηλαδή άψητες χωματόπλιθες.
- Οπτοπλινθοδομή: Κατασκευάζεται από ψημένους πλίνθους (τούβλα).
- Τσιμεντοπλινθοδομή: Κατασκευάζεται από τσιμεντόλιθους.

B) Ανάλογα με τη λειτουργία της στο φορέα

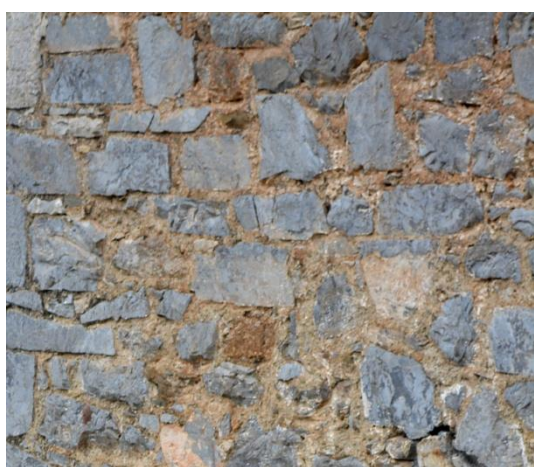
- Φέρουσα: είναι η τοιχοποιία που μεταφέρει τα φορτία του κτιρίου στο έδαφος.
- Πληρώσεως: είναι η τοιχοποιία που χρησιμοποιείται για να διαμορφωθούν οι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου και δε μεταφέρει φορτία.
- Αντιστήριξης: είναι η τοιχοποιία που στηρίζει γαιώδη πρηνή.
- Επένδυσης: είναι η τοιχοποιία που κατασκευάζεται για διακοσμητικούς λόγους και επικαλύπτει τους τοίχους.

Γ) Ανάλογα με τον τρόπο δόμησης της

- Δρομική, μπατική ή υπερμπατική.
- Συμπαγής, κοίλη ή με πυρήνα.
- Τρίστρωτη.

Παρακάτω παρατίθενται πιο αναλυτικά οι κατηγορίες των λιθοδομών, αφού θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία.

- Αργολιθοδομή: Η λιθοδομή που κατασκευάζεται από τελείως ακατέργαστους ή ελαφρά κατεργασμένους λίθους.
- Κροκαλολιθοδομή: Η λιθοδομή, η οποία αποτελείται από λίθους κροκαλοειδούς μορφής.
- Πλακολιθοδομή: Η λιθοδομή που αποτελείται από λίθους, όπου οι περισσότεροι έχουν κανονική μορφή.
- Ημιλαξευμένη: Η λιθοδομή που κατασκευάζεται από λίθους που έχουν υποστεί ημιεπεξεργασία.
- Λαξευμένη: Η λιθοδομή που αποτελείται από πλήρως κατεργασμένους λαξευτούς λίθους σε όλες τις έδρες τους.



(α)



(β)

Εικόνα 2.1: (α) Αργολιθοδομή (β) Λαξευμένη τοιχοποιία.

2.3 ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΒΥΖΑΝΤΙΝΩΝ ΕΚΚΛΗΣΙΩΝ

Οι βυζαντινές εκκλησίες ανήκουν στα λαμπρά κτίσματα που έχουν κατασκευαστεί από φέρουσα τοιχοποιία ανά τους αιώνες. Κατά τη διάρκεια της βυζαντινής εποχής οι τεχνικές των κατασκευών παρέμειναν σταθερές από περιοχή σε περιοχή με το πέρασμα του χρόνου, διότι βασιζόνταν στα τοπικά κατασκευαστικά υλικά και στη διαθεσιμότητά τους, καθώς και στις παραδοσιακές τεχνικές.

Τα τυπικά υλικά δόμησης της τοιχοποιίας στο Βυζάντιο ήταν οι φυσικοί λίθοι, οι πλίνθοι και το συνδετικό κονίαμα. Οι φυσικοί λίθοι ήταν συνήθως ασβεστόλιθοι ή αμμόλιθοι. Οι πλίνθοι παράγονταν από την ανάμιξη αργίλου και νερού, ενώ στο μίγμα πρόσθεταν άχυρο. Στη συνέχεια ξηραίνονταν και μετέπειτα ψήνονταν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Σύνηθες συνδετικό κονίαμα ήταν το ασβεστοκονίαμα, που συνίσταται από ασβέστη, άμμο και νερό και μέσα σε αυτό πολλές φορές έβαζαν και σπασμένους πλίνθους.



Εικόνα 2.2: Βυζαντινός ναός Αγίων Αποστόλων (Μοναστηράκι, Αθήνα).

Η φέρουσα τοιχοποιία ήταν τριστηρωτη, αποτελούνταν από δύο ξεχωριστές στρώσεις στις οποίες παρεμβάλλονταν ένας πυρήνας από σπασμένους λίθους και μεγάλη ποσότητα κονιάματος. Κάθε στρώση της τριστηρωτης τοιχοποιίας χτίζονταν από δύο διαφορετικούς τεχνίτες, οι οποίοι εφάρμοζαν διαφορετικές τεχνικές. Τα είδη τοιχοποιίας που παρατηρούνται κυρίως, είναι η αργολιθοδομή και η λαξευμένη ή ημιλαξευμένη τοιχοποιία. Στο εσωτερικό οι τοίχοι καλύπτονταν συνήθως από ορθομαρμάρωση, ενώ στο εξωτερικό επικρατούσε το πλινθοπερίκλειστο σύστημα δόμησης. Στο σύστημα αυτό δομούνταν οριζόντια λαξευμένοι ορθογώνιοι λίθοι, οι οποίοι περιστοιχίζονταν από πλίνθους και άφθονο κονίαμα. Επιπλέον, κατασκευάζονταν πολλές φορές πλίνθινες ζώνες κατά μήκος της τοιχοποιίας, οι οποίες είχαν ρόλο εφελκυστικό και βοηθούσαν στην καλύτερη κατανομή των κατακόρυφων φορτίων.

Εκτός αυτών, μέσα στη μάζα της τοιχοποιίας ήταν ενσωματωμένες και ζώνες ξυλείας, οι οποίες παραλάμβαναν εφελκυστικές τάσεις και λειτουργούσαν αντίστοιχα με τον οπλισμό στο σκυρόδεμα. Οι ζώνες αυτές ήταν τοποθετημένες σε διάφορα επίπεδα κατά μήκος και κατά πλάτος του τοίχου και δεν ήταν ορατές εξωτερικά. Ξύλα χρησιμοποιούνταν και για την κατασκευή καμπύλων στοιχείων, αλλά τοποθετούνταν και στο εσωτερικό των ναών και λειτουργούσαν σαν ξύλινοι ελκυστήρες. Συνεπώς, και το ξύλο αποτελούσε σημαντικό δομικό υλικό της εποχής, το οποίο συνέβαλλε στην ευστάθεια και στην αντισεισμικότητα του κτιρίου.

Για την κατασκευή των σταυροθολίων, των αφίδων, των καμαρών και των τρούλων χρησιμοποιούνταν υλικά ελαφρύτερα και χαμηλότερης αντοχής. Τέτοιο υλικό για παράδειγμα ήταν ο τραβερτίνης. Ευρέως διαδεδομένη ήταν για τη θολοδομία και η τεχνική της αμιγούς πλινθοδομής ή αλλιώς τεχνική της

κρυμμένης πλίνθου για αισθητικούς και οικονομικούς λόγους. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνταν πλίνθοι, οι οποίοι καλύπτονταν από ασβεστοκονίαμα. Έτσι ήταν αισθητικά άρτιο, αλλά οι πλίνθοι καλύπτονταν, οπότε πιθανόν να ήταν δεύτερης διαλογής.

Τέλος, το κτίριο εδράζονταν σε τεράστιες πλάκες θεμελίωσης, οι οποίες, όμως, αρκετές φορές τοποθετούνταν σε μη επαρκές βάθος. Συχνά, μετά από ανασκαφές ανακαλύπτονται προγενέστερα κτίρια στη θεμελίωση των οποίων έχουν εδραστεί τα βυζαντινά μνημεία.

3. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΡΗΓΟΡΗΤΙΣΣΑΣ

3.1 ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΩΝ ΧΩΡΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

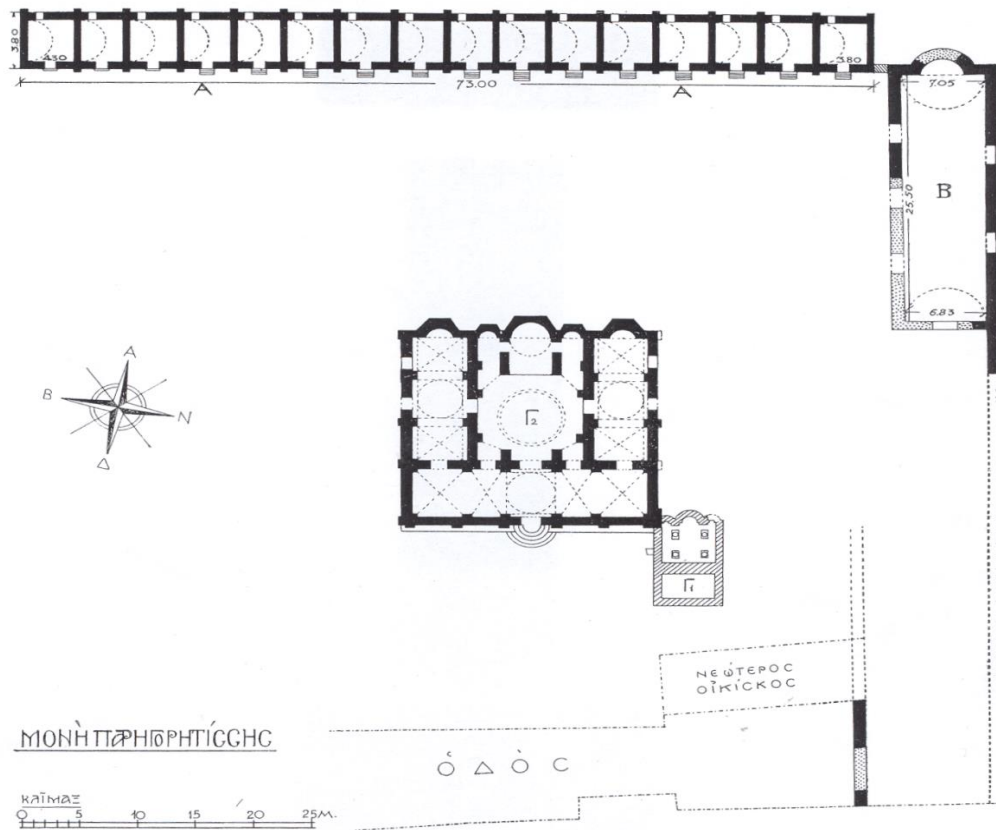
Η Παναγία η Παρηγορήτισσα είναι ο πιο σημαντικός και διάσημος ναός του νομού της Άρτας. Βρίσκεται στη δυτική πλαγιά του λόφου Περάνθης στο κέντρο της Άρτας και είναι το πρώτο εντυπωσιακό μνημείο, μετά το ιστορικό γεφύρι της Άρτας, που συναντά κάποιος επισκέπτης. Στον προαύλιο χώρο σώζονται σήμερα:

- Το καθολικό της μονής, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο και είναι πανταχόθεν ελεύθερο.
- Η Τράπεζα της μονής.
- Η ανατολική πτέρυγα των κελιών.

Επίσης, έχουν βρεθεί τα λείψανα παλαιότερου ναΐσκου στη ΝΔ γωνία του νεότερου ναού μετά από πρόχειρη ανασκαφή, τα οποία σήμερα εκτίθενται στο αρχαιολογικό μουσείο της Άρτας.



Εικόνα 3.1: Δορυφορική λήψη της Παναγίας Παρηγορήτισσας.



Εικόνα 3.2: Τοπογραφικό του ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας σχεδιασμένο από τον Α. Ορλάνδο.

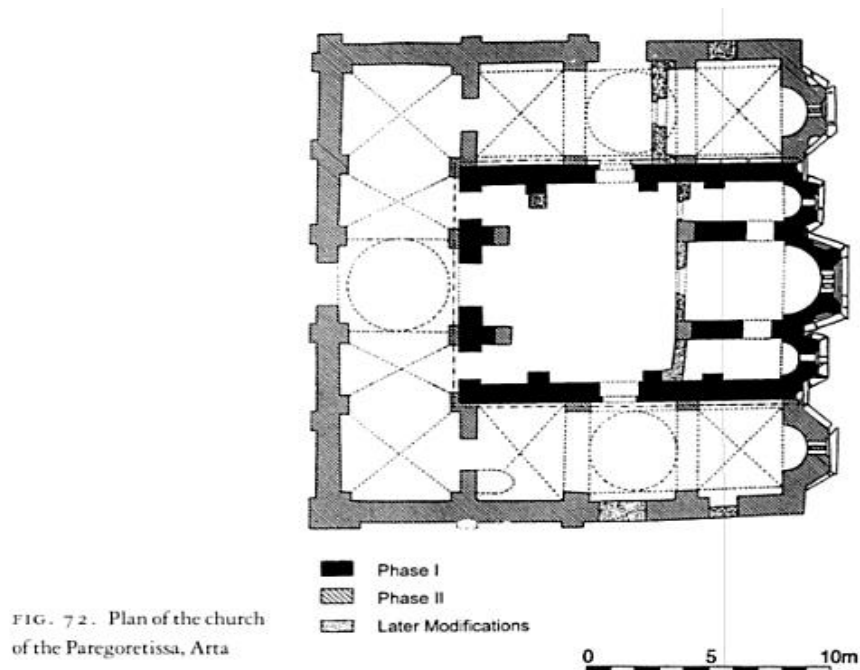
3. 2 ΧΡΟΝΙΚΟ ΚΑΙ ΦΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Η χρονολογία ανέγερσης και η διαδρομή του κτιρίου στους υστεροβυζαντινούς χρόνους δεν είναι γνωστές, καθώς απουσιάζουν ιστορικές μαρτυρίες. Η πρώτη αναφορά του μνημείου έγινε το 1578 μ.Χ. σε σιγγίλιο που έγραψε ο Πατριάρχης Ιερέμιος Β' από το οποίο πιστοποιείται ότι η Παναγία Παρηγορήτισσα αποτελούσε καθολικό γυναικείας μονής και μάλιστα σταυροπηγιακής. Ακόμη, πληροφορούμαστε ότι η Παρηγορήτισσα την εποχή εκείνη (1572-1595 μ.Χ.) είχε περιέλθει σε ερήμωση και φτώχεια και προσαρτήθηκε ως μετόχιο στη μονή της Κάτω Παναγιάς.

Στο εσωτερικό υπέρθυρο της δυτικής πόρτας του κυρίως ναού διασώζεται ελλιπής κτητορική επιγραφή από την οποία αποδεικνύεται ότι κτήτορες του ναού είναι ο Νικηφόρος Α' Κομνηνός Δούκας, η σύζυγός του Άννα Παλαιολόγου Καντακουζηνή και ο γιος τους Θωμάς. Λόγω της επιγραφής, αλλά και βάση τυπολογικών και τεχνοτροπικών κριτηρίων της αρχιτεκτονικής και της γλυπτικής ο Αναστάσιος Ορλάνδος υποστηρίζει ότι ο ναός θεμελιώθηκε μεταξύ 1283-1296 μ.Χ., περίοδο όπου όπως αναφέρθηκε η Άρτα ήταν πρωτεύουσα του Δεσποτάτου. Όπως, όμως, έχει επισημάνει πρώτος ο Γεώργιος Βελένης ο ναός χτίστηκε σε δύο φάσεις και η επιγραφή αφορά μόνο τη δεύτερη και τελική φάση ανέγερσης.

Ο Γ. Βελένης και η L.Theis έχουν προτείνει ότι ο ναός της Παρηγορήτισσας ξεκίνησε σαν ένας μικρός ναός σταυροειδούς εγγεγραμμένου τύπου ο οποίος μετέπειτα επεκτάθηκε. Η άποψη αυτή επιβεβαιώθηκε μετά από ανασκαφική έρευνα. Ο μικρότερος αυτός ναός κατασκευάστηκε επί Μιχαήλ Β' και χρονολογείται στα μέσα ή τις αρχές του δεύτερου μισού του 13^{ου} αιώνα, γύρω στο 1250 μ.Χ. Το σχέδιο άλλαξαν, αργότερα, ο Νικηφόρος και η σύζυγός του και δημιουργήθηκε το σημερινό μνημείο, το οποίο ήταν αντάξιο μιας πρωτεύουσας σε αίγλη.

Ο Γ. Βελένης και η L.Theis επισημαίνουν ότι στο πρωτότυπο σχέδιο δε συμπεριλαμβανόταν το περίστωο, αφού στην ανατολική όψη στους κατώτερους τοίχους είναι εμφανείς οι διαχωριστικοί αρμοί της τοιχοποιίας. Αντιθέτως, στο άνω επίπεδο είναι ενιαία η τοιχοποιία. Και άλλοι ερευνητές, όπως ο Κ. Τσουρής, η Β. Παπαδοπούλου, ο Ν. Μουτσόπουλος και ο Α. Ορλάνδος έχουν παρατηρήσει την ύπαρξη των διαχωριστικών αρμών στην ανατολική πλευρά. Αντίστοιχες αποδείξεις της αλλαγής του αρχικού σχεδίου υπάρχουν και στο εσωτερικό του κτιρίου, όπως στο δυτικό τοίχο του κύριου ναού όπου φαίνεται τοιχοποιία της πρώτης φάσης κατασκευής. Πιθανότατα, λοιπόν, αφού είχε ήδη ξεκινήσει η κατασκευή αποφασίστηκε να συμπεριληφθεί περίστωο σχήματος π και να γίνει διώροφο. Στην κάτοψη της Παρηγορήτισσας απεικονίζεται ο μικρότερος διαστάσεων ναός, ο οποίος αποτελεί τον πυρήνα του μεταγενέστερου και περιλαμβάνει το ιερό και τον κυρίως ναό.



Εικόνα 3.3: Κάτοψη της Παναγίας Παρηγορήτισσας, όπου απεικονίζονται οι φάσεις κατασκευής.

Μετά από την κατάκτηση της Άρτας από τους Οθωμανούς η Παρηγορήτισσα υπέστη πολλές φθορές, εξαιτίας των οποίων το εσωτερικό του ναού έχασε τη λαμπρότητά του. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της επανάστασης του 1821

χρησιμοποιήθηκε ως προμαχώνας. Αυτό πιστοποιείται και από τα απομνημονεύματα του Μακρυγιάννη, αλλά και από απεικονίσεις του ναού από περιηγητές, στις οποίες τα παράθυρα είναι φραγμένα.

Σήμερα, ο ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας είναι επισκέψιμος, αφού έχουν γίνει εργασίες αναστήλωσης από την Αρχαιολογική Υπηρεσία. Βέβαια, ακόμη υπάρχουν σημαντικές φθορές στο κτίριο. Στην αναστήλωση του έργου έχει συμβάλει σημαντικά ο Α. Ορλάνδος, ο οποίος δημοσίευσε αρχαιολογικό δελτίο το 1919. Από τότε επισκέφτηκε το ναό και εκτέλεσε εργασίες αποκατάστασης και στερέωσης του κτιρίου. Επίσης, αποτύπωσε το ναό και το 1963 εκδόθηκε βιβλίο από την Αρχαιολογική Εταιρεία για την Παναγία Παρηγορήτισσα με αναλυτικά σχέδια και λεπτομερείς πληροφορίες. Το μνημείο τώρα υπάγεται στη 18^η εφορία βυζαντινών αρχαιοτήτων της Άρτας του Υπουργείου Πολιτισμού και αποτελεί ένα από τα πιο εντυπωσιακά αξιοθέατα της Άρτας.

3.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

3.3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή του κτιρίου της Παρηγορήτισσας. Πρώτα παρουσιάζεται το εξωτερικό του ναού και στη συνέχεια το εσωτερικό, όπου δίνεται έμφαση στο σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου, που είναι το πιο εντυπωσιακό κομμάτι της εκκλησίας. Οι παρακάτω πληροφορίες βασίζονται στο βιβλίο του Αναστάσιου Ορλάνδου “*Η Παρηγορήτισσα της Άρτης*”, αλλά και στην επιτόπια έρευνα στο ναό.

3.3.2 Εξωτερική εμφάνιση του κτιρίου

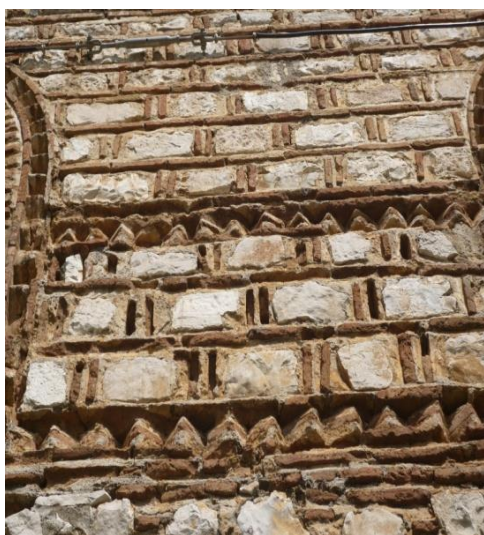


Εικόνα 3.4: Εξωτερικό του ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας.

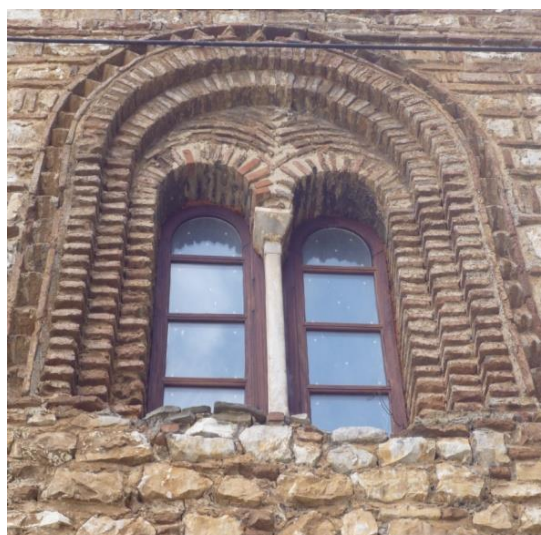
Ο ογκώδης ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας έχει κυβικό σχήμα και στην ανατολική του πλευρά φέρει πέντε υψηλές τρίπλευρες κόγχες. Στην οροφή φέρει συνολικά έξι τρούλους, ένα μεγάλο κεντρικό, τέσσερεις μικρότερους

περιμετρικούς και τέλος έναν ελαφρύτερο κιονοστήρικτο ουρανίσκο στο μέσο της δυτικής πλευράς.

Το σώμα του κτιρίου εξωτερικά χωρίζεται σε τρεις ζώνες. Η κατώτατη ζώνη ύψους περίπου πέντε μέτρα αποτελείται από μικρούς λίθους και πλίνθους ακανόνιστα δομημένους (αργολιθοδομή). Οι δύο ψηλότερες επάλληλες ζώνες είναι κτισμένες με το πλινθοπερίκλειστο σύστημα δόμησης και διακόπτονται από δεκατρία τοξωτά δίλοβα παράθυρα, τέσσερα στις πλάγιες πλευρές και πέντε στη δυτική πλευρά. Το ύψος των λίθων δεν είναι ίδιο σε κάθε στάθμη και μπορεί και να αλλάζει όταν παρεμβάλλονται τα παράθυρα. Κάθε ζώνη χωρίζεται από μία σειρά οριζόντιων πλίνθων τοποθετημένων λοξά μέσα στον τοίχο, η οποία ακολουθεί το καμπύλο σχήμα των παραθύρων. Κάθε παράθυρο περιβάλλεται, επιπλέον, από άλλες δύο σειρές πλίνθων μία μικρότερου και μία μεγαλύτερου πάχους, που σχηματίζουν τις χαρακτηριστικές οδοντωτές ταινίες. Στην κάτω ζώνη του ναού υπήρχαν πέντε πόρτες, η κύρια είσοδος στη δυτική πλευρά και δύο πόρτες στη βόρεια και νότια πλευρά. Από αυτές μόνο δύο δεν έχουν φραχθεί, η κεντρική είσοδος και η μία στην βόρεια πλευρά.



(α)



(β)

Εικόνα 3.5: (α) Πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία (β) Δίλοβο παράθυρο.

Περιμετρικά του κτιρίου εξέχουν αντηρίδες, οι οποίες, όμως, δεν έχουν ιδιαίτερη στατική σημασία. Σύμφωνα με τον Ορλάνδο το πιθανότερο είναι να είχαν προβλεφθεί για να στηρίξουν τη στέγη εξωτερικής στοάς, η οποία δε γνωρίζουμε αν εντέλει κατασκευάστηκε. Η υπόθεση γίνεται σχεδόν βεβαιότητα και από το γεγονός ότι τα κατώτερα παράθυρα έχουν τοποθετηθεί πολύ υψηλότερα από το εσωτερικό δάπεδο, σε ύψος 4,35 μέτρα.

Στην πλευρά του ιερού, από την άλλη, δε γίνεται διαχωρισμός σε ζώνες, καθώς επικρατεί παντού το πλινθοπερίκλειστο σύστημα. Ο τοίχος κοσμεύεται από πολλά παράθυρα, κόγχες και άλλα πλίνθινα διακοσμητικά στοιχεία.

Χαρακτηριστικό είναι το τρίλοβο παράθυρο που υπάρχει ακριβώς πίσω από το ιερό.



Εικόνα 3.6: Ανατολική πλευρά του ναού.

Η στέγη υψώνεται πυραμιδοειδώς από τις τέσσερις γωνίες προς το κέντρο του κτιρίου και διακόπτεται από τη μεγάλη τετραγωνική βάση του κεντρικού τρούλου. Τη βάση αυτή περιβάλλουν τέσσερις ορθογώνιες εξοχές με δίκλινη σκεπή, μέσα από τις οποίες δημιουργείται το σχήμα του σταυρού εξωτερικά. Η στέγη καλύπτεται από κεραμίδια, όπως και οι σκεπές των τρούλων και των ορθογώνιων εξοχών.

Τέλος, οι τρούλοι κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου από πλίνθους με εξαίρεση τον βορειοανατολικό, που έχει ενισχυθεί με πωρόλιθους. Οι τέσσερις γωνιακοί τρούλοι έχουν διάμετρο εσωτερική περίπου 4μ. και εξωτερικά έχουν οκταγωνικό σχήμα, με πλευρά περίπου δύο μέτρα. Ο κεντρικός τρούλος έχει διάμετρο 5,8 μ. και είναι δωδεκάπλευρος. Μικρά τοξωτά παράθυρα διαπερνούν τις πλευρές των τρούλων. Ο ανοιχτός ουρανίσκος της πρόσοψης στηρίζεται σε οκτώ μαρμάρινους κίονες που έχουν σχήμα $\frac{3}{4}$ κύκλου προσκολλημένου σε ορθογώνια ουρά, οι οποίοι είναι εντοιχισμένοι μέσα στη στέγη. Επειδή οι κίονες είναι εντοιχισμένοι, αλλά και διότι καλύπτεται μέρος των τρούλων από τη στέγη ο Α. Ορλάνδος θεωρεί ότι μπορεί να είχε προβλεφθεί οριζόντια η στέγη και μετέπειτα να έγινε κεκλιμένη, ίσως λόγω διαρροής για να απομακρύνονται τα ύδατα.



Εικόνα 3.7: Η στέγη και οι τρούλοι του ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας.

3.3.3 Το εσωτερικό του καθολικού

Ο ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας φέρει διώροφο περίστωο σχήματος πι, γύρω από τον κυρίως ναό. Στο ισόγειο βρίσκεται ο νάρθηκας του ναού και δύο παρεκκλήσια και στον άνω όροφο βρίσκεται ο γυναικωνίτης.

Νάρθηκας και παρεκκλήσια

Διερχόμενοι της κεντρικής εισόδου του ναού, συναντάμε το νάρθηκα διαστάσεων 4,95μ. X 20,3μ. Ο νάρθηκας διαχωρίζεται σε πέντε διαμερίσματα με τη βοήθεια παραστάδων εξοχής 0,35μ. Τα ζεύγη παραστάδων που υπάρχουν στις πλευρές του νάρθηκα στηρίζουν τέσσερα σταυροθόλια και ένα ρηχό ημισφαιρικό θόλο, τα οποία καλύπτουν την οροφή. Η είσοδος στον κύριο ναό μπορεί να γίνει από το νάρθηκα μέσω τρίβηλου από τρεις διαφορετικές πόρτες.

Μέσω του νάρθηκα, μπορούμε να μπούμε και στα δύο παρεκκλήσια, το βόρειο και το νότιο, καθώς υπάρχει πόρτα που τα συνδέει. Τα παρεκκλήσια είναι συμμετρικά με διαστάσεις 12,5μ. X 4,65μ. Στην ανατολική πλευρά τους καταλήγουν σε ημικυκλική κόγχη, που καλύπτεται εξωτερικά από τρίπλευρη αφίδα. Όπως και ο νάρθηκας φέρουν ζεύγη παραστάδων και χωρίζονται σε τρία διαμερίσματα. Η μόνη διαφορά είναι ότι στα παρεκκλήσια υπάρχουν και σφενδόνια, τα οποία βοηθούν στη στήριξη των θόλων. Από τα τρία διαμερίσματα στα δύο ακραία σχηματίζονται σταυροθόλια, ενώ στο μέσο σχηματίζεται σφαιρικό τμήμα στην οροφή. Η σύνδεση των παρεκκλησίων με τον κυρίως ναό γίνεται μέσω μίας πόρτας. Στο βόρειο παρεκκλήσι παρεμβάλλεται τοίχος μικρού πάχους περίπου στη μέση του μεσαίου διαμερίσματος.



Εικόνα 3.8: Σταυροθόλιο διαμερίσματος του νάρθηκα.



Εικόνα 3.9: Τοίχος που παρεμβάλλεται σε διαμέρισμα του βόρειου παρεκκλησίου.

Κάθε διαμέρισμα του νάρθηκα και των παρεκκλησίων διατρυπείται στο μέσο από το τοξωτό δίλοβο παράθυρο, που αγγίζει σχεδόν την οροφή του. Όπως έχει αναφερθεί τα παράθυρα έχουν τοποθετηθεί σε πολύ μεγάλο ύψος.

Γυναικωνίτης

Η πρόσβαση στο γυναικωνίτη δεν είναι εφικτή, διότι δεν υπάρχει τρόπος ανόδου στον άνω όροφο. Ή ήταν εξωτερική, ή παραλείφθηκε στο σχεδιασμό του κτιρίου. Ο Α. Ορλάνδος τον επισκέφτηκε μέσω μιας οπής στην οροφή του νότιου παρεκκλησίου και έτσι οι πληροφορίες που έχουμε είναι μόνο από το βιβλίο του και όχι από προσωπική παρατήρηση.

Ο συνεχής γυναικωνίτης σχήματος πι φέρει ,επίσης, ζεύγη παραστάδων που τον κατανέμουν σε έντεκα διαμερίσματα. Τα τέσσερα γωνιακά, όπως και το μεσαίο, καλύπτονται από τους τέσσερις περιμετρικούς τρούλους, οι οποίοι στηρίζονται μέσω τεσσάρων σφαιρικών τριγώνων στις παραστάδες. Άλλα δύο σχηματίζουν ασπίδες στην οροφή και άλλα τέσσερα έχουν υπερυψωμένα σταυροθόλια στην οροφή. Η στήριξη των σταυροθολίων και των ασπίδων επιτυγχάνεται και με την παρεμβολή σφενδονίων όπως και στα παρεκκλήσια. Ακόμη, στις ανατολικές του πλευρές και ο γυναικωνίτης καταλήγει σε ημικυκλικές κόγχες, που καλύπτονται και αυτές από την εξωτερική τρίπλευρη ασπίδα. Κάθε διαμέρισμα και πάλι διαπερνάται στο μέσο του από τοξωτό παράθυρο.

Οπτική επαφή του κυρίως ναού από το γυναικωνίτη γίνεται μέσα από τρία μεγάλα δίβηλα παράθυρα, τα οποία βρίσκονται στο μέσο των εσωτερικών πλευρών του γυναικωνίτη. Κάθε δίβηλο παράθυρο διαχωρίζεται από μαρμάρινο κίονα.

Αξιοπεριεργο είναι ότι οι παραστάδες του άνω ορόφου δεν συμπίπτουν καθ' ύψος με τις παραστάδες του κάτω. Λόγω αυτού δε συμπίπτουν και οι κατακόρυφοι άξονες των παραθύρων. Ο Α. Ορλάνδος θεωρεί πιθανό ότι ο πρωτομάστορας δεν προέβλεψε εξαρχής πως θα στηριχτούν οι γωνιακοί τρούλοι, με αποτέλεσμα να αλλάξουν οι διαστάσεις των διαμερισμάτων.

Κυρίως ναός

Ο κυρίως ναός έχει τετραγωνική κάτοψη με διαστάσεις 9,15μ. Χ 9,2μ. και περικλείεται από το νάρθηκα, τα παρεκκλήσια και το γυναικωνίτη.

Ιερό

Στο ανατολικό τμήμα του κυρίως ναού βρίσκεται το ιερό. Το ιερό διαχωρίζεται μέσω δύο τοίχων σε τρία τμήματα, τα οποία επικοινωνούν μέσω υψηλών τοξωτών θυρών. Στην οροφή των τριών αυτών διαμερισμάτων σχηματίζονται τρεις καμάρες, από τις οποίες η κεντρική είναι σε υψηλότερο επίπεδο. Ακόμη, στην ανατολική πλευρά κάθε τμήματος υπάρχουν ημικυκλικές κόγχες, που καλύπτονται εξωτερικά από τις τρίπλευρες ασπίδες. Η κεντρική ημικυκλική κόγχη είναι ψηλότερη και διαπερνάται από το τρίλοβο παράθυρο. Το ιερό χωρίζεται από το κεντρικό τμήμα του κυρίως ναού μέσα από ένα χαμηλό τοίχο μικρού πάχους.



Εικόνα 3.10: Κυρίως ναός Παναγίας Παρηγορήτισσας.

Σύστημα στήριξης κεντρικού τρούλου

Το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου προκαλεί δέος και λόγω αρχιτεκτονικής κομψότητας, και λόγω ιδιαίτερου στατικού συστήματος. Ο τρούλος στηρίζεται στις τρεις πλευρές του κυρίως ναού και στους δύο τοίχους που διαχωρίζουν το ιερό στην ανατολική πλευρά. Οι τρεις πλευρές του κυρίως ναού φέρουν ζεύγη παραστάδων, διαφορετικού μεγέθους εξοχών. Αρχικά ήταν ίσες σε μέγεθος, αλλά μετά από τις επεμβάσεις που διενεργήθηκαν από τον Α. Ορλάνδο έγιναν ανομοιομορφες.

Σε κάθε ζεύγος παραστάδων υπάρχουν ζεύγη οριζόντιων μικρών προβόλων, οι οποίοι διαπερνούν τον τοίχο σε όλο του το πάχος, οπότε και πακτώνονται σε αυτόν. Αντίστοιχα ζεύγος οριζόντιων προβόλων υπάρχει στους τοίχους του ιερού. Πάνω σε κάθε ζεύγος οριζόντιων προβόλων έχουν εδραστεί μαρμαρίνοι κίονες, οι οποίοι στηρίζουν δεύτερη σειρά οριζόντιων προβόλων, που είναι κι αυτοί πακτωμένοι μέσα στους τοίχους. Οι πρόβολοι αυτοί έχουν μεγαλύτερο μήκος από τους πρώτους και στην άκρη τους εδράζεται δεύτερη σειρά μαρμαρινών κίωνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κίονες να εξέχουν πολύ περισσότερο προς το εσωτερικό του κυρίως ναού.

Δημιουργήθηκαν, έτσι, τέσσερα ζεύγη κίωνων από τα οποία το καθένα στήριξε μία καμάρα. Οι καμάρες συγκρατούνται και από δύο ξύλινους ελκυστήρες που βρίσκονται σε διαφορετικές στάθμες. Στις καμάρες αυτές εδράστηκε η τετραγωνική βάση του κεντρικού τρούλου και τελικά σχηματίστηκαν τέσσερα σφαιρικά τρίγωνα στις γωνίες της βάσης. Από τις τέσσερις άνω γωνίες του

κυρίως ναού, οι δύο ανατολικές στεγάστηκαν με κυλινδρικές καμάρες και οι δύο δυτικές με ημισφαιρικούς θόλους.



Εικόνα 3.11: Σύστημα στήριξης κεντρικού τρούλου.



Εικόνα 3.12: Άνοψη συστήματος στήριξης κεντρικού τρούλου.

Οι οριζόντιοι πρόβολοι αποτελούνταν από δύο οριζόντιους μαρμάρινους κίονες. Σήμερα, όμως, οι πέντε από αυτούς είναι ορθογώνιοι και οι περισσότεροι έχουν αντικατασταθεί. Οι αλλαγές αυτές έγιναν διότι οι πιο

πολλοί κίονες και πρόβολοι είχαν διαρραγεί λόγω υποδιαστασιολόγησης και επιδιορθώθηκαν από τον Α. Ορλάνδο.

Η Παρηγορήτισσα αποτελεί ιδιαίτερο τύπο ναού, λόγω του συστήματος στήριξης του κεντρικού τρούλου. Αυτό ισχύει γιατί ενώ στην κάτοψη ακολουθεί τον οκταγωνικό τύπο βυζαντινού ναού, στην άνοψη μετασχηματίζεται σε σταυροειδή εγγεγραμμένο ναό με τρούλο. Αν ο ναός είχε κατασκευαστεί βάσει του οκταγωνικού τύπου ο κεντρικός τρούλος θα είχε πολύ μεγάλη διάμετρο και θα φαινόταν πολύ βαρύς εξωτερικά. Από την άλλη, αν είχε χτιστεί βάσει του σταυροειδούς εγγεγραμμένου τύπου τα στηρίγματα του τρούλου θα έπαιρναν χώρο από το εσωτερικό του κυρίως ναού. Για να επιτύχει, λοιπόν, ο πρωτομάστορας μικρότερη διάμετρο τρούλου και καλύτερη αξιοποίηση του χώρου εφάρμοσε το τολμηρό σύστημα στήριξης που περιγράφηκε παραπάνω.

Υλικά δόμησης εσωτερικού του κτιρίου

Τοίχοι

Η τοιχοποιία με την οποία έχει δομηθεί η Παρηγορήτισσα είναι τρίστρωτη. Έτσι, το εσωτερικό των εξωτερικών τοίχων καλύπτεται από αργολιθοδομή ανεξάρτητα από την εξωτερική τοιχοποιία. Από την άλλη, η τοιχοποιία του κυρίως ναού είναι καλά δομημένη από μικρότερους φυσικούς λίθους και φαίνεται ότι έχει καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, ειδικά η τοιχοποιία στο ισόγειο του κυρίως ναού.

Θολοδομία

Αμιγής πλινθοδομή έχει εφαρμοστεί για να κατασκευαστούν τα σταυροθόλια και οι ασπίδες. Οι καμάρες και οι κόγχες στο εσωτερικό του κυρίως ναού έχουν δομηθεί από ελαφρύτερο πέτρωμα, μικρότερης αντοχής, όπως σχιστόλιθους ή τραβερτίνες.

3.4 ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Οι σημαντικότερες φθορές στο ναό έγιναν κατά τη διάρκεια της Τουρκοκρατίας. Πιο αναλυτικά, αφαιρέθηκε η μαρμάρινη στρώση του τοιχοβάτη και πλέον ίχνη της διακοσμημένης ορθομαρμάρωσης έχουν διασωθεί μόνο στο κατώτερο τμήμα των εσωτερικών τοίχων. Εκτός αυτού, επί Τουρκοκρατίας καταστράφηκε σχεδόν ολοσχερώς το δάπεδο, το οποίο κοσμούσαν με πολύχρωμες, πιθανότατα μαρμάρινες, πλάκες, καθώς οι Οθωμανοί είχαν μετατρέψει την Παρηγορήτισσα σε στάβλο. Τέλος, αφαιρέθηκαν πολλοί κίονες, τους οποίους οι Οθωμανοί σκόπευαν να τους χρησιμοποιήσουν για να κατασκευάσουν τζαμί. Το γεγονός αυτό, λογικά, συντέλεσε στην αστοχία του στατικού συστήματος του κεντρικού τρούλου του ναού.

Το ναό μελέτησε ο Αναστάσιος Ορλάνδος, ο οποίος βοήθησε στην κατασκευή ειδικού σιδηρού ικριώματος, το οποίο είναι τοποθετημένο μέχρι σήμερα στο πίσω μέρος του εξωτερικού του κτιρίου. Επίσης, αποκατέστησε τα κελιά και την τράπεζα της μονής, όπως και τα παράθυρα του ναού και το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε ο καθαρισμός μέσω ελαιοχρωματισμού των παραμορφωμένων ψηφιδωτών παραστάσεων του τρούλου από το συντηρητή ζωγράφο Φ. Ζαχαρίου.

Εργασίες αποκατάστασης συνεχίστηκαν και αργότερα, για την ακρίβεια έγιναν τομές στο δάπεδο του κυρίως ναού το 1989. Το 1977 αντικαταστάθηκε η ξύλινη θύρα της δυτικής πλευράς, συμπληρώθηκε η ηλεκτρική εγκατάσταση και συντηρήθηκαν τα κελιά. Το 1991 στερεώθηκε εσωτερικώς η ΝΔ πλευρά του ναού και συντηρήθηκε μέρος των τοιχογραφιών. Από την δεκαετία του '90 διενεργούνται επίσης κατά περιόδους και ανασκαφικές έρευνες στον περίβολο του ναού.

Σήμερα, ακόμη η εκκλησία έχει αρκετά προβλήματα, τα οποία είναι εμφανή στον επισκέπτη. Στο εσωτερικό του κτιρίου διαπιστώνονται διαμπερείς ρωγμές μεγάλους εύρους σχεδόν συνεχείς, οι οποίες διατρέχουν τους θόλους, τα σταυροθόλια και τα σφενδόνια στα διαμερίσματα του ναού. Επίσης, απουσιάζουν πλήρως οι ξύλινοι ελκυστήρες που προϋπήρχαν γεγονός που αποδεικνύεται από τα ίχνη του κονιάματος με το οποίο ήταν εγκιβωτισμένοι. Από την επιτόπια παρατήρηση φαίνεται ότι στις οροφές των διαμερισμάτων του νάρθηκα και των παρεκκλησίων έχει προστεθεί ασβεστοκονίαμα. Επίσης, στα τόξα των παραπάνω διαμερισμάτων έχουν τοποθετηθεί ξύλινοι ελκυστήρες και στα διαμερίσματα του νάρθηκα υπάρχουν δικτυώματα που τα συγκρατούν. Είναι φανερό, ακόμη, ότι έχουν γίνει επεμβάσεις στις παραστάδες και στη δυτική πλευρά της τοιχοποιίας του εσωτερικού του κυρίως ναού, όπως και στους οριζόντιους προβόλους.



Εικόνα 3.13: Τοίχος του νάρθηκα όπου υπάρχει διαμπερής ρωγμή.

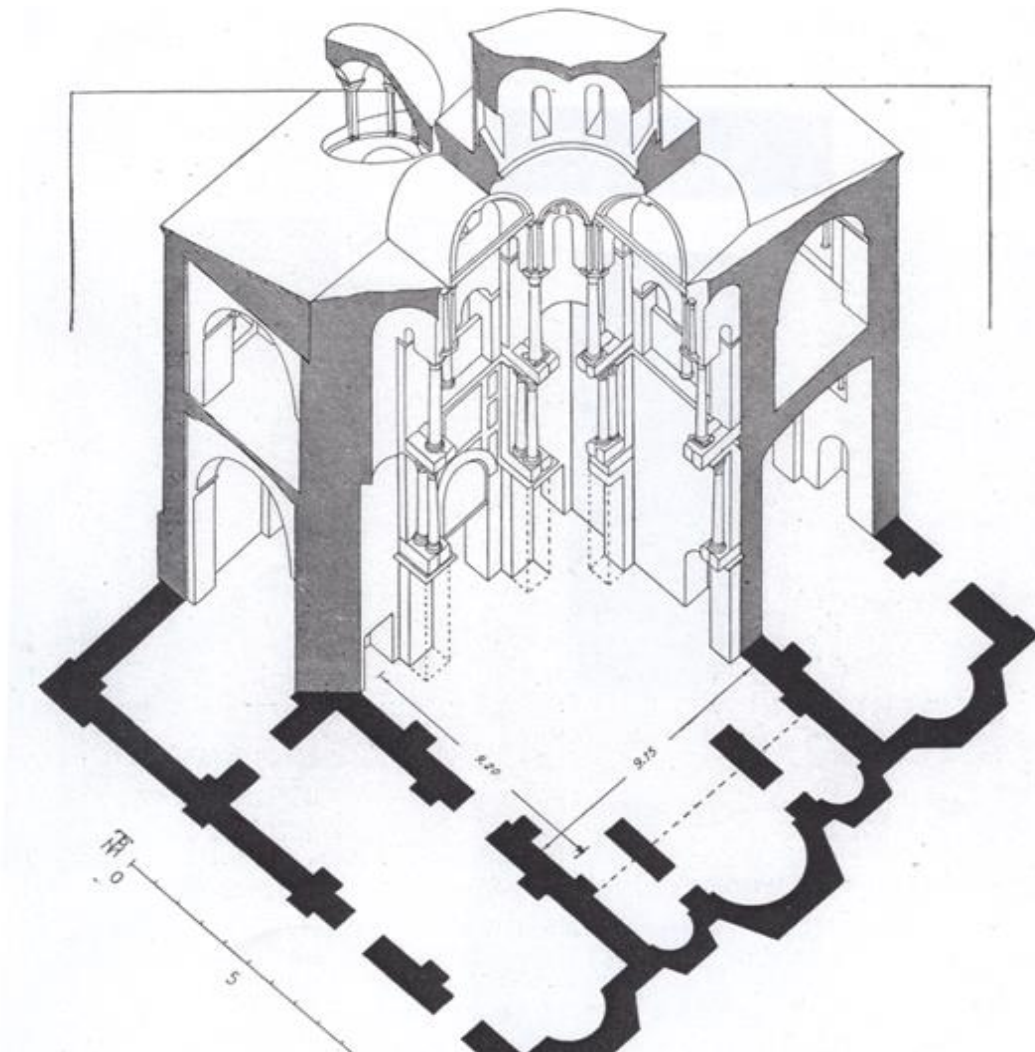
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

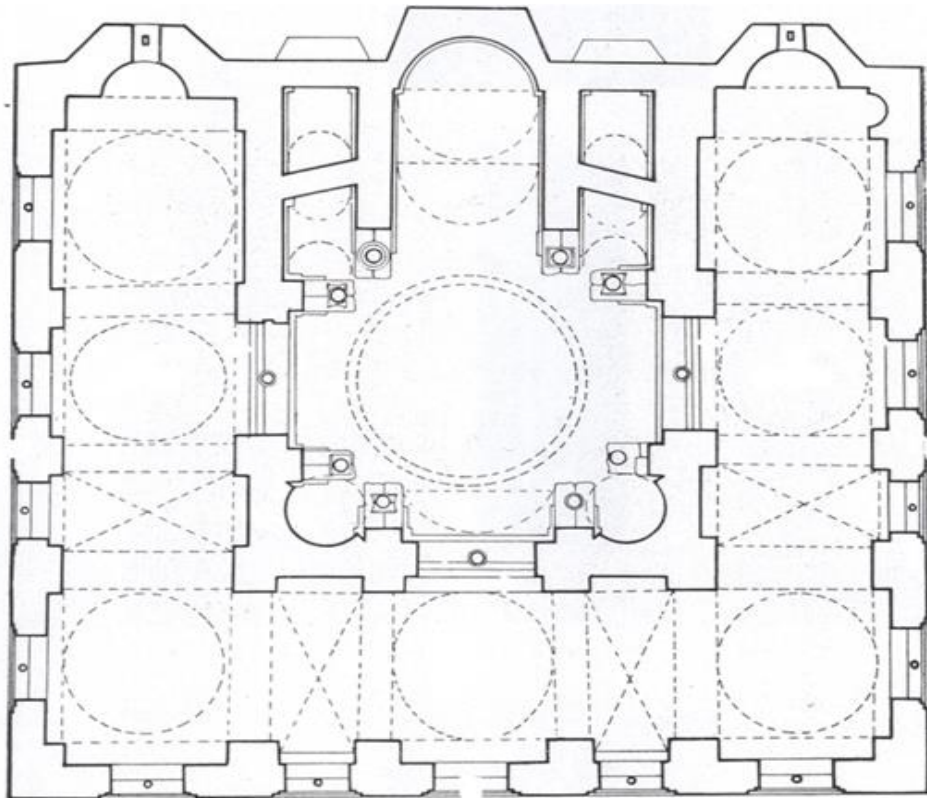
Πρώτο σημαντικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση του ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας σε τρισδιάστατη μορφή. Εργαλείο για την εργασία αυτή ήταν το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD. Το σχέδιο έγινε με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και λεπτομέρεια βάσει των σχεδίων του Α. Ορλάνδου.

Όπως έχει αναφερθεί ο Αναστάσιος Ορλάνδος αποτύπωσε την εκκλησία και στο βιβλίο “Η Παρηγορήτισσα της Άρτης” που εκδόθηκε από την Αρχαιολογική Εταιρεία το 1963 υπάρχουν αναλυτικά σχέδια του ναού υπό κλίμακα. Έγιναν, όμως κάποιες μετρήσεις με τη χρήση τηλέμετρου, ώστε να εξακριβωθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων του Α. Ορλάνδου, οι οποίες φαίνεται ότι είναι αρκετά ακριβείς αν σκεφτεί κανείς την εποχή που διενεργήθηκαν.

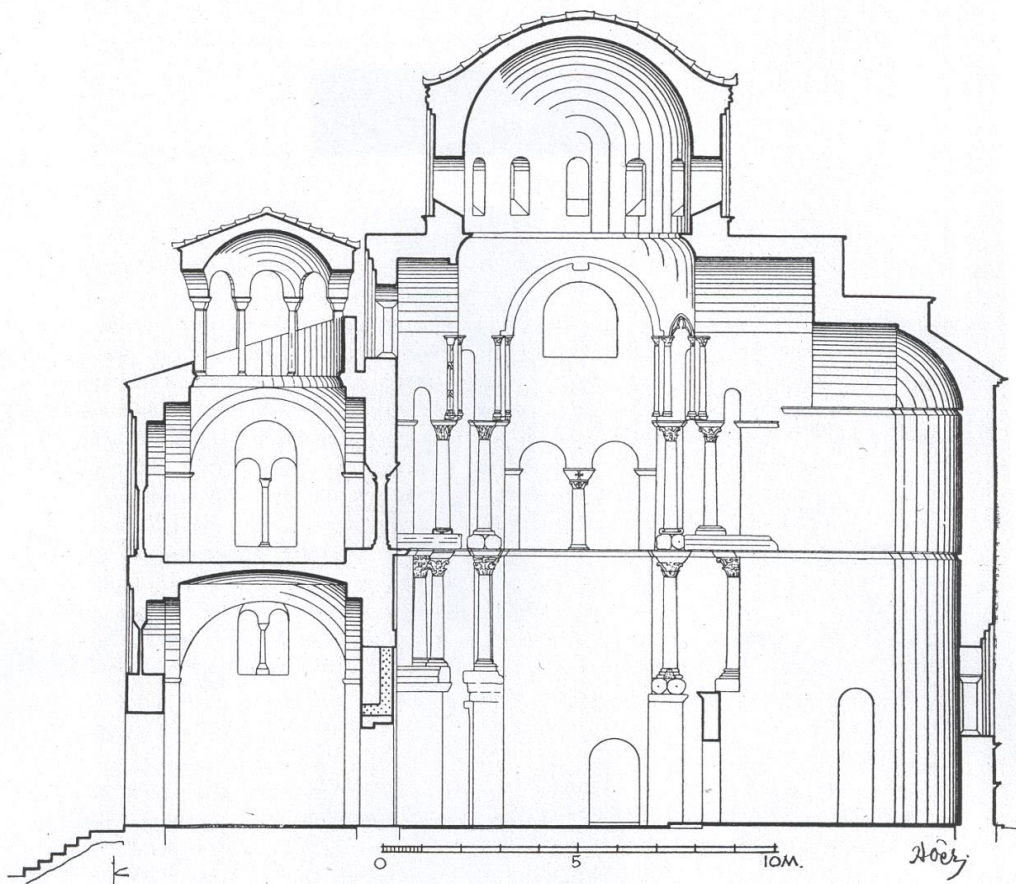
Παρακάτω απεικονίζονται κάποια από τα σχέδια του Α. Ορλάνδου.



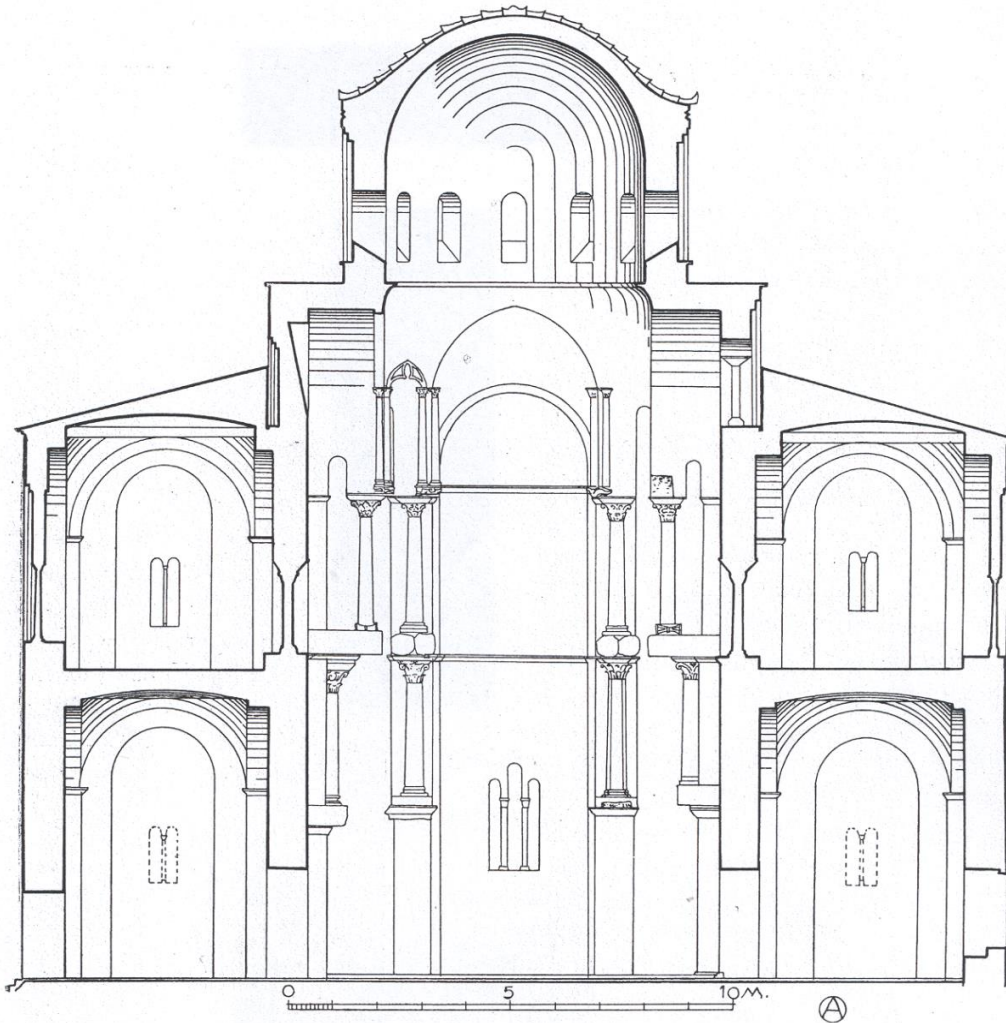
Εικόνα 4.1: Ισομετρική προβολή του εσωτερικού του καθολικού.



Εικόνα 4.2: Κάτοψη του γυναικωνίτη.



Εικόνα 4.3: Κατά μήκος τομή του καθολικού με όψη προς Βορρά.



Εικόνα 4.4: Κατά πλάτος τομή του καθολικού με όψη προς Ανατολή.

4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΤΟΛΕΣ ΤΟΥ AUTOCAD 3D

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο AutoCAD για τον σχεδιασμό του κτιρίου. Όλα τα στοιχεία σχεδιάστηκαν ως τρισδιάστατα στερεά (Solids) με τη βοήθεια συνεχών γραμμών (Polylines).

- Extrude: Δημιουργείται ένα στερεό από ένα υπάρχον δισδιάστατο στοιχείο.
- Subtract: Αφαιρείται από ένα στερεό ένα άλλο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σύνθετου στερεού.
- Intersect: Δημιουργείται ένα σύνθετο στερεό από συμβολή υπαρχόντων στερεών.
- Revolve: Περιστρέφεται ένα δισδιάστατο στοιχείο γύρω από έναν άξονα, ώστε σχηματίζεται ένα στερεό.
- Loft: Ενώνονται δύο δισδιάστατα στοιχεία και σχηματίζεται ένα στερεό.

- Union: Ενώνονται δύο στερεά.
- Slice: Κόβονται δύο στερεά.
- Fillet edge: Η ακμή ενός στερεού γίνεται καμπύλη.
- Polar Array: Από ένα υπάρχον στερεό δημιουργούνται κι άλλα γύρω από έναν άξονα.
- 3D Orbit: Περιστρέφεται εύκολα το μοντέλο στο χώρο.

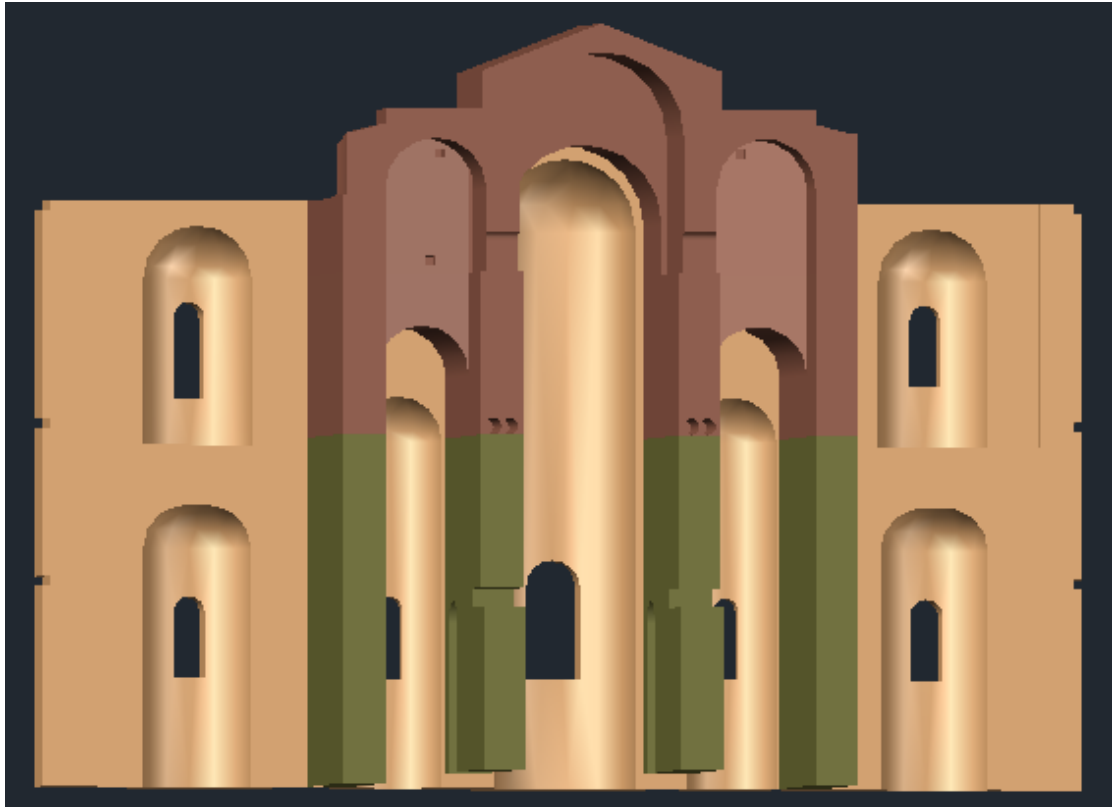
4.3 ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Παρακάτω θα παρουσιαστεί η αλληλουχία των βημάτων και το σκεπτικό που ακολουθήθηκε ώστε να επιτευχθεί ο τρισδιάστατος σχεδιασμός του κτιρίου. Οι αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες έχουν αμεληθεί, επειδή δεν έχουν στατική σημασία.

Αρχικά, σχεδιάστηκαν στο Autocad οι κατόψεις του ισογείου και του πρώτου ορόφου του ναού. Οι κατόψεις αποτέλεσαν οδηγό και μέσο επαλήθευσης όσων σχεδιάστηκαν στην συνέχεια. Έπειτα, με την εντολή Extrude σχηματίστηκαν οι περιμετρικοί και εσωτερικοί τοίχοι, καθώς και τα ανοίγματα των τοίχων, τα οποία αφαιρέθηκαν από τους τοίχους με την εντολή Subtract. Ακόμη, σχηματίστηκαν οι κόγχες των εσωτερικών τοίχων, με την αφαίρεση ενός κυλίνδρου που έγινε ημισφαιρικός στην κορυφή μέσω της εντολής Fillet Edge. Τέλος, έγιναν οι σκεπές των τρίπλευρων αψίδων στο εξωτερικό με την εντολή Loft.

Επόμενο βήμα ήταν ο σχεδιασμός του νάρθηκα και των παρεκκλησίων, πάνω στα οποία πάτησε ο γυναικωνίτης. Στο νάρθηκα, στα παρεκκλήσια και στο γυναικωνίτη κάθε διαμέρισμά σχεδιάστηκε ξεχωριστά, ώστε να σχηματιστούν οι θόλοι των οροφών των διαμερισμάτων. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται κάθε θόλος αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, σχεδιάστηκαν τα εσωτερικά δίβηλα παράθυρα του κυρίως ναού, που μετά αφαιρέθηκαν.

Ακολούθως, σχηματίστηκαν με την εντολή Extrude οι παραστάδες στους εσωτερικούς τοίχους του κυρίως ναού και οι διαχωριστικοί τοίχοι του ιερού. Πάνω στους τοίχους του ιερού σχεδιάστηκαν οι τρεις καμάρες που παρεμβάλλονται. Για το σχηματισμό των καμαρών έγιναν κύλινδροι με διάμετρο όση η απόσταση των τοίχων, τοποθετήθηκαν στο επιθυμητό ύψος και μετά αφαιρέθηκαν. Στις καμάρες αυτές στηρίχτηκαν τοίχοι, οι οποίοι ενώθηκαν με τους εσωτερικούς τοίχους του κυρίως ναού. Ένα μέρος των διαχωριστικών τοίχων του ιερού έγινε πιο ψηλό και σχεδιάστηκαν δύο ακόμη καμάρες στο πλάι σε υψηλότερο επίπεδο.

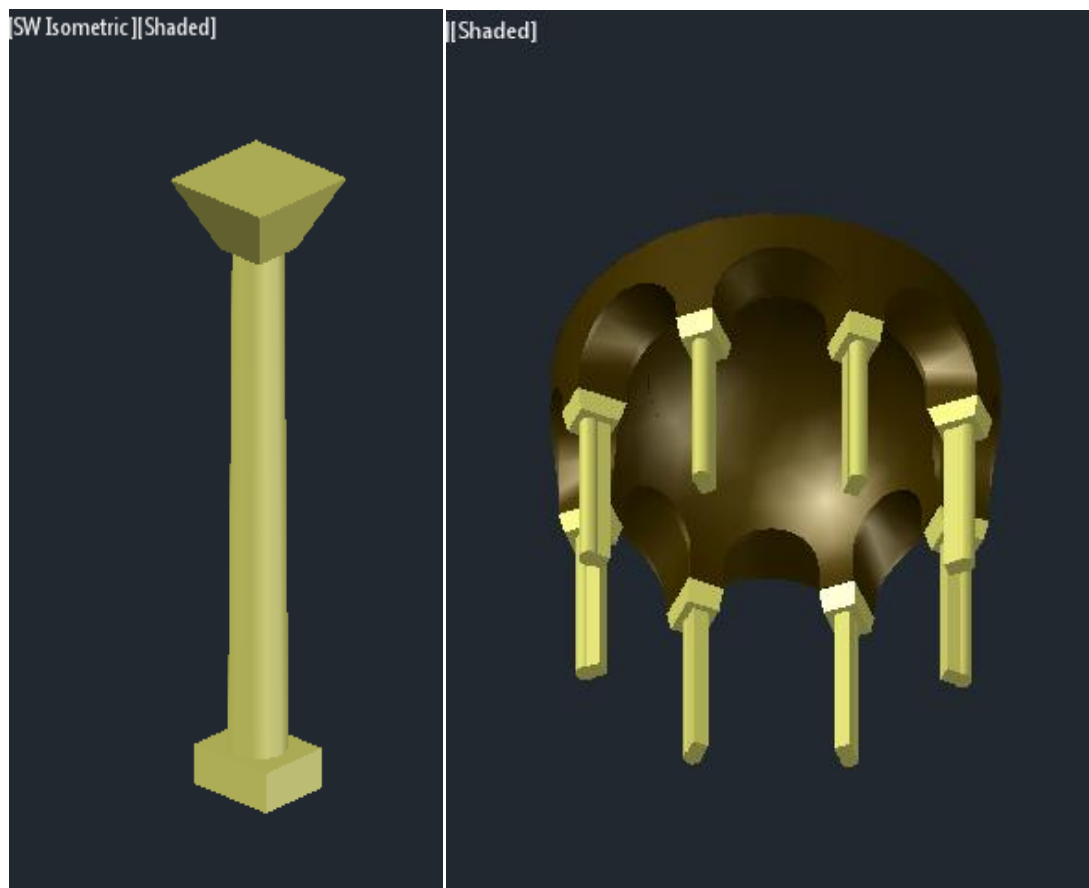


Εικόνα 4.5: Οι κόγχες της ανατολικής πλευράς και οι καμάρες του ιερού.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν με την εντολή *Extrude* οι πρόβολοι που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο. Οι οριζόντιοι πρόβολοι διαπερνούν όλο το πάχος του εσωτερικού τοίχου του κυρίως ναού, για αυτό το τμήμα τους που εισχωρεί στους τοίχους έχει αφαιρεθεί από τον τοίχο. Για το σχηματισμό των κίωνων και των κιονόκρανων χρησιμοποιήθηκε η εντολή *Loft*, καθώς η διάμετρος του κορμού των κίωνων αυξάνεται ελαφρώς προς τα κάτω. Στην πάνω σειρά των κίωνων εδράστηκαν οι παραστάδες που σχηματίζουν τις καμάρες γύρω από τον κεντρικό τρούλο, συνεπώς ήταν εύκολο να σχεδιαστούν και οι τέσσερις καμάρες περιμετρικά του τρούλου. Επίσης, στις δυτικές γωνίες του κυρίως ναού σχηματίστηκαν οι κυκλικές κόγχες στους τοίχους και τα σφαιρικά τμήματα της οροφής με την αφαίρεση ενός κυλίνδρου με ημισφαιρικό τμήμα στην κορυφή.

Το επόμενο κομμάτι που σχεδιάστηκε ήταν η τετραγωνική βάση του κεντρικού τρούλου, η οποία διαπερνάται από τις τέσσερις καμάρες και πατάει στις γωνίες του κυρίως ναού, όπου καλύπτεται η οροφή τους από τις δύο καμάρες ανατολικά και τα δύο σφαιρικά τμήματα δυτικά. Τους τοίχους του κυρίως ναού ενώνουν οι ξύλινοι ελκυστήρες, από τους οποίους αφαιρέθηκε το κομμάτι τους που συμπίπτει με τους τοίχους. Τελευταίο σχεδιάστηκε στο εσωτερικό το καμπύλο τμήμα που ενώνει τον τρούλο με τους κατακόρυφους τοίχους, αφαιρώντας ένα στερεό που είχε προκύψει από δύο κύκλους σε διαφορετικά επίπεδα με την εντολή *Loft*. Όλες οι καμάρες έγιναν δίκλινες στην οροφή με την εντολή *Slice*.

Ακολούθως, σχεδιάστηκαν οι τρούλοι, οι περιμετρικοί στηρίχτηκαν στα αντίστοιχα διαμερίσματα του γυναικωνίτη και ο κεντρικός στη βάση του. Για τον ανοιχτό ουρανίσκο σχεδιάστηκαν πρώτα οι μαρμάρινοι κίονες, στους οποίους στηρίχτηκε. Έγινε ένας από τους κίονες και με την εντολή Polar Array τοποθετήθηκαν και οι υπόλοιποι στις επιθυμητές θέσεις. Έτσι έγιναν και τα παράθυρα των τρούλων και τα καμπύλα ανοίγματα του ουρανίσκου. Τα τελευταία σχεδιάστηκαν με την εντολή Loft και μετά αφαιρέθηκαν.

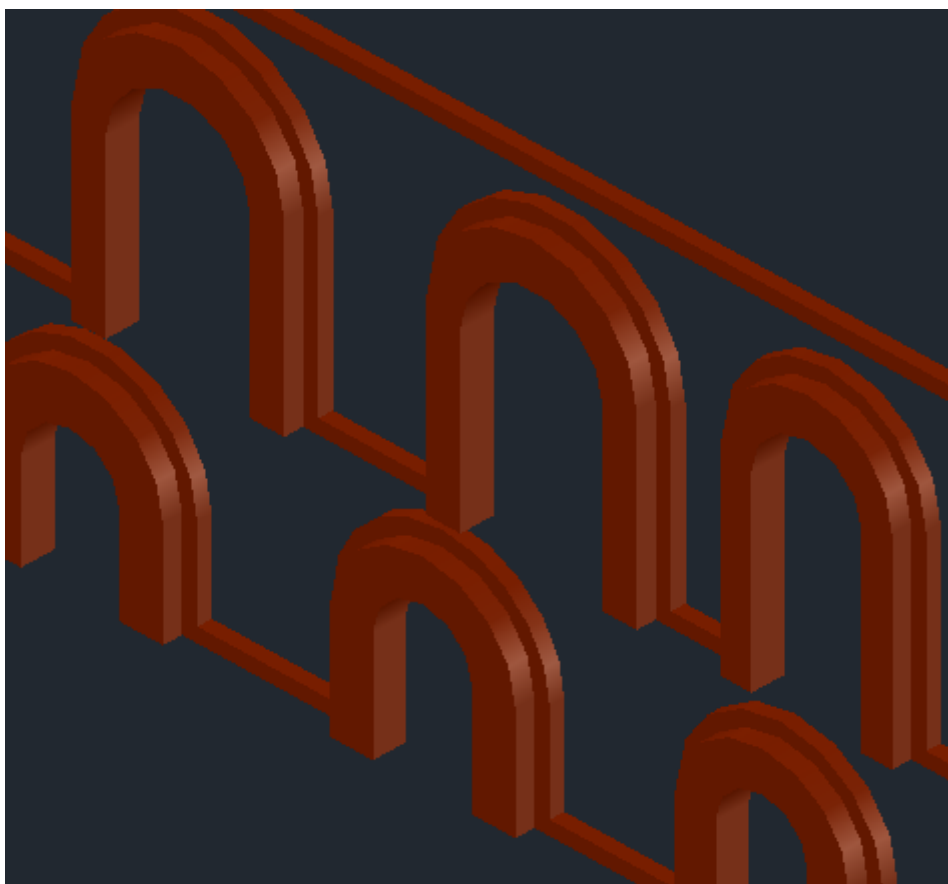


(α)

(β)

Εικόνα 4.6: (α) Μαρμάρινος κίονας που στηρίζει τον κεντρικό τρούλο (β) Άνοιξη ανοιχτού ουρανίσκου.

Απέμεινε ο σχεδιασμός της στέγης όπου έγινε κεκλιμένη, καθώς και των πλίνθινων στοιχείων στο εξωτερικό. Η στέγη πάτησε στους εξωτερικούς τοίχους και με γνωστή την κλίση κάθε σκέλους της σχεδιάστηκε. Μέρη της στέγης αφαιρέθηκαν, γιατί διαπερνιόταν από τους τρούλους και οι οροφές των θόλων του γυναικωνίτη ήταν σε ψηλότερη στάθμη από αυτή των εξωτερικών τοίχων. Ακόμη, αφαιρέθηκε άλλο ένα μέρος, καθώς θεωρήθηκε ότι αποτελείται από ξύλα και κεραμίδια και τοποθετήθηκε σαν φορτίο στην κατασκευή. Για τα πλίνθινα στοιχεία σχεδιάστηκε γύρω από τα παράθυρα καμπύλο τμήμα πάχους 0,45μ. και η οδοντωτή ταινία πάχους 0,2μ., που αφαιρέθηκαν μετά από τους τοίχους. Οι τιμές αυτές δεν είναι μετρημένες, αλλά έχουν εκτιμηθεί.

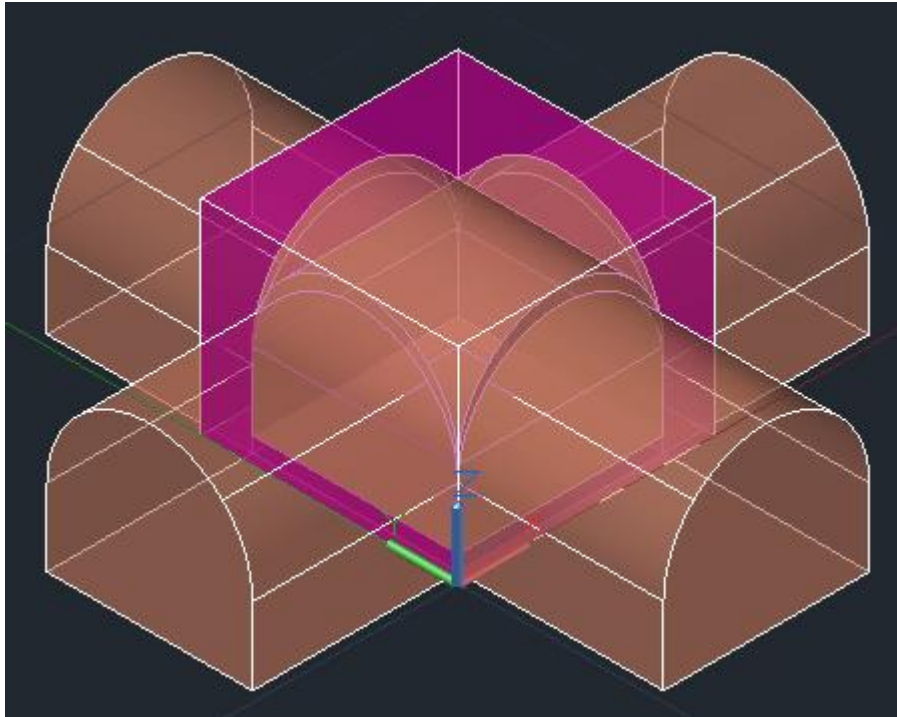


Εικόνα 4.7: Πλίνθινα στοιχεία εξωτερικού τοίχου.

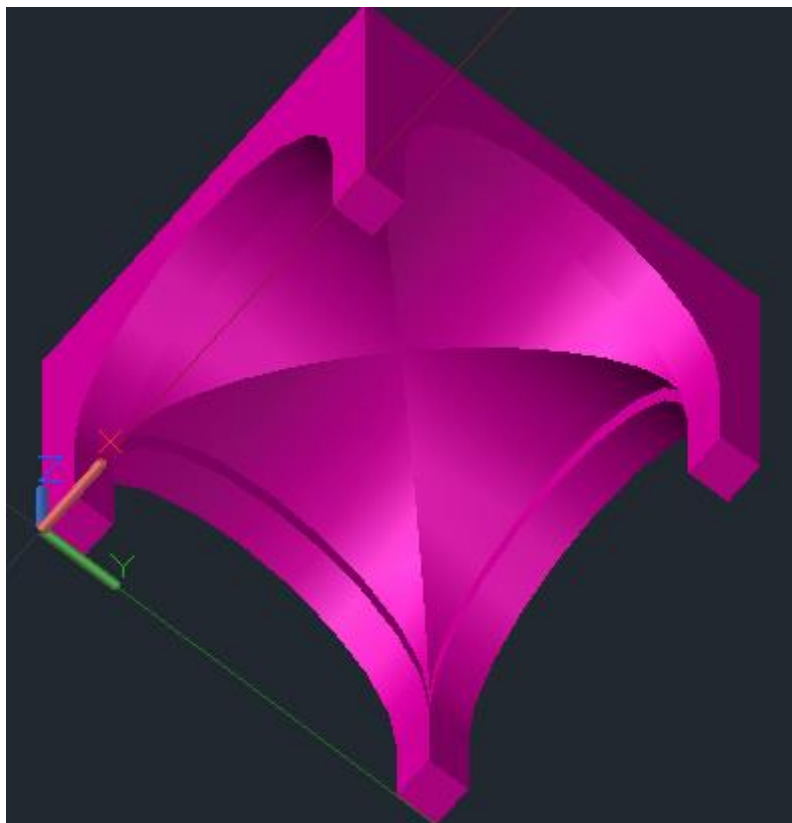
4.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΟΛΩΝ

4.4.1 Σταυροθόλια

Αρχικά, σχεδιάστηκε ο ορθογώνιος όγκος του διαμερίσματος στο επιθυμητό ύψος. Στη συνέχεια σχηματίστηκαν στερεά με μικρότερο μήκος αποτελούμενα από ένα ορθογώνιο συνδεδεμένο με ένα ημικυκλικό δίσκο. Τα στερεά αυτά έγιναν από ορθογώνιους όγκους με εφαρμογή της εντολής *Fillet Edge* στις ακμές τους. Τοποθετήθηκαν ώστε να είναι κάθετα μεταξύ τους και να τέμνονται οι άξονες τους στο κέντρο του διαμερίσματος. Έτσι, με την αφαίρεση τους μέσω της εντολής *Subtract* από τον ορθογώνιο όγκο σχηματίστηκαν στην οροφή οι δύο καμάρες που τέμνονται. Στην περίπτωση υπερυψωμένων σταυροθολίων σχεδιάστηκαν πρώτα περιμετρικά στερεά και τα εσωτερικά υπερυψώνονταν ώστε να δημιουργηθεί στο επιθυμητό ύψος η κορυφή του σταυροθολίου και μετά αφαιρούνταν. Η διαδικασία σχεδίασης του υπερυψωμένου σταυροθολίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.8: Διαδικασία σχεδίασης υπερυψωμένου σταυροθολίου.

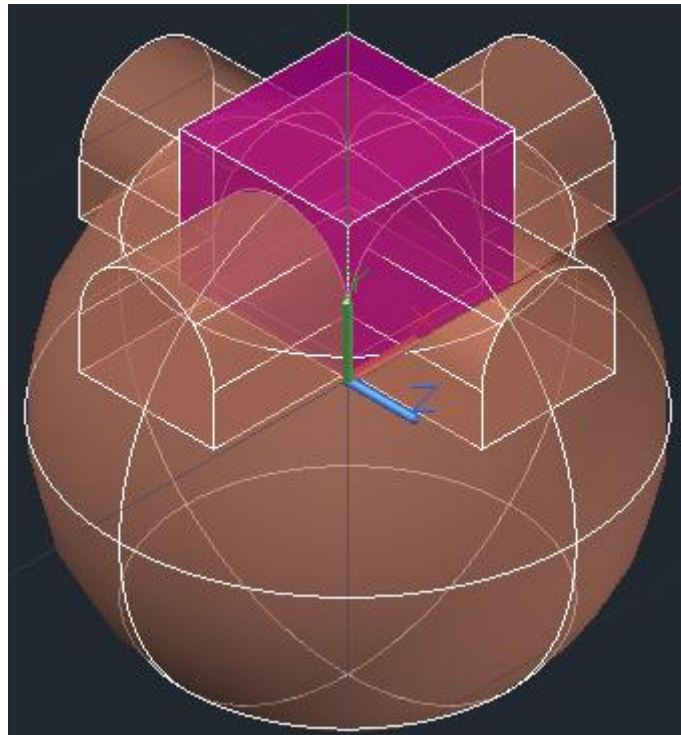


Εικόνα 4.9: Υπερυψωμένο σταυροθόλιο που προκύπτει.

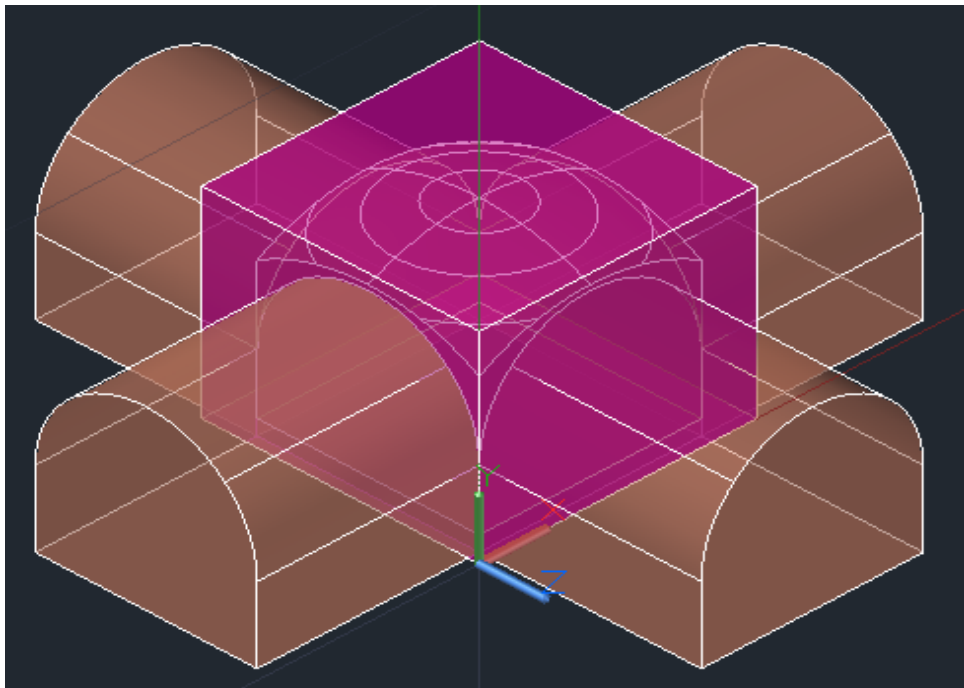
4.4.2 Ημισφαιρικοί θόλοι

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή των υπερυψωμένων σταυροθολίων με τη διαφορά ότι στο εσωτερικό του διαμερίσματος

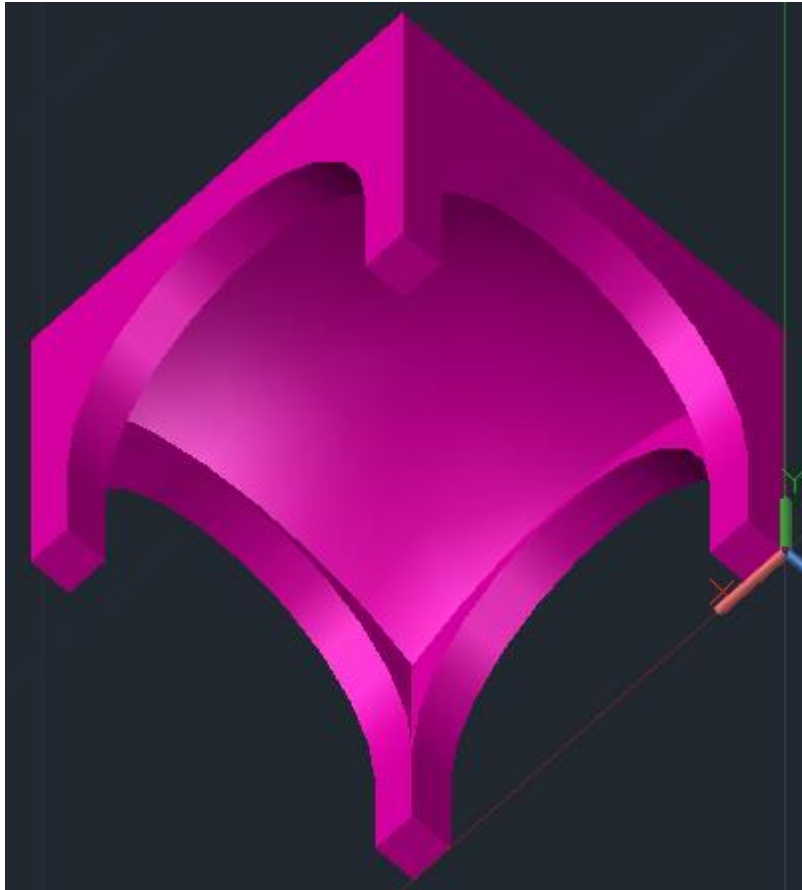
σχεδιάζεται ένα σύνθετο στερεό. Το σύνθετο στερεό σχηματίστηκε από τη συμβολή του εσωτερικού ορθογωνίου και μίας σφαίρας με χρήση της εντολής Intersect. Η σφαίρα που επιλέχθηκε περιέχει το τόξο του θόλου.



Εικόνα 4.10: Διαδικασία σχεδίασης σύνθετου στερεού.



Εικόνα 4.11: Διαδικασία σχεδίασης ρηχού ημισφαιρικού θόλου.



Εικόνα 4.12: Ρηχός ημισφαιρικός θόλος που προκύπτει.

4.4.3 Τρούλοι

Για το σχεδιασμό των τρούλων γίνεται μία συνεχής γραμμή (Polyline) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Με την εντολή Revolve περιστρέφεται κατά 360° γύρω από τον άξονά της και σχηματίζεται ο τρούλος.

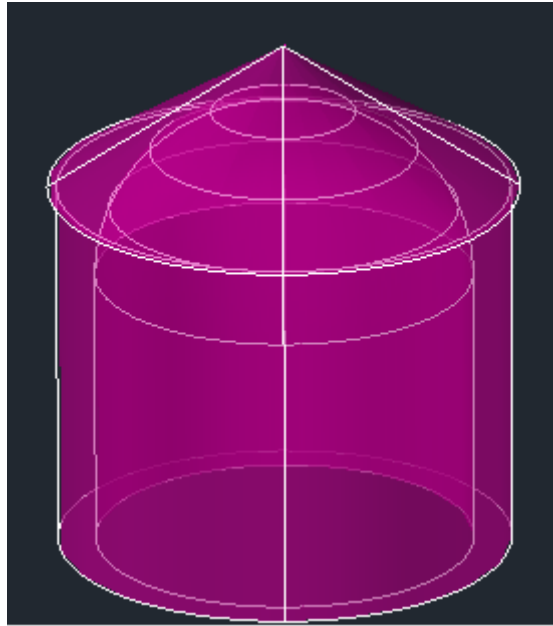


(α)



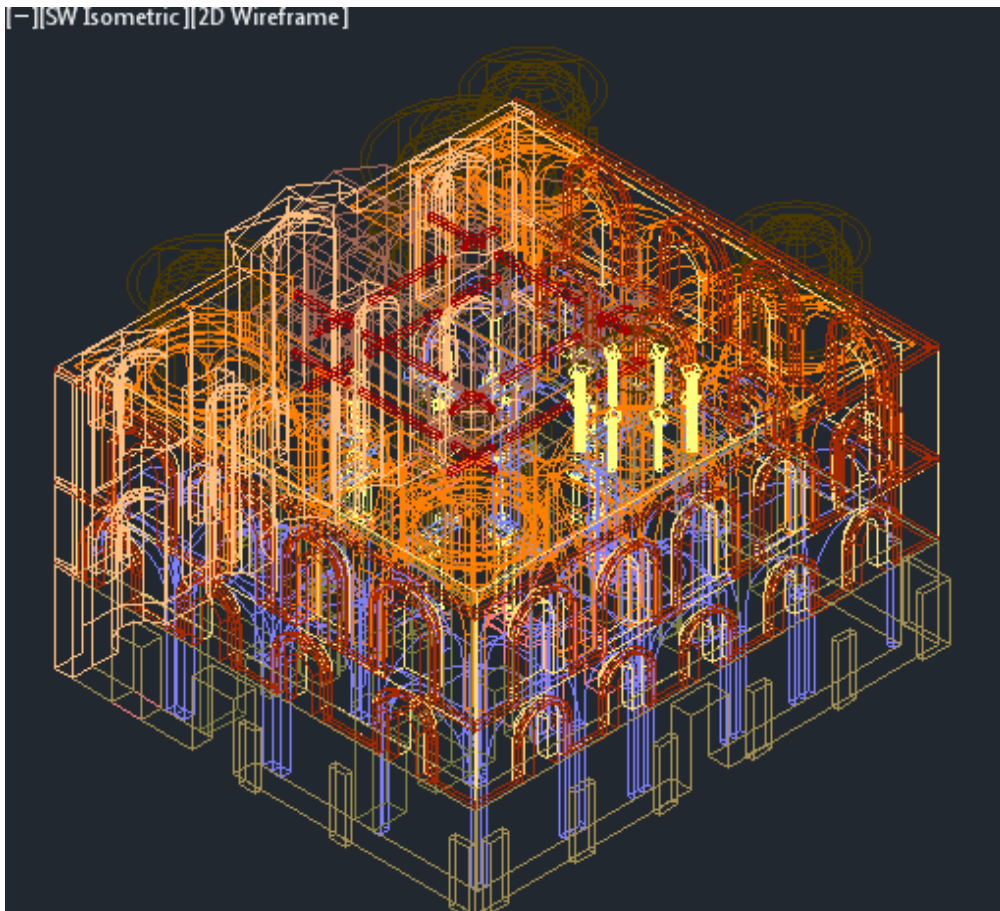
(β)

Εικόνα 4.13: (α) Σχεδιασμός Polyline (β) Τρούλος που προκύπτει σε δισδιάστατη μορφή.

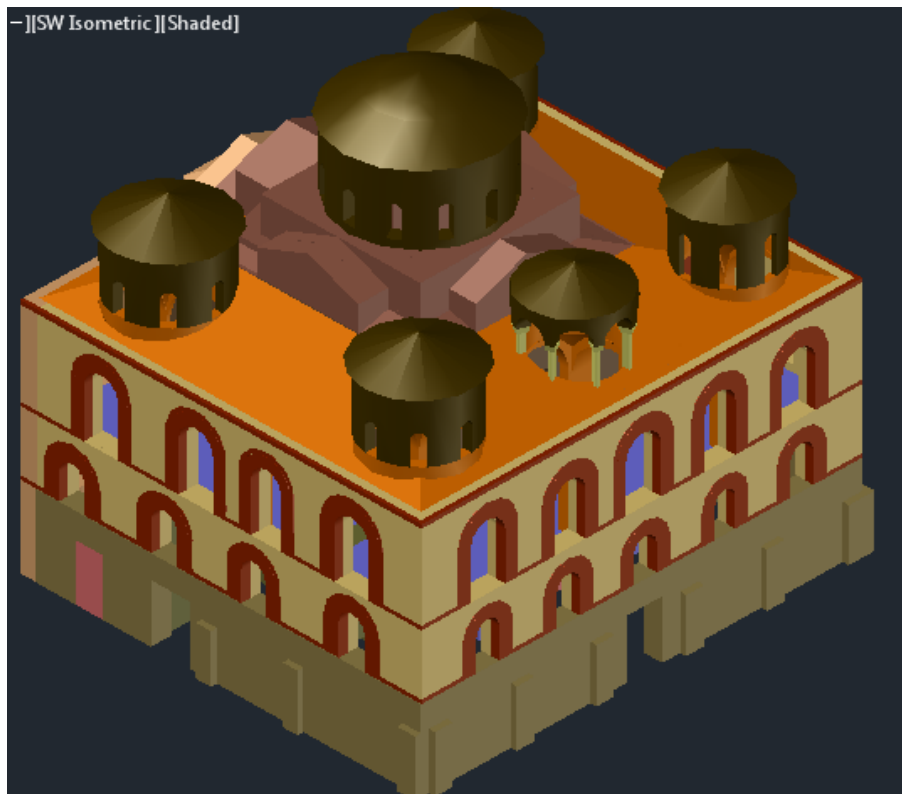


Εικόνα 4.14: Τρούλος που προκύπτει σε τρισδιάστατη μορφή.

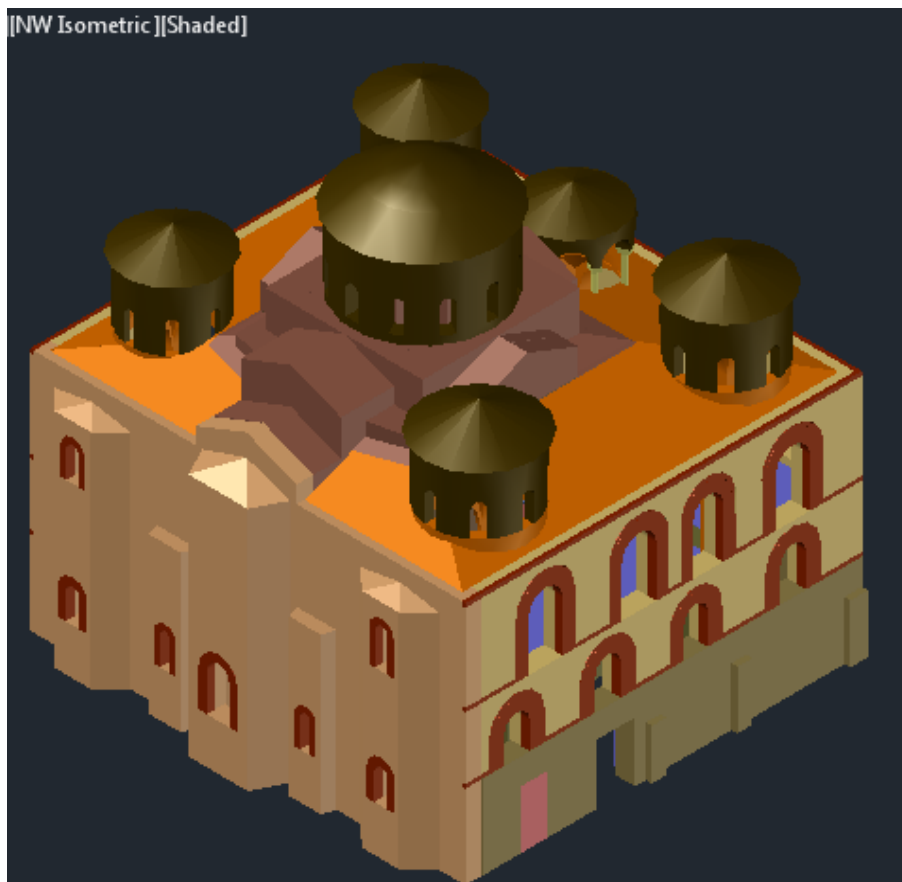
4.5 ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



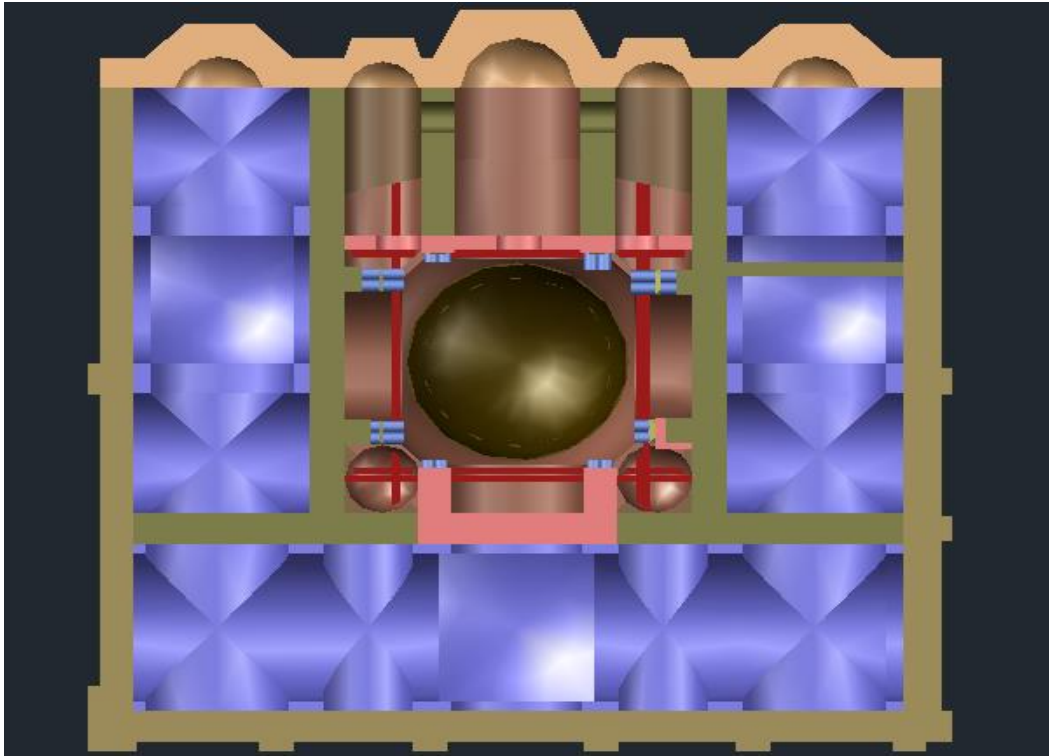
Εικόνα 4.15: Τελικό μοντέλο σε μορφή Wireframe εκ της βορειοδυτικής πλευράς.



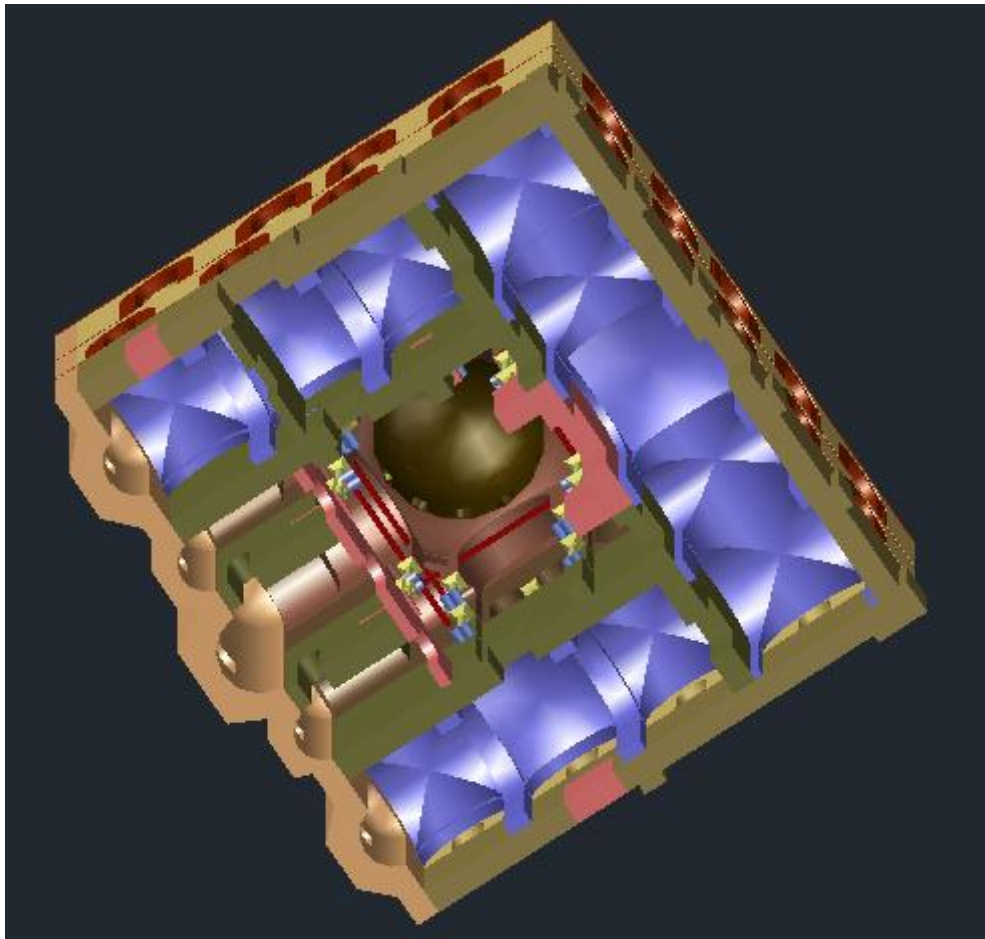
Εικόνα 4.16: Τελικό μοντέλο σε μορφή Shaded εκ της βορειοδυτικής πλευράς.



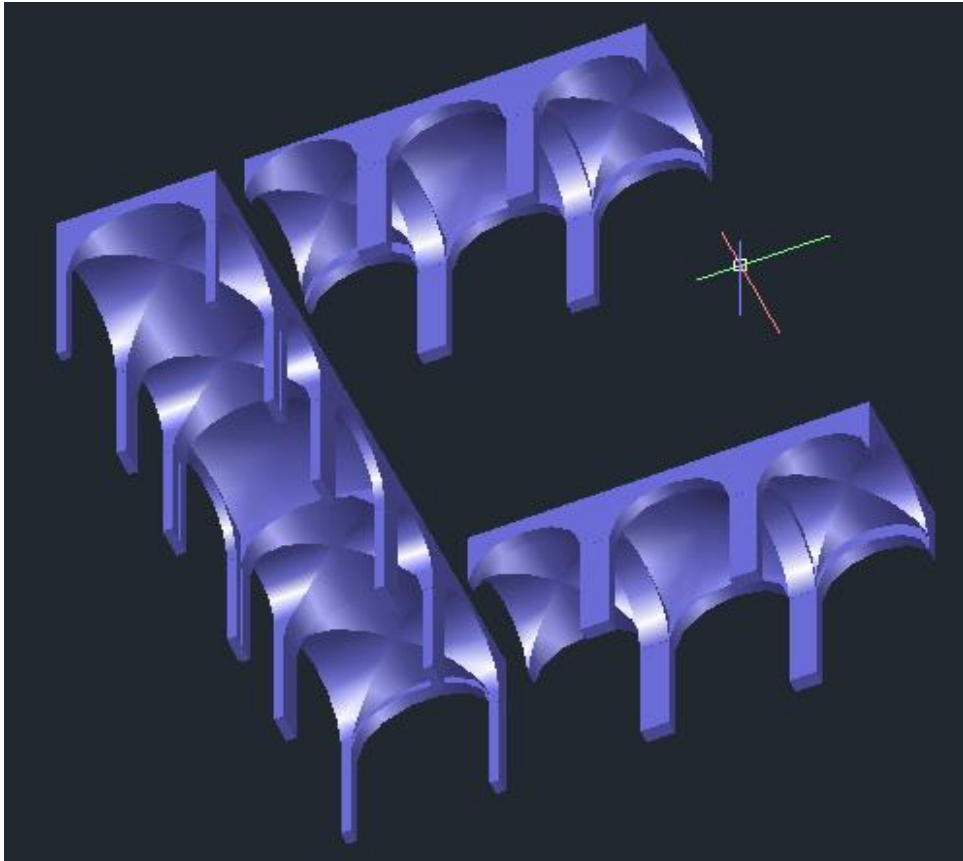
Εικόνα 4.17: Τελικό μοντέλο σε μορφή Shaded εκ της βορειοανατολικής πλευράς.



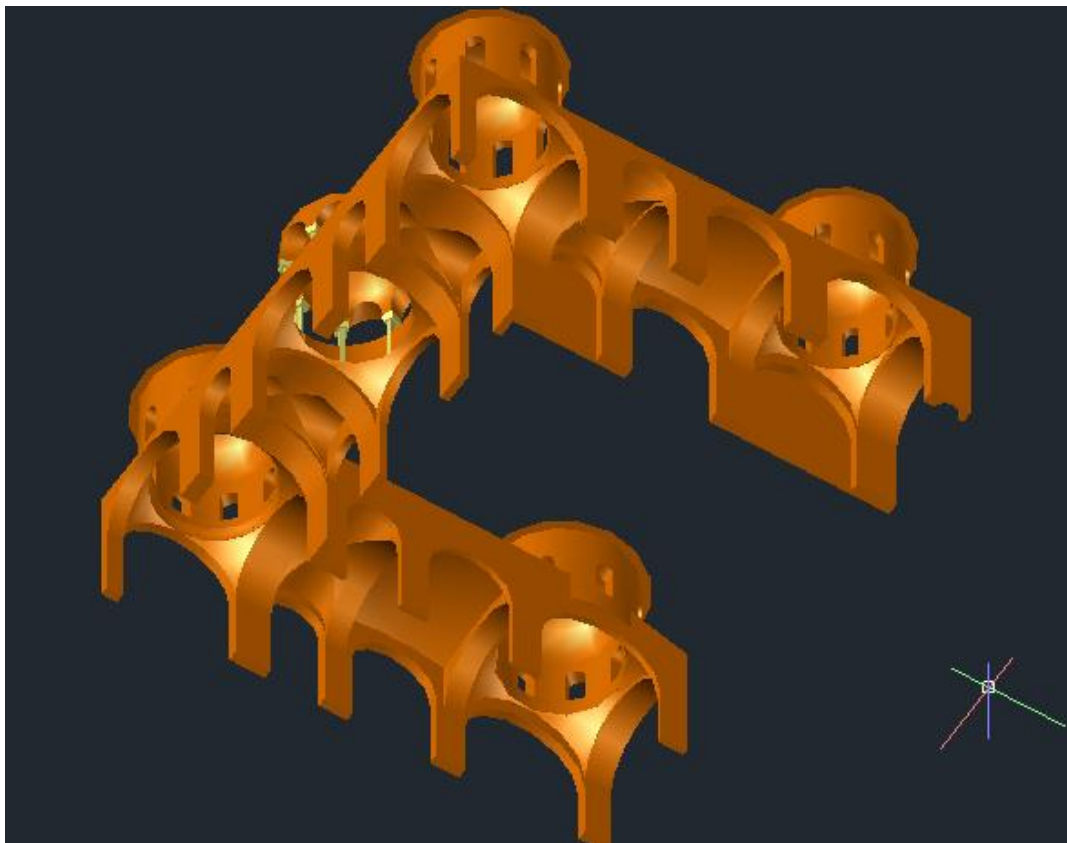
Εικόνα 4.18: Άνοψη τελικού μοντέλου σε μορφή Shaded.



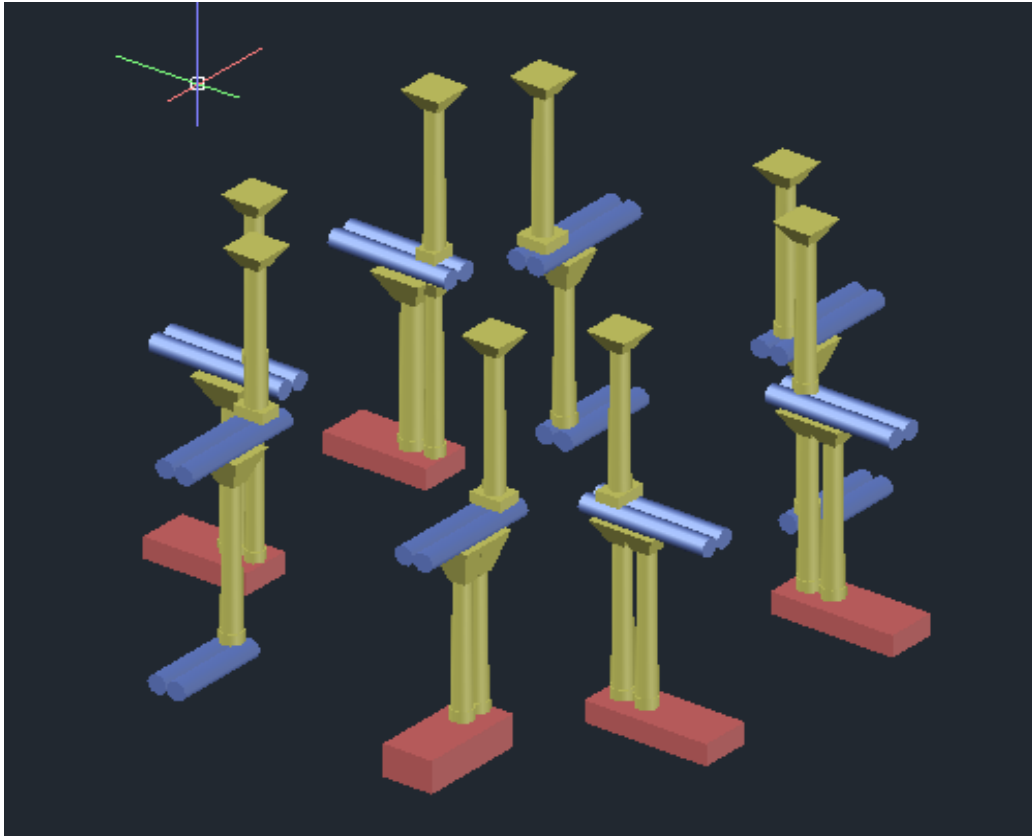
Εικόνα 4.19: Άνοψη του ναού, όπου φαίνεται και το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου



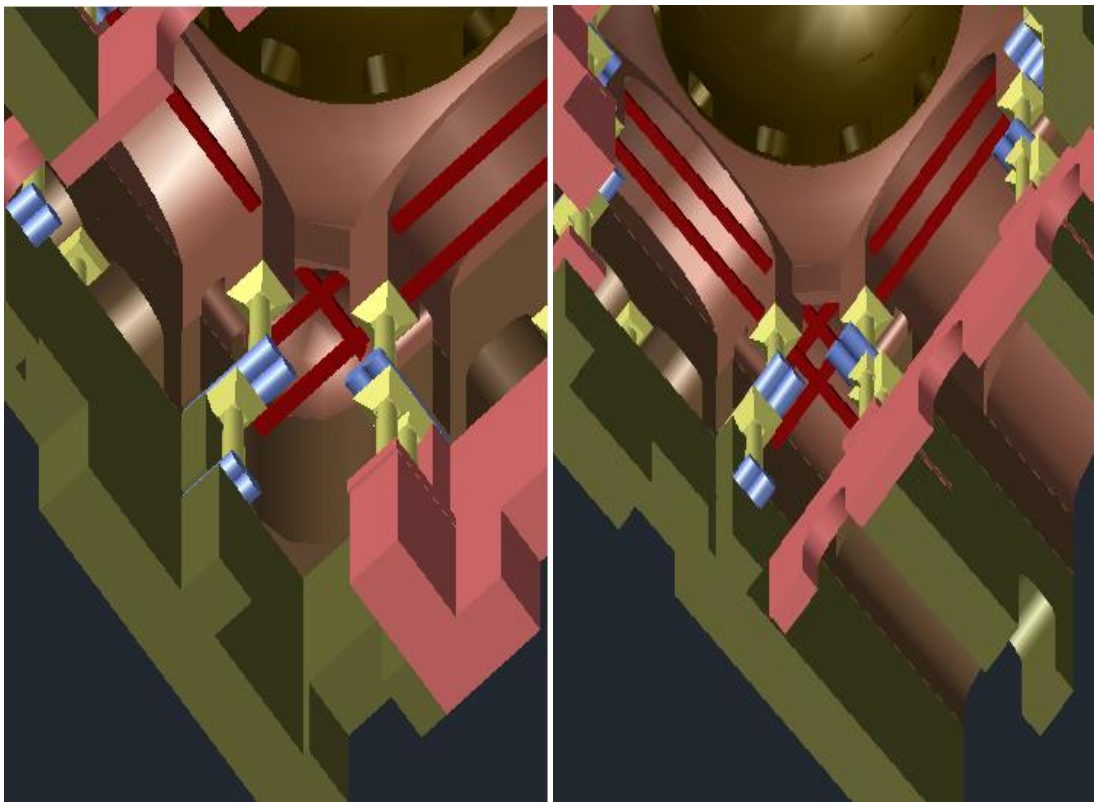
Εικόνα 4.20: Διαμερίσματα νάρθηκα και παρεκκλησίων.



Εικόνα 4.21: Διαμερίσματα γυναικωνίτη.



Εικόνα 4.22: Μαρμάρινοι κίνες και οριζόντιοι πρόβολοι συστήματος στήριξης κεντρικού τρούλου.



(α)

(β)

Εικόνα 4.23: (α) Άνοψη δυτικής γωνία κυρίως ναού (β) Άνοψη ανατολικής γωνία κυρίως ναού.

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική μέθοδος, δηλαδή μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ, για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων διαφορικών εξισώσεων. Από το 1960 και μετά η ανάπτυξη της μεθόδου και η εφαρμογή της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων του μηχανικού συμβαδίζει με την τεχνολογία των Η/Υ. Κι αυτό γιατί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, που δεν είναι δυνατό να επιλυθεί χωρίς τη χρήση του Η/Υ. Έτσι, η εξέλιξη των Η/Υ κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν μερικά χρόνια.

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Η διαδεδομένη χρήση της μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στάδια προσομοίωσης:

- 1) Μετάβαση από το φυσικό πρόβλημα, που είναι η κατασκευή στο μαθηματικό προσομοίωμα, δηλαδή το φορέα. Κατά το στάδιο αυτό ταξινομούνται τα μέλη σε ράβδους ή σε δισδιάστατα και σε τρισδιάστατα μέλη. Επίσης, καθορίζονται οι ιδιότητες των υλικών των μελών της κατασκευής, καθώς και η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση της κατασκευής και προσδιορίζονται τα φορτία της κατασκευής και οι συνοριακές συνθήκες.
- 2) Μετάβαση από το μαθηματικό προσομοίωμα στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων. Στο στάδιο αυτό επιλέγεται ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί και μορφώνεται το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του φορέα. Υπολογίζονται τα μητρώα στιβαρότητας και οι ισοδύναμες δράσεις των στοιχείων, ώστε προκύπτει η τελική μητρική εξίσωση ισορροπίας τους φορέα.
- 3) Μετάβαση από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αριθμητική

επεξεργασία του προσομοιώματος των πεπερασμένων στοιχείων από τον H/Y. Υπολογίζεται το καθολικό μητρώο στιβαρότητας και το καθολικό διάνυσμα των ισοδύναμων δράσεων. Ακολουθεί η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και ο υπολογισμός των τάσεων και των εντατικών μεγεθών.

Σε κάθε στάδιο υπάρχει ο κίνδυνος να εμφανιστούν σφάλματα, που μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία της ανάλυσης. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε:

- Σφάλματα προσομοίωσης, τα οποία επηρεάζονται από το βαθμό της πιστότητας του φορέα προς την κατασκευή.
- Σφάλματα διακριτοποίησης, που εξαρτώνται από τον τύπο και την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Όσο πιο μεγάλη η πυκνότητα του δικτύου, τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα.
- Σφάλματα αριθμητικά, που οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια με την οποία εκτελούνται οι πράξεις από τον H/Y.

5.2 ΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ABAQUS

5.2.1 Το λογισμικό ABAQUS

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS, που είναι πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με πολλές δυνατότητες και χρησιμοποιείται ευρέως από τον επιστημονικό κόσμο. Παρακάτω θα αναφερθούν τα βασικά στοιχεία του προγράμματος. Σημειώνεται πως η ευκολία στη χρήση του ABAQUS βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σωστή χρήση των εγχειριδίων χρήσης, τα οποία είναι ιδιαίτερα αναλυτικά και εύχρηστα. Τα εγχειρίδια χρήσης μπορεί κάποιος να τα βρει εύκολα στο διαδίκτυο αν κάνει την αναζήτηση Abaqus Documentation.

Οι μονάδες μέτρησης

Στο ABAQUS δεν ορίζονται συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης όπως γίνεται σε άλλα προγράμματα. Για αυτό το λόγο πριν γίνει οποιαδήποτε ανάλυση πρέπει να επιλέγονται μονάδες, οι οποίες ανήκουν σε ένα ενιαίο και σταθερό σύστημα μονάδων χωρίς συντελεστές μετατροπής, όπως είναι τα παρακάτω που ακολουθούν.

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

Εικόνα 5.1: Συστήματα μονάδων μέτρησης.

Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί το σύστημα μονάδων SI και συγκεκριμένα η πρώτη στήλη από τον παραπάνω πίνακα, που αφορά τα μέτρα. Οπότε, όλα τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει αντιστοιχούν στις συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης.

Οι βαθμοί ελευθερίας

Για την περιγραφή των βαθμών ελευθερίας χρησιμοποιούνται δείκτες. Στη μετακίνηση κατά x , y , z αντιστοιχούν οι δείκτες 1, 2, 3 αντίστοιχως. Για περιστροφή γύρω από τον άξονα x , y , z οι δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι 4, 5, 6 αντίστοιχα.

Οι ομάδες εντολών

Για να γίνει οποιαδήποτε ανάλυση εφαρμόζονται εντολές που ανήκουν στις ομάδες εντολών που θα παρουσιαστούν συνοπτικά στη συνέχεια.

- Part: Σχεδιάζεται η γεωμετρία των μερών του μοντέλου.
- Property: Ορίζονται οι ιδιότητες και τα υλικά των μερών του μοντέλου.
- Assembly: Καθορίζεται η συνδεσμολογία των μερών.
- Step: Καθορίζεται το είδος της ανάλυσης που θα εφαρμοστεί.
- Interaction: Ορίζεται πώς αλληλεπιδρούν τα μέρη του μοντέλου.
- Load: Καθορίζονται τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες.
- Mesh: Δημιουργείται το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Job: Υποβάλλεται η ανάλυση σε επεξεργασία.
- Visualization: Προβάλλονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
- Sketch: Σχεδιάζονται σκίτσα σχετικά με το θέμα που μελετάται.

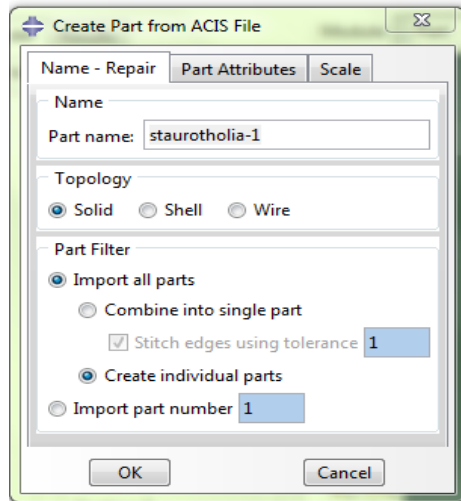
5.2.2 Γεωμετρία προσομοιώματος

Μέσω του προγράμματος ABAQUS είναι εφικτό να εισαχθεί γεωμετρία από το πρόγραμμα AutoCAD. Συνεπώς, αφού έχει προηγηθεί ο σχεδιασμός του φορέα σε τρισδιάστατη μορφή στο AutoCAD αλλά εισήχθησαν τα μέρη του κτιρίου ως στερεά (Parts). Αρχικά, έγινε Export από το AutoCAD των στερεών (Solids) ως αρχείο .sat. Ο συγκεκριμένος τύπος αρχείου αναγνωρίζεται από το λογισμικό του ABAQUS, οπότε έγινε Import των αρχείων αυτών.

Στο μοντέλο που είχε σχεδιαστεί στο AutoCAD ελέγχθηκε ότι δε συνέλιπταν διαφορετικά υλικά. Για τη θεμελίωση έχει γίνει η παραδοχή ότι οι εξωτερικοί και εσωτερικοί τοίχοι είναι τοποθετημένοι ένα μέτρο μέσα στο έδαφος. Η παραδοχή αυτή έγινε διότι δεν υπήρχαν περαιτέρω δεδομένα. Στο στάδιο αυτό αφαιρέθηκε το μέρος της στέγης που πατάει πάνω στον τοίχο και τοποθετήθηκε ως φορτίο στον εξωτερικό τοίχο.

Επειδή, το μοντέλο που έχουμε να διαχειριστούμε είναι αρκετά μεγάλο κάποια μέρη του φορέα, τα οποία αποτελούνται από διαφορετικά υλικά ενώθηκαν και εισήχθησαν ως ένα μέρος (Part) στο πρόγραμμα ABAQUS. Τα μέρη αυτά στη συνέχεια διαχωρίστηκαν σε μικρότερα μέρη (Partitions), τα

οποία είναι δυνατό να αποτελούνται από διαφορετικά υλικά. Σκοπός του παραπάνω ήταν η απλοποίηση του μοντέλου, καθώς μειώθηκαν σε μεγάλο βαθμό οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μερών του φορέα, που επιβαρύνουν την διαδικασία επίλυσης.



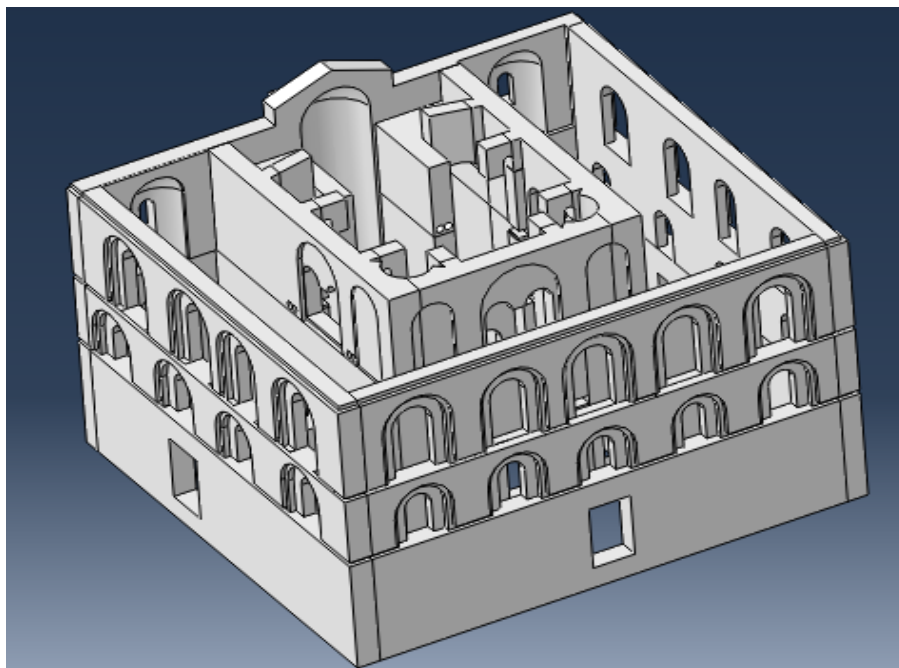
(α)



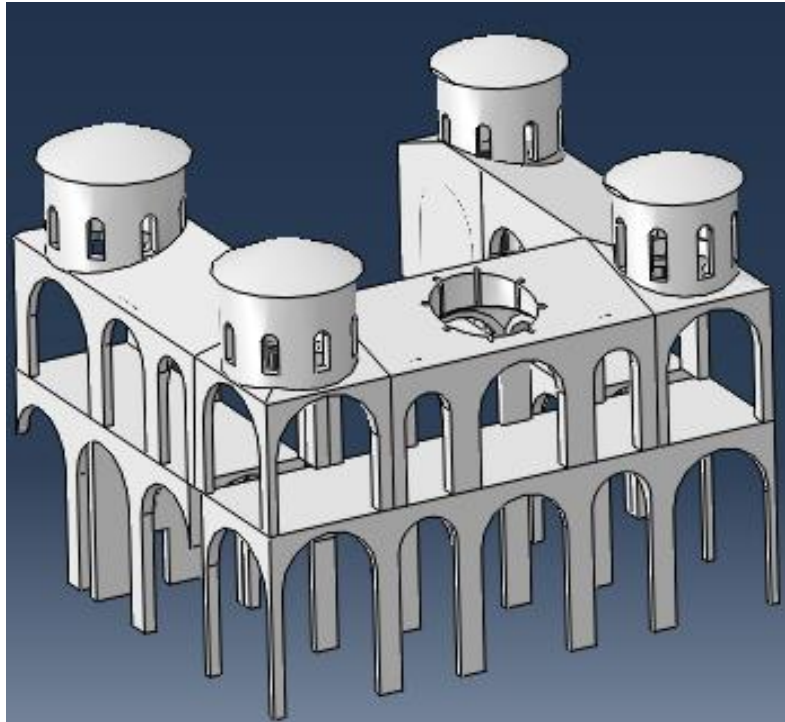
(β)

Εικόνα 5.2: (α) Δεικνύεται ο τρόπος εισαγωγής μέρους στο ABAQUS (β) Όλα τα μέρη της κατασκευής.

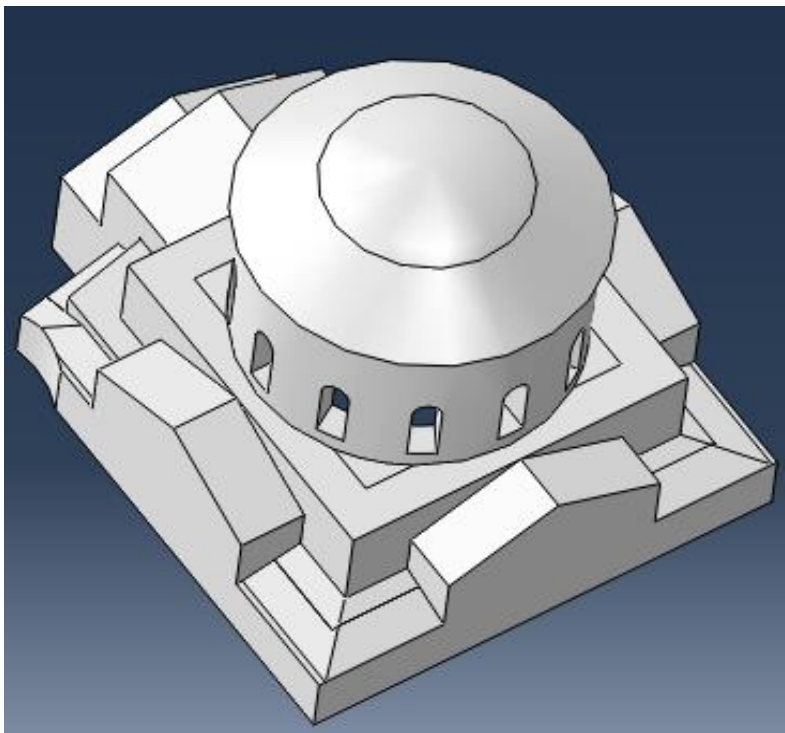
Για τη δημιουργία των Partitions χρησιμοποιήθηκε η εντολή Partition Cell: Define Cutting Plane, που βρίσκεται στην εργαλειοθήκη της ομάδας εντολών Part. Μέσω της εντολής αυτής κόβεται ένα μέρος σε μικρότερα με τον ορισμό τριών σημείων, τα οποία ανήκουν στο διαχωριστικό επίπεδο. Συνολικά εισήχθησαν 19 μέρη και στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά ενδεικτικά.



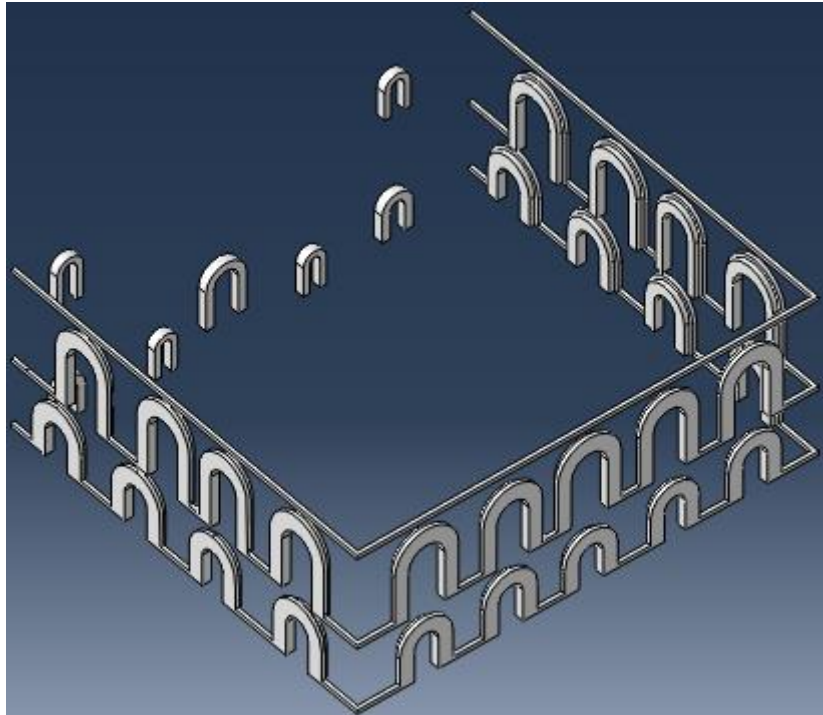
Εικόνα 5.3: Το μέρος της τοιχοποιίας, όπως εισήχθη στο πρόγραμμα ABAQUS, φαίνονται και τα partitions που έχουν διαφορετικά υλικά.



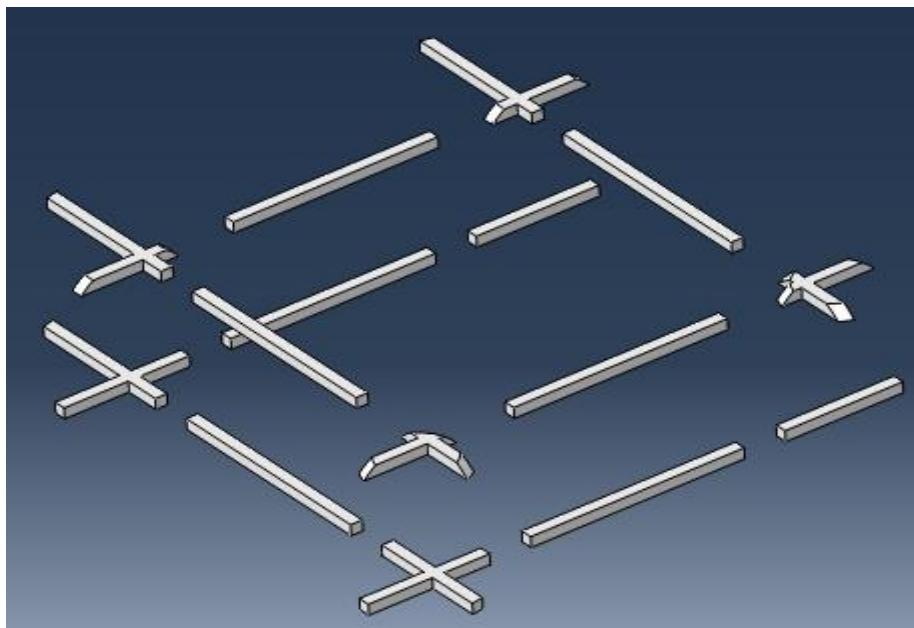
Εικόνα 5.4: Τα διαμερίσματα και οι περιμετρικοί τρούλοι, που εισήχθησαν ως ένα μέρος στο πρόγραμμα ABAQUS.



Εικόνα 5.5: Το άνω μέρος του κυρίως ναού και ο κεντρικός τρούλος.



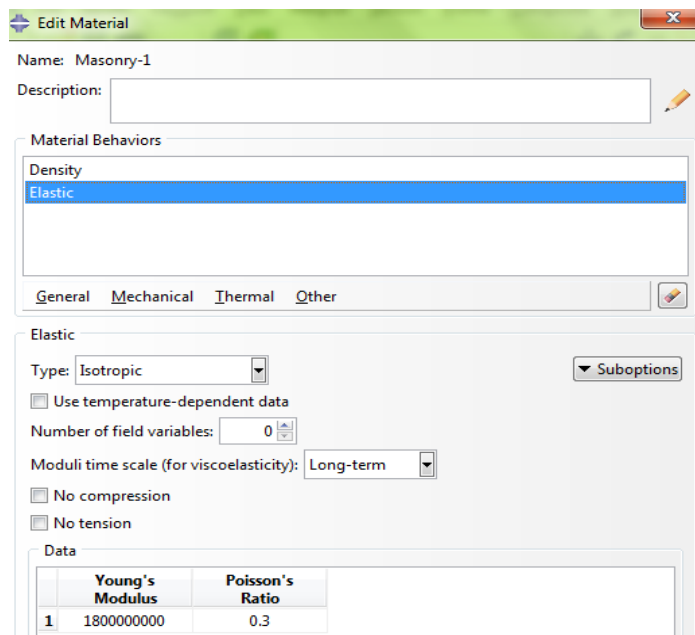
Εικόνα 5.6: Τα πλίνθινα στοιχεία της εξωτερικής τοιχοποιίας.



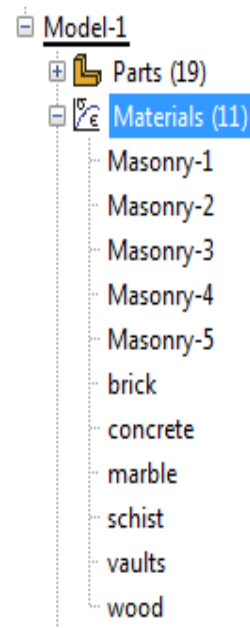
Εικόνα 5.7: Οι ξύλινοι ελκυστήρες.

5.2.3 Υλικά προσομοίωσης

Μετά την εισαγωγή των μερών του φορέα ορίστηκαν τα υλικά και οι ιδιότητές τους. Τα υλικά δημιουργούνται με την εντολή Create Material της εργαλειοθήκης των εντολών Property. Όλα τα υλικά έχουν θεωρηθεί ελαστικά, ισότροπα και έχει οριστεί η πυκνότητά τους, το μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής Poisson. Οι τιμές που επιλέχθηκαν προέκυψαν από τη βιβλιογραφία και βασίζονται σε παραδοχές. Συνολικά έχουν οριστεί έντεκα κατηγορίες υλικών.



(α)



(β)

Εικόνα 5.8: (α) Ορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών υλικού (β) Όλες οι κατηγορίες των υλικών που ορίστηκαν.

Παρακάτω αναλύεται κάθε υλικό που έχει οριστεί στο πρόγραμμα ποιο αντιπροσωπεύει στο υφιστάμενο κτίριο.

- **Masonry-1:** Αφορά την αργολιθοδομή της κάτω εξωτερικής τοιχοποιίας.
- **Masonry-2:** Αφορά την πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία.
- **Masonry-3:** Αφορά την τοιχοποιία της ανατολικής πλευράς πίσω από το ιερό.
- **Masonry-4:** Αφορά την τοιχοποιία του άνω ορόφου του κυρίως ναού.
- **Masonry-5:** Αφορά την τοιχοποιία του κάτω ορόφου του κυρίως ναού.
- **Brick:** Αφορά τους πλίνθους της εξωτερικής τοιχοποιίας.
- **Concrete:** Έχει θεωρηθεί ότι στις επεμβάσεις που έχουν γίνει στο ναό έχει χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα C16/20.
- **Marble:** Αφορά τους μαρμάρινους κίονες και προβόλους.
- **Schist:** Έχει θεωρηθεί ότι οι καμάρες του κυρίως ναού έχουν κατασκευαστεί από σχιστόλιθους.
- **Vaults:** Είναι το υλικό με το οποίο έχουν χτιστεί οι θολωτές κατασκευές, δηλαδή η αμιγής πλινθοδομή.
- **Wood:** Αφορά το ξύλο από το οποίο αποτελούνται οι ελκυστήρες του κυρίως ναού.

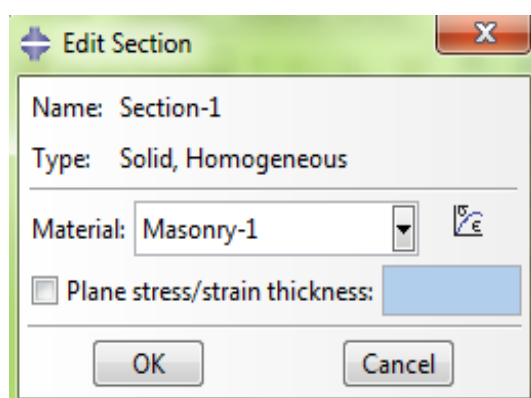
Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας έχει υπολογιστεί βάσει της σχέσης του Ευρωκώδικα 6 $f_{ck} = E/1000$. Για την εφελκυστική αντοχή έχει θεωρηθεί ότι είναι το 5% της θλιπτικής. Οι τιμές των αντοχών δεν έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα.

Έχουν επιλεγεί οι παρακάτω τιμές:

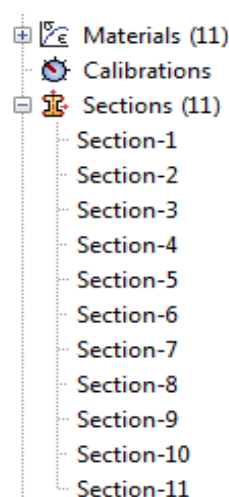
Υλικό	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{kPa})$	ν	$f_{ck}(\text{kPa})$	$f_{tk}(\text{kPa})$
Masonry-1	2200	1800000	0.3	1800	90
Masonry-2	2200	2000000	0.3	2000	100
Masonry-3	2000	2000000	0.3	2000	100
Masonry-4	2200	3000000	0.3	3000	150
Masonry-5	2200	2500000	0.3	2500	125
Brick	1700	1800000	0.3	1800	90
Concrete	2500	27000000	0.2	16000	2500
Marble	2800	31000000	0.25	25000	5000
Schist	1800	1500000	0.3	1500	75
Vaults	1800	1500000	0.3	1500	75
Wood	500	7000000	0.3	16000	8000

Πίνακας 5.1: Τιμές υλικών που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση της κατασκευής.

Επόμενο βήμα αφού έχουν οριστεί τα υλικά είναι η δημιουργία των τμημάτων (Section). Από τη στιγμή που τα μέρη που έχουμε εισάγει είναι στερεά θα δημιουργηθούν τμήματα στερεών (Solid Sections). Πρώτα εφαρμόζεται η εντολή Create Section της εργαλειοθήκης της ομάδας εντολών Property και επιλέγεται το υλικό. Έτσι προκύπτουν 11 τμήματα, που περιέχουν τις πληροφορίες κάθε υλικού.



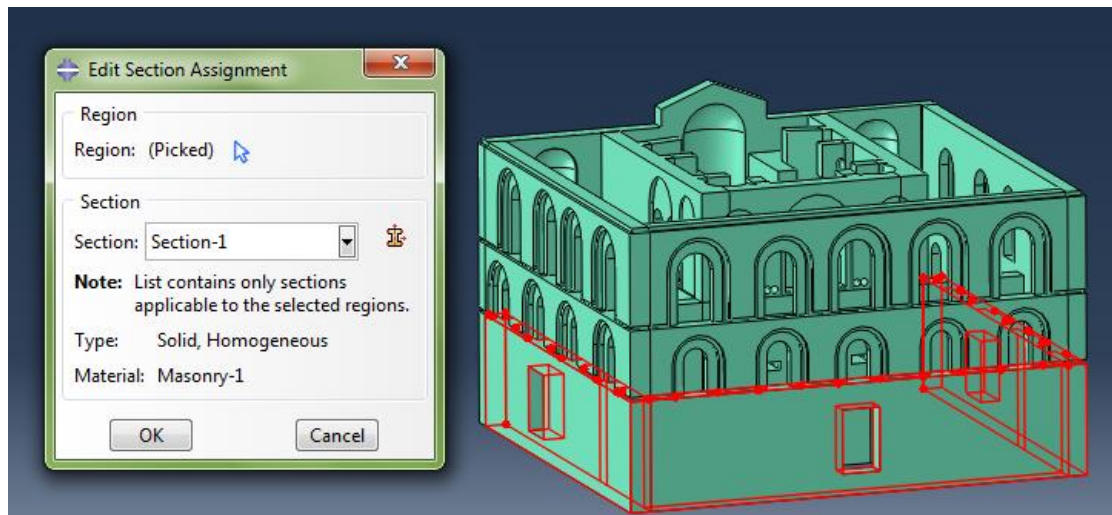
(α)



(β)

Εικόνα 5.9: (α) Ορισμός Section (β) Όλα τα Section που περιέχουν τις πληροφορίες των υλικών.

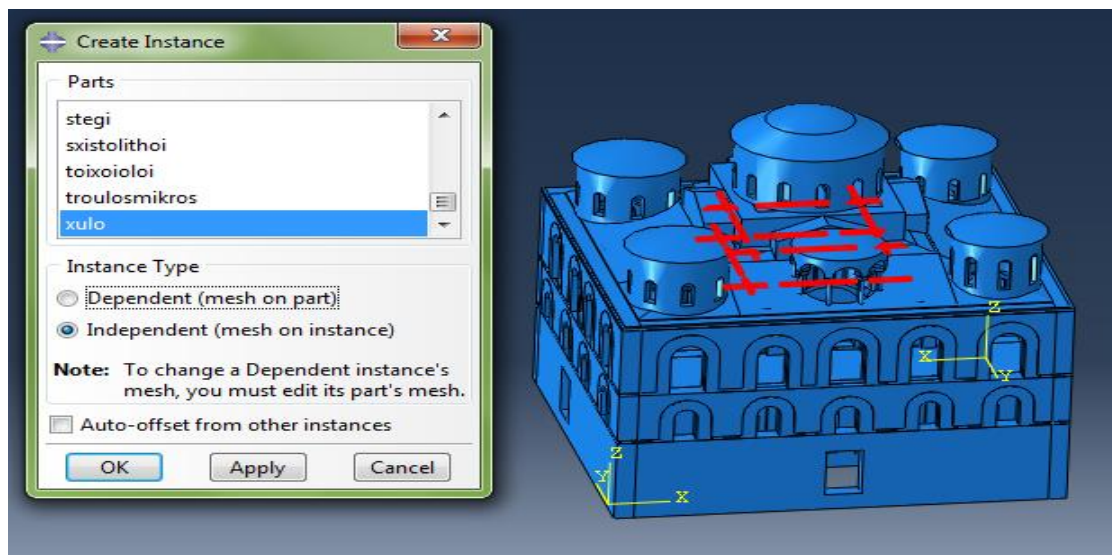
Στη συνέχεια επιλέγεται η εντολή Assign Section, όπου επιλέγεται κάθε μέρος του φορέα και αντιστοιχείται σε ένα από τα Section που περιέχουν τις πληροφορίες των υλικών.



Εικόνα 5.10: Επιλογή Partition κάτω μέρους της τοιχοποιίας και καθορισμός υλικού του.

5.2.4 Η δημιουργία της συνδεσμολογίας

Μετά τον καθορισμό των υλικών ακολουθεί ο ορισμός της συνδεσμολογίας του μοντέλου (Assembly). Εφαρμόζεται η εντολή Instance Part, της εργαλειοθήκης της ομάδας εντολών Assembly, για όλα τα μέρη του φορέα. Έχουν μεν δημιουργηθεί όλα τα μέρη του φορέα, αλλά το καθένα ανήκει στο δικό του σύστημα συντεταγμένων και είναι ανεξάρτητο από τα άλλα. Με τη συγκεκριμένη, λοιπόν, εντολή τοποθετούνται τα μέρη του μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέονται και να δημιουργηθεί το τελικό μοντέλο. Επιλέγεται ως Instance Type Independent (Mesh on Instance), που υποδεικνύει ότι γίνεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε μέρος ανεξάρτητα.



Εικόνα 5.11: Δημιουργία Instance των ξύλινων ελκυστήρων.

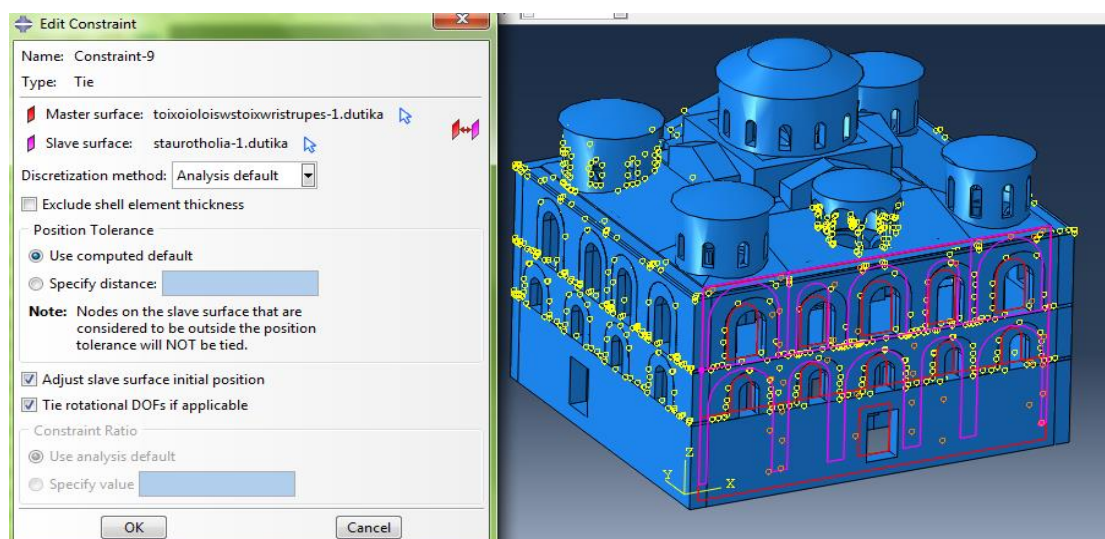
5.2.5 Ο προσδιορισμός των αλληλεπιδράσεων

Προς το παρόν όπως έχουν οριστεί τα μέρη του φορέα το καθένα συμπεριφέρεται ανεξάρτητα. Πρέπει, επομένως, στο στάδιο αυτό να καθοριστούν οι αλληλεπιδράσεις των μερών του φορέα. Για την ακρίβεια θα

οριστούν τα σημεία στα οποία τα μέρη του φορέα είναι σε επαφή. Στα σημεία αυτά περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας, καθώς το ένα μέρος επηρεάζει το άλλο και η παραμόρφωσή τους περιορίζεται.

Για τον παραπάνω σκοπό χρησιμοποιείται η εντολή Create Constraint (δημιουργία περιορισμού), της ομάδας εντολών Interaction και επιλέγεται Tie Constraint. Με την εντολή αυτή ενώνονται οι επιφάνειες ή οι περιοχές κόμβων δύο διαφορετικών μερών, ώστε να μην υπάρχει σχετική μετακίνηση μεταξύ τους. Για την ακρίβεια ενώνονται οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων κάθε μέρους.

Συνολικά έχουν οριστεί 40 Constraints. Χρησιμοποιήθηκαν επιφάνειες για τον ορισμό των περιορισμών, καθώς ήταν πιο εύχρηστες από την περιοχή κόμβων όπου έπρεπε να επιλεγεί ο κάθε κόμβος ξεχωριστά. Οι επιφάνειες που ενωθήκαν είχαν ήδη οριστεί σε κάθε μέρος, ώστε να είναι πιο εύκολη η επιλογή τους.



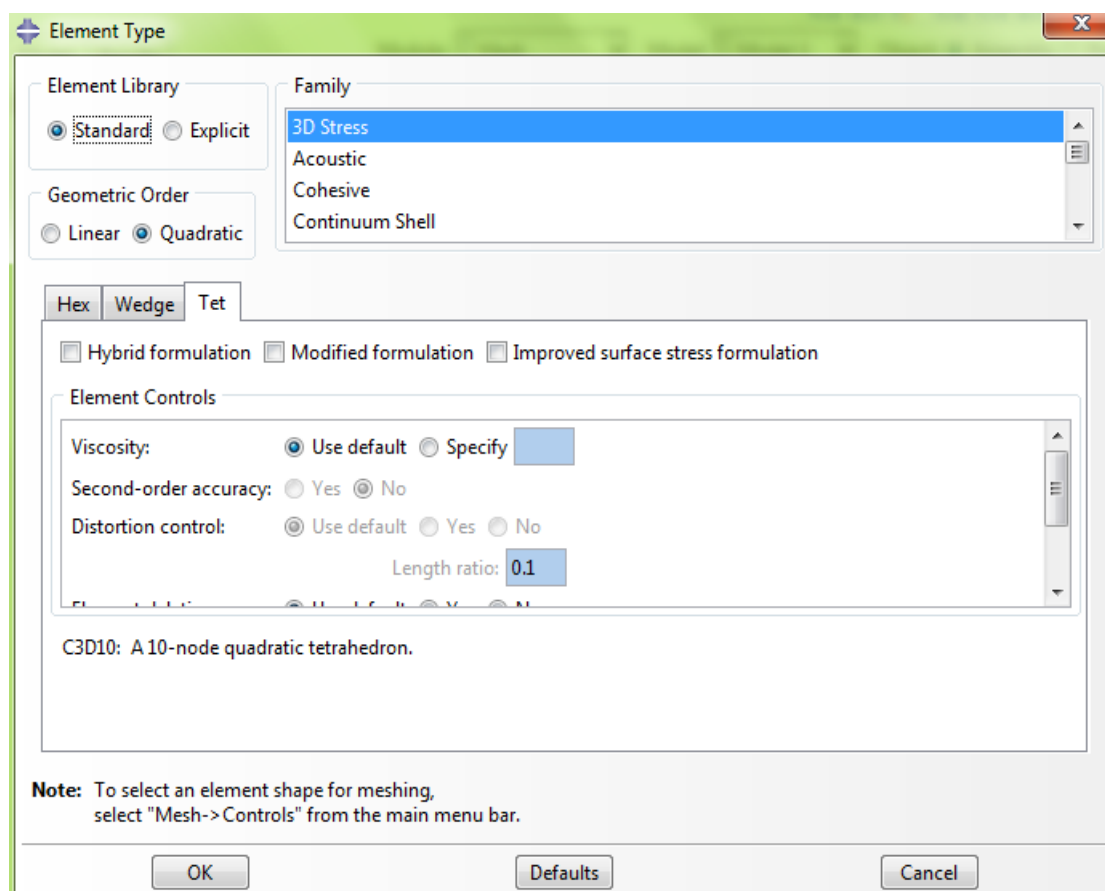
Εικόνα 5.12: Ορισμός Constraint μεταξύ της εσωτερικής δυτικής πλευρά της τοιχοποιίας και των διαμερισμάτων του περιστώου.

Ως Master Surface (κυρίαρχη επιφάνεια) επιλέγεται αυτή που έχει καλύτερη διακριτοποίηση.

5.2.6 Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων

Επόμενο βήμα ήταν η διακριτοποίηση του μοντέλου με τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Επιλέχθηκε για όλα τα μέρη ο ίδιος τύπος πεπερασμένου στοιχείου. Συγκεκριμένα, έγινε η διακριτοποίηση με τη χρήση τετραεδρικών στοιχείων (Tet Elements) C3D10. Τα στοιχεία αυτά είναι δεύτερης τάξης (Quadratic) και αποτελούνται από δέκα κόμβους και άρα έχουν 30 βαθμούς ελευθερίας. Δεν επιλέχθηκαν τα γραμμικά τετραεδρικά στοιχεία με τέσσερεις κόμβους (Linear), γιατί αν και επιλύονται πολύ πιο γρήγορα, δεν είναι τόσο αξιόπιστα. Αντίθετα, τα μη γραμμικά στοιχεία απαιτούν πολύ περισσότερο χρόνο για την επίλυση αφού είναι περισσότερες

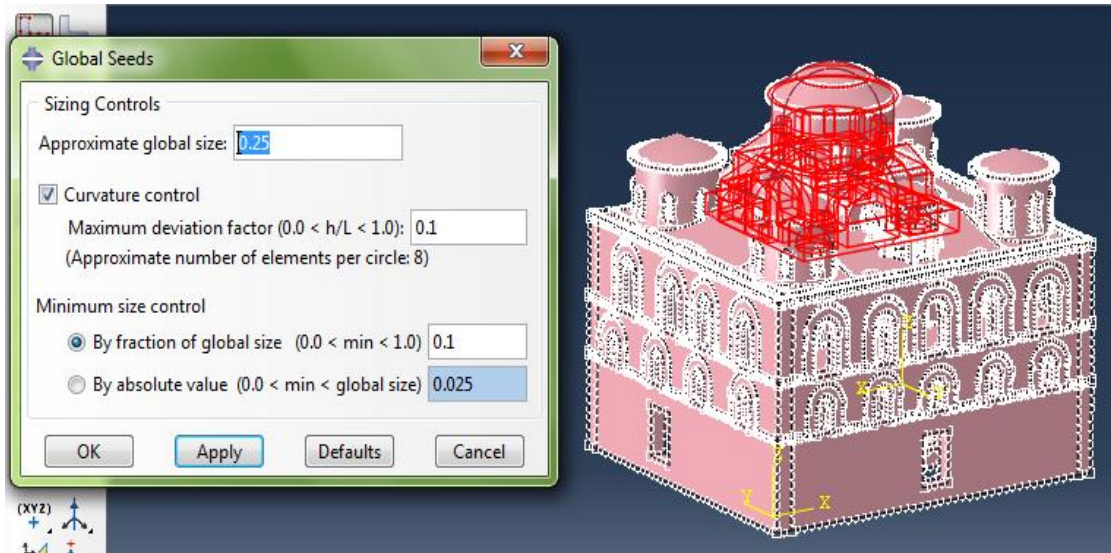
οι εξισώσεις, αλλά είναι πολύ πιο ακριβή τα αποτελέσματα τους. Στο ABAQUS ο τύπος του πεπερασμένου στοιχείου καθορίζεται με τη εντολή Assign Element Type που υπάρχει στην εργαλειοθήκη της ομάδας εντολών Mesh.



Εικόνα 5.13: Ορισμός τύπου πεπερασμένου στοιχείου για όλα τα μέρη του φορέα.

Επισημαίνεται ότι κάποιες φορές είναι χρήσιμο να γίνουν πρώτα οι αναλύσεις με τη χρήση των γραμμικών στοιχείων, ώστε να ελεγχθεί ότι τα δεδομένα που έχουμε εισάγει είναι σωστά και μετά να εφαρμοστούν τα στοιχεία ανωτέρας τάξης.

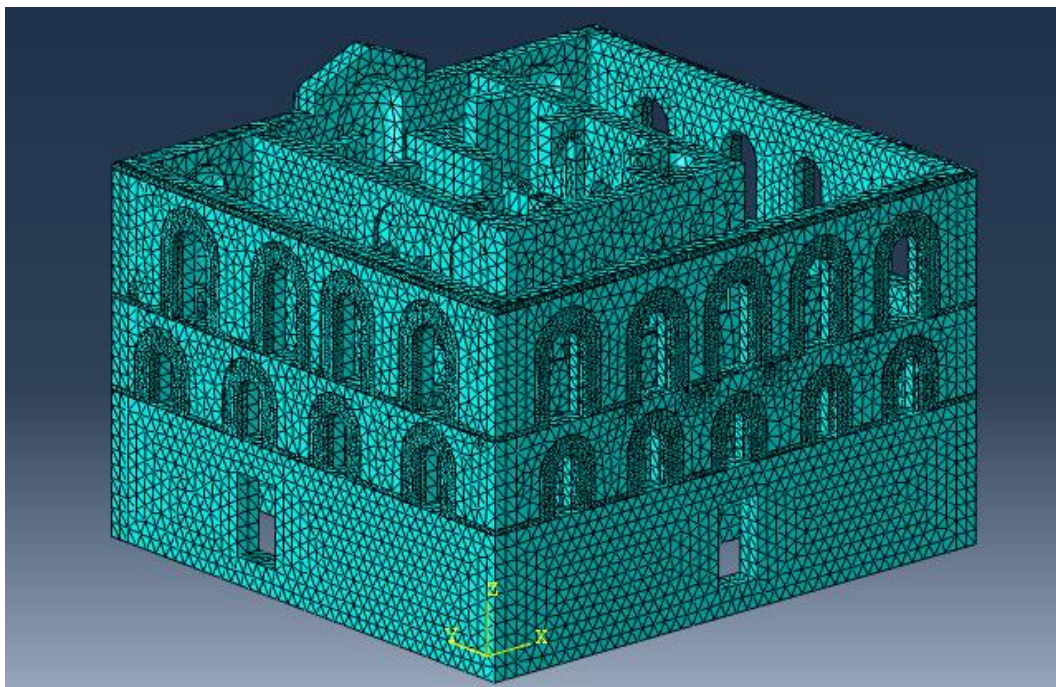
Σε κάθε μέρος η διακριτοποίηση έγινε ξεχωριστά με την τεχνική του ελεύθερου (Free) δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, διότι δεν επιλέχθηκε η ίδια πυκνότητα δικτύου σε όλα τα μέρη του φορέα. Γενικά το δίκτυο των πεπερασμένων δεν έγινε πολύ πυκνό λόγω του μεγέθους του μοντέλου, όμως δόθηκε βαρύτητα στα μέρη που καταπονούνται περισσότερο και έχουν μεγαλύτερη διακύμανση στην κατανομή των τάσεων, όπως οι μαρμάρيني κίονες. Στο πρόγραμμα ABAQUS η πυκνότητα του δικτύου καθορίζεται με την εντολή Seed→Instance, που στην ουσία είναι η “σπορά” των δεικτών, που τοποθετούνται κατά μήκος των άκρων των μερών, για να υποδειχθεί η επιθυμητή πυκνότητα του πλέγματος. Φαίνεται παρακάτω πως επιλέγεται το μέσο μέγεθος των δεικτών.



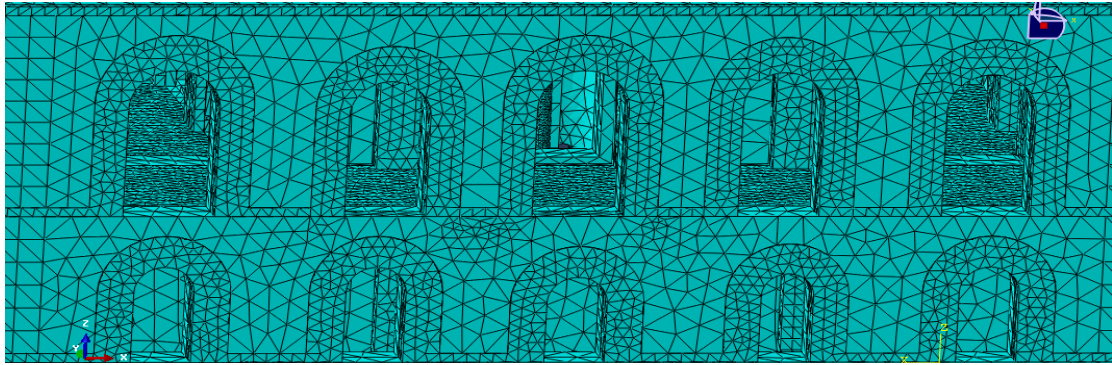
Εικόνα 5.14: Ορισμός μέσου μεγέθους των δεικτών στο άνω μέρος τους κυρίως ναού.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί η διακριτοποίηση που έγινε σε κάθε μέρος και η πυκνότητά του δικτύου που επιλέχθηκε.

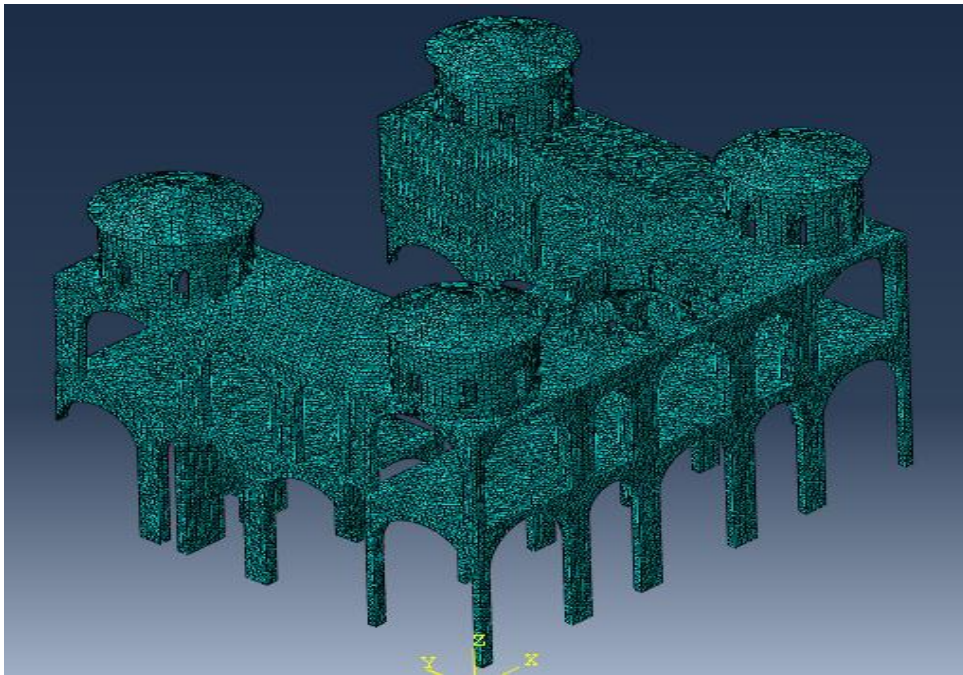
- Στην τοιχοποιία επιλέχθηκε μέσο μέγεθος δεικτών 0,5 μ. και στους πλίνθους 0,25 μ.
- Στα σταυροθόλια και στους σχιστόλιθους επιλέχθηκε μέσο μέγεθος δεικτών 0,25μ εκτός από τον κεντρικό ουρανίσκο όπου επιλέχθηκε 0,3μ.
- Στους μαρμαρίνους κίονες επιλέχθηκε μέσο μέγεθος δεικτών 0,15 μ. και στους ξύλινους ελκυστήρες 0,2 μ.



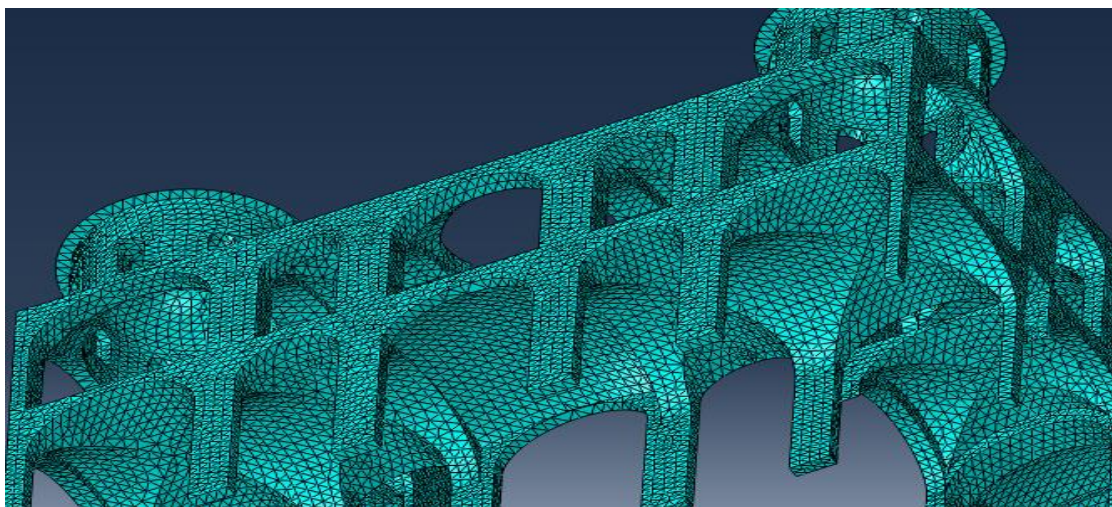
Εικόνα 5.15: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της τοιχοποιίας και των πλίνθινων στοιχείων.



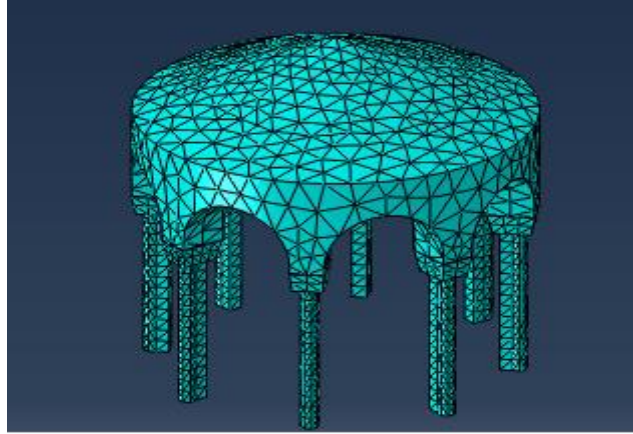
Εικόνα 5.16: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πλίνθινων στοιχείων.



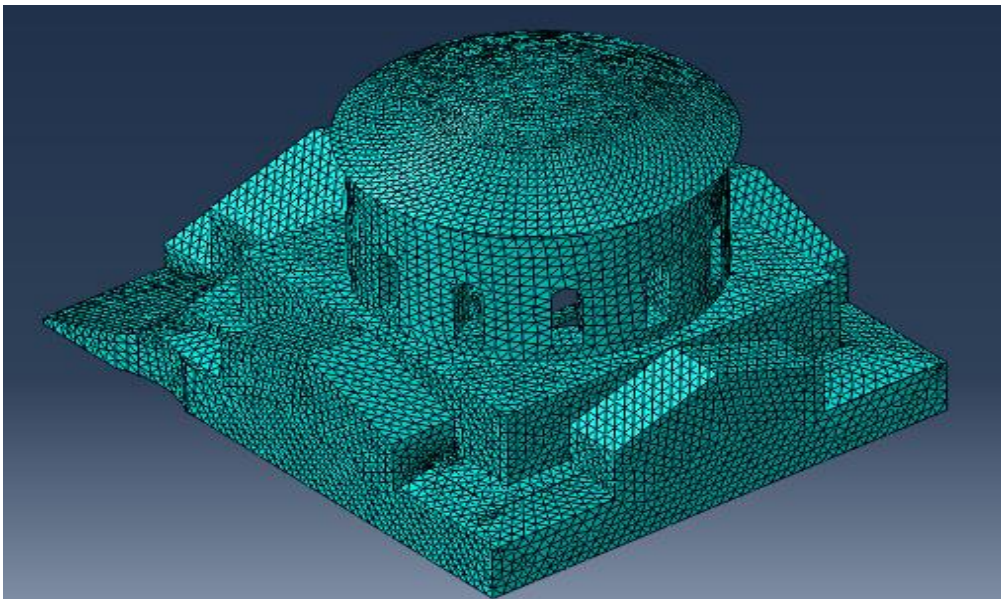
Εικόνα 5.17: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων περιμετρικών τρούλων και διαμερισμάτων περιστώου.



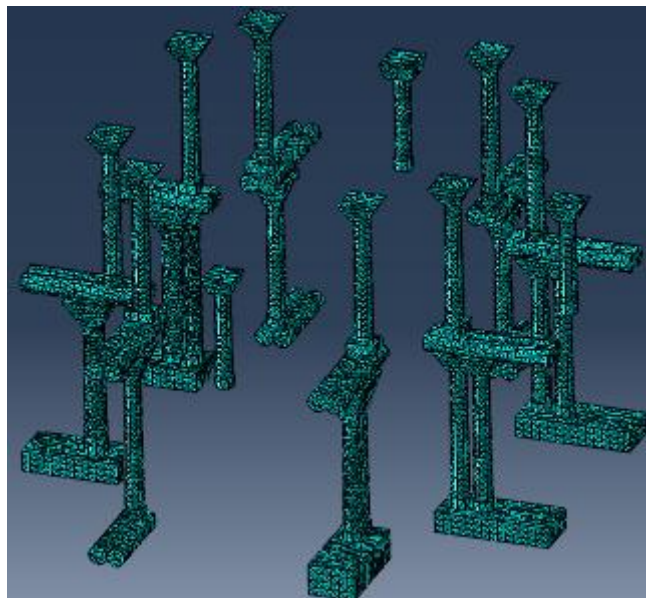
Εικόνα 5.18: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων θολωτών κατασκευών.



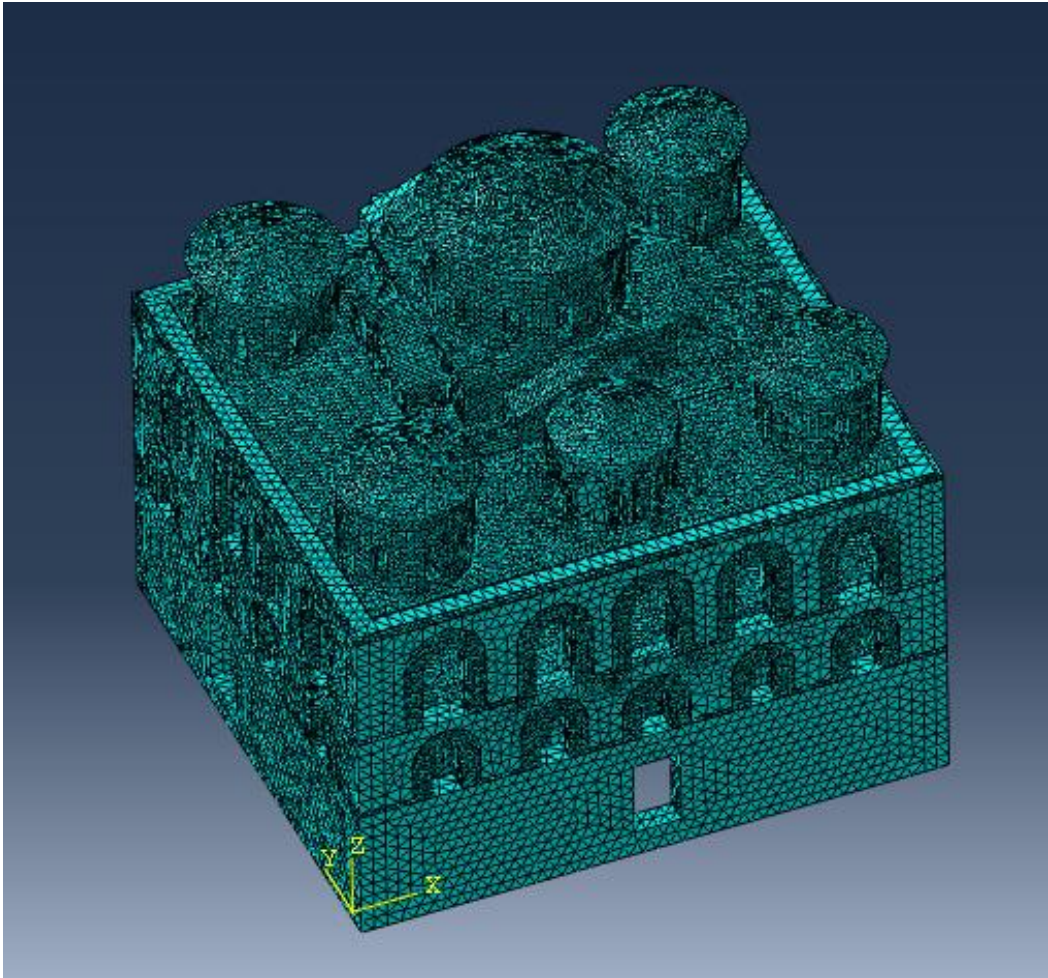
Εικόνα 5.19: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ουρανίσκου και κίονων που τον στηρίζουν.



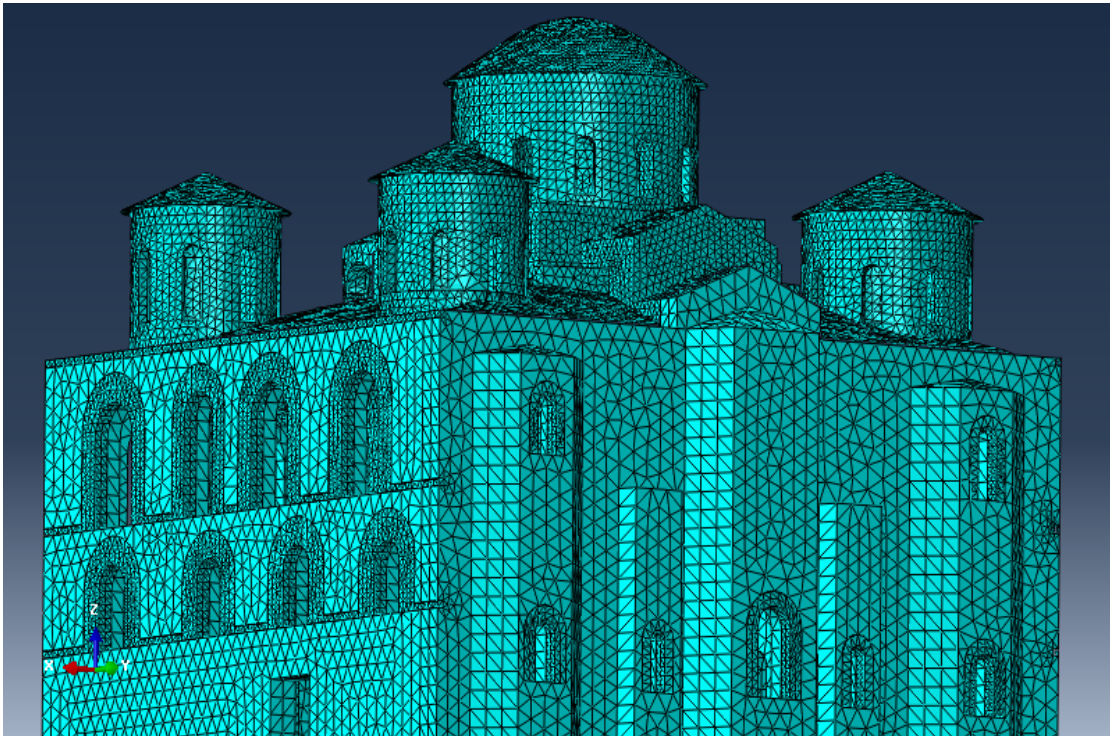
Εικόνα 5.20: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σχιστόλιθων και κεντρικού τρούλου.



Εικόνα 5.21: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων μαρμάρινων κίονων και οριζόντιων προβόλων.



Εικόνα 5.22: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων τελικού μοντέλου εκ της βορειοδυτικής πλευράς.



Εικόνα 5.23: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων τελικού μοντέλου εκ της νοτιοανατολικής πλευράς.

Το τελικό προσομοίωμα αποτελείται συνολικά από 685888 πεπερασμένα στοιχεία και 3421020 βαθμούς ελευθερίας.

```

P R O B L E M   S I Z E

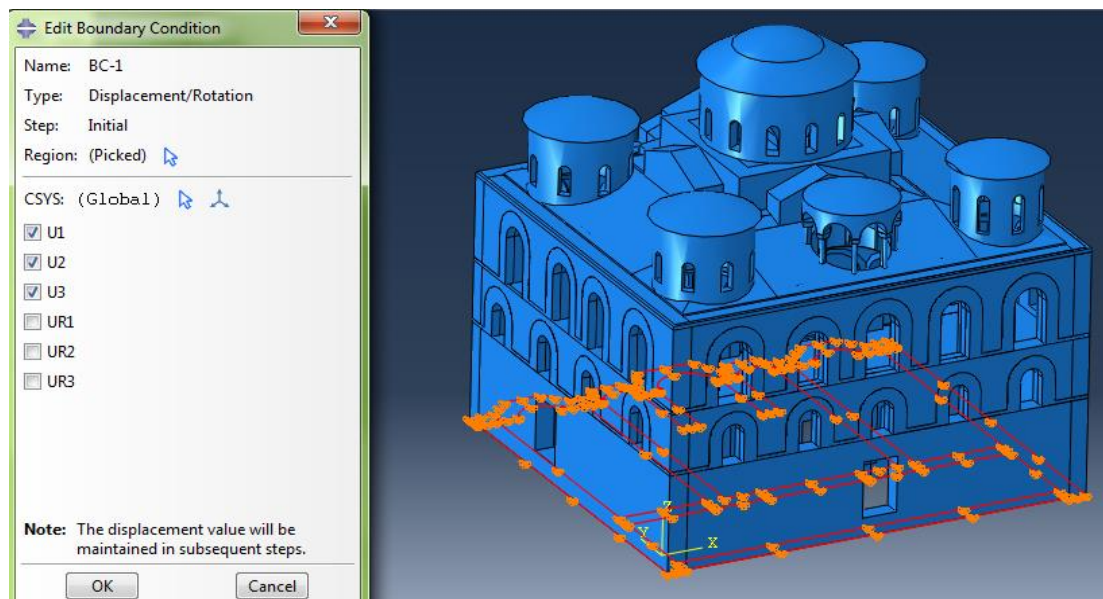
NUMBER OF ELEMENTS IS                685888
NUMBER OF NODES IS                   1140340
NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER  1140340
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL 3421020
(DEGREES OF FREEDOM PLUS MAX NO. OF ANY LAGRANGE MULTIPLIER
VARIABLES. INCLUDE *PRINT,SOLVE=YES TO GET THE ACTUAL NUMBER.)
```

Εικόνα 5.24: Μέγεθος προβλήματος επίλυσης.

5.2.7 Ορισμός στήριξης του φορέα

Κοινή σε όλες τις αναλύσεις είναι η στήριξη του φορέα, όπου αρθρώθηκε η κάτω επιφάνεια των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, που όπως αναφέρθηκε βρίσκονται σε στάθμη -1 μ.

Στο πρόγραμμα επιλέγεται από την εργαλειοθήκη της ομάδας εντολών Load, η εντολή Create Boundary Condition. Μετά διαλέγουμε Displacement/Rotation (μετακίνηση/ στροφή) και δεσμεύονται οι τρεις μετακινήσεις κατά x, y, z. Οι στροφές δε χρειάζεται να δεσμευτούν, γιατί αφού οι τοίχοι είναι τρισδιάστατα στερεά με τη δέσμευση των μετακινήσεων δεν μπορούν ούτε να στρίψουν. Η στήριξη εφαρμόζεται από το αρχικό βήμα της ανάλυσης (Initial Step).



Εικόνα 5.25: Ορισμός στήριξης του φορέα.

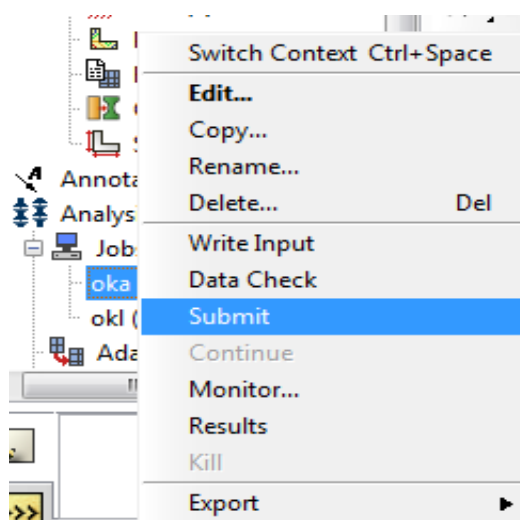
5.2.8 Υποβολή αναλύσεων και προβολή αποτελεσμάτων

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε χρησιμοποιήθηκε για όλες τις αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία, οι οποίες είναι ελαστικές. Σε κάθε ανάλυση δημιουργήθηκε διαφορετικό βήμα που καθορίζει την ανάλυση που γίνεται

κάθε φορά και εφαρμόστηκαν διαφορετικά φορτία, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Υποβολή εργασίας

Για να γίνει μία ανάλυση πρέπει να επιλεγεί η εντολή Create Job (Δημιουργία εργασίας) της εργαλειοθήκης της ομάδας εντολών Job. Κάνοντας δεξί κλικ πάνω στην εργασία που έχει δημιουργηθεί πατάμε Submit (υποβολή) και τρέχει την ανάλυση. Καλό είναι πριν τρέξουμε την ανάλυση να γίνει Data Check (έλεγχος των πληροφοριών), ώστε να είναι σίγουρο ότι τα δεδομένα που έχουμε εισάγει είναι σωστά. Τα αποτελέσματα τα βλέπουμε πατώντας Results στο παρακάτω παράθυρο.



Εικόνα 5.26: Υποβολή εργασίας.

Προβολή αποτελεσμάτων αναλύσεων

Σε όλες τις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια προβάλλονται οι μέγιστες μετακινήσεις και τάσεις που προκύπτουν από το κριτήριο Von Mises σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\sigma_{VM} = \left\{ \frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6 \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)] \right\}^{1/2}$$

Με το κριτήριο Von Mises είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι περιοχές αστοχίας της κατασκευής. Ακόμη, παρουσιάζονται και κάποιες από τις θλιπτικές και εφελκυστικές κύριες τάσεις. Κάποια πεπερασμένα στοιχεία εμφανίζουν πολύ μεγάλες τάσεις, οι οποίες αγνοούνται γιατί προκύπτουν από λάθος στην επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Λάθος γίνεται λόγω μη σωστής κατανομής των τάσεων γύρω από τους κόμβους που συμπίπτουν πολλά πεπερασμένα στοιχεία.

6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

6.1 ΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

6.1.1 Μόνιμα και κινητά φορτία της κατασκευής

Μόνιμα φορτία

- Ίδιο βάρος κατασκευής, υπολογίζεται από το πρόγραμμα.
- Φορτίο στέγης: 600 N/m^2
- Φορτίο στέγης στους εξωτερικούς τοίχους: 1000 N/m^2 , έχει θεωρηθεί αυξημένο γιατί έχει αφαιρεθεί όλο το μέρος της στέγης που πατάει πάνω στον εξωτερικό τοίχο.

Κινητά φορτία

Το μόνο κινητό φορτίο που υπάρχει στο παρόν κτίριο είναι το χιόνι.

- Φορτίο χιονιού : Στη στέγη : 350 N/m^2

Στις σκεπές των τρούλων : 400 N/m^2

Στη μία πλευρά των δίκλινων σκεπών : 400 N/m^2

Το χιόνι υπολογίστηκε από τον Ευρωκώδικα 1 σύμφωνα με τη σχέση:

$$S = \mu_1 C_e C_t S_k$$

Στην Άρτα η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στο έδαφος είναι $S_k = 390 \text{ N/m}^2$. Θεωρήθηκαν κανονικές συνθήκες ανέμου για την κατασκευή, οπότε $C_e = 1$ και θερμικός συντελεστής $C_t = 1$. Η κλίση στη στέγη είναι μικρότερη των 30° και λαμβάνεται $\mu_1 = 0,8$ για μονοκλινή στέγη. Στους τρούλους έχει γίνει η θεώρηση ότι $\mu_1 = 1$. Το ίδιο έχει θεωρηθεί για το συντελεστή μ_2 των δίκλινων σκεπών γύρω από τη βάση του κεντρικού τρούλου. Επομένως, προκύπτουν τα εξής φορτίου χιονιού στη στέγη του κτιρίου και στις στέγες των τρούλων αντίστοιχα:

$$S_1 = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 390 \text{ N/m}^2 = 312 \text{ N/m}^2$$

$$S_2 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 390 \text{ N/m}^2 = 390 \text{ N/m}^2$$

Στην ανάλυση έχει ληφθεί λίγο αυξημένο υπέρ της ασφαλείας.

Κανονικά σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα για τις δίκλινες στέγες πρέπει να ληφθούν τέσσερις περιπτώσεις φορτίσεων, αλλά έχει ληφθεί υπόψη μόνο η μία, αφού έτσι κι αλλιώς το φορτίο του χιονιού είναι πολύ μικρό.

6.1.2 Συνδυασμοί φορτίσεων

Στατική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την οριακή κατάσταση αστοχίας, όπου λαμβάνονται υπόψη τα μόνιμα φορτία με συντελεστή ασφαλείας 1,35 και το κινητό με συντελεστή 1,5.

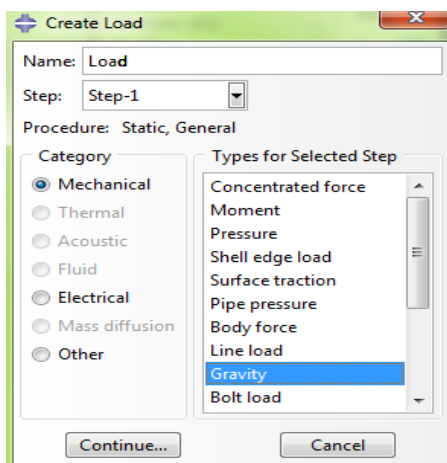
Φορτία στην ΟΚΑ

- Φορτίο στέγης $1,35 \cdot 600 = 810 \text{ N/m}^2$
- Φορτίο στέγης στους εξωτερικούς τοίχους: $1,35 \cdot 1000 = 1350 \text{ N/m}^2$
- Φορτίο χιονιού της στέγης: $1,5 \cdot 350 = 530 \text{ N/m}^2$
- Φορτίο χιονιού των σκεπών των τρούλων $1,5 \cdot 400 = 600 \text{ N/m}^2$

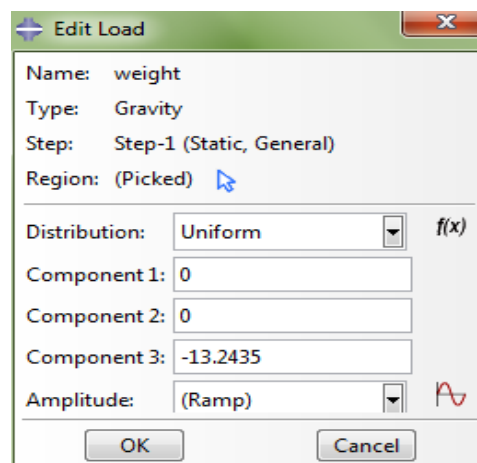
6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ABAQUS

Η στατική ανάλυση που έγινε είναι ελαστική και για να πραγματοποιηθεί δημιουργήθηκε Step \rightarrow Procedure Type: General \rightarrow Static, General με την εντολή Create Step της εργαλειοθήκης της ομάδας εντολών Step.

Τα φορτία δημιουργήθηκαν με την εντολή Create Load που βρίσκεται στην εργαλειοθήκη της ομάδας εντολών Load. Ανάλογα με το φορτίο που επιβάλλεται διαλέγουμε μία από τις επιλογές που φαίνονται στο παρακάτω παράθυρο.



(α)



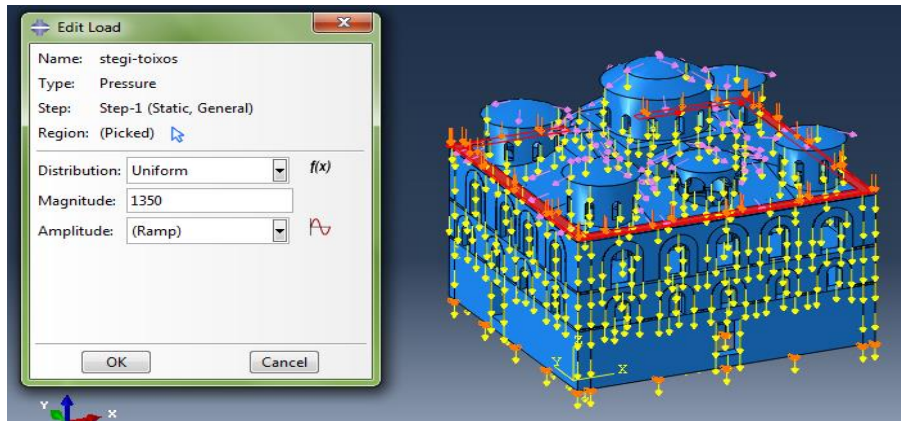
(β)

Εικόνα 6.1: (α) Είδη φορτίων που μπορούν να επιβληθούν (β) Ορισμός ίδιου βάρους ως Gravity Load.

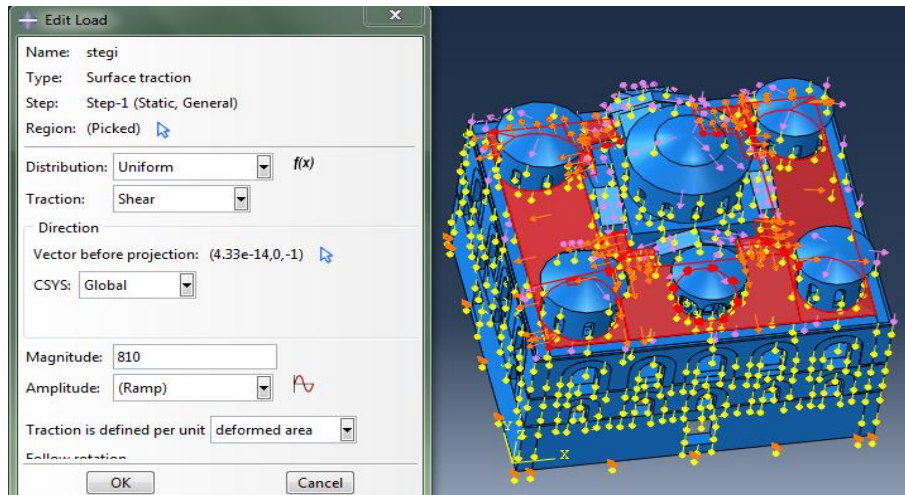
Το ίδιο βάρος επιβάλλεται ως Gravity Load (φορτίο βαρύτητας). Επιλέγεται όλος ο φορέας και στον άξονα του z βάζουμε το $1,35 \cdot g$ με αρνητικό πρόσημο, ώστε να ασκηθεί το φορτίο κατακόρυφα προς τα κάτω. Ουσιαστικά το πρόγραμμα πολλαπλασιάζει τη μάζα κάθε μέρους με την επιτάχυνση βαρύτητας και υπολογίζει μόνο του το ίδιο βάρος.

Το φορτίο της στέγης στον τοίχο επιβάλλεται ως Pressure (πίεση) και επιλέγεται η επιφάνεια που ασκείται και το μέγεθος του φορτίου. Τα φορτία, όμως, της στέγης και του χιονιού επιβάλλονται ως Surface Traction, γιατί

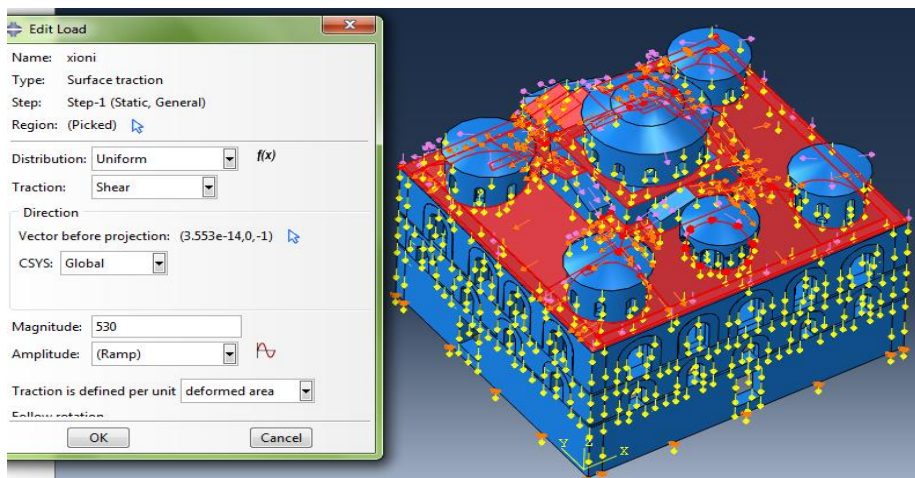
ασκούνται κατά τον άξονα των z και όχι κάθετα στην επιφάνεια όπως συμβαίνει με το φορτίο της πίεσης. Και πάλι επιλέγεται η επιφάνεια που ασκείται, το μέγεθος του φορτίου, αλλά και το διάγραμμα που δείχνει τη φορά και τη διεύθυνση του φορτίου.



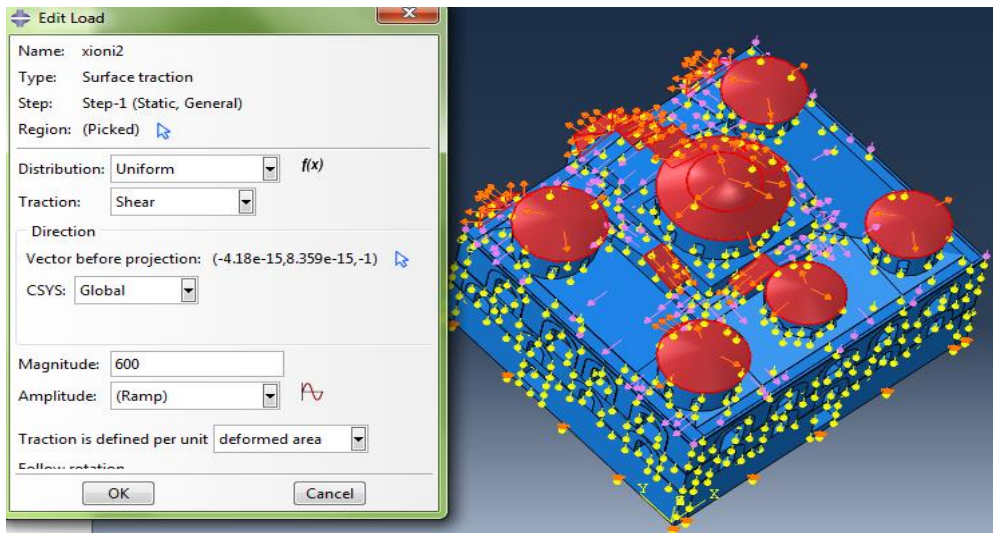
Εικόνα 6.2: Επιβολή φορτίου στέγης στην εξωτερική τοιχοποιία.



Εικόνα 6.3: Επιβολή φορτίου στέγης.



Εικόνα 6.4: Επιβολή φορτίου χιονιού στη στέγη.

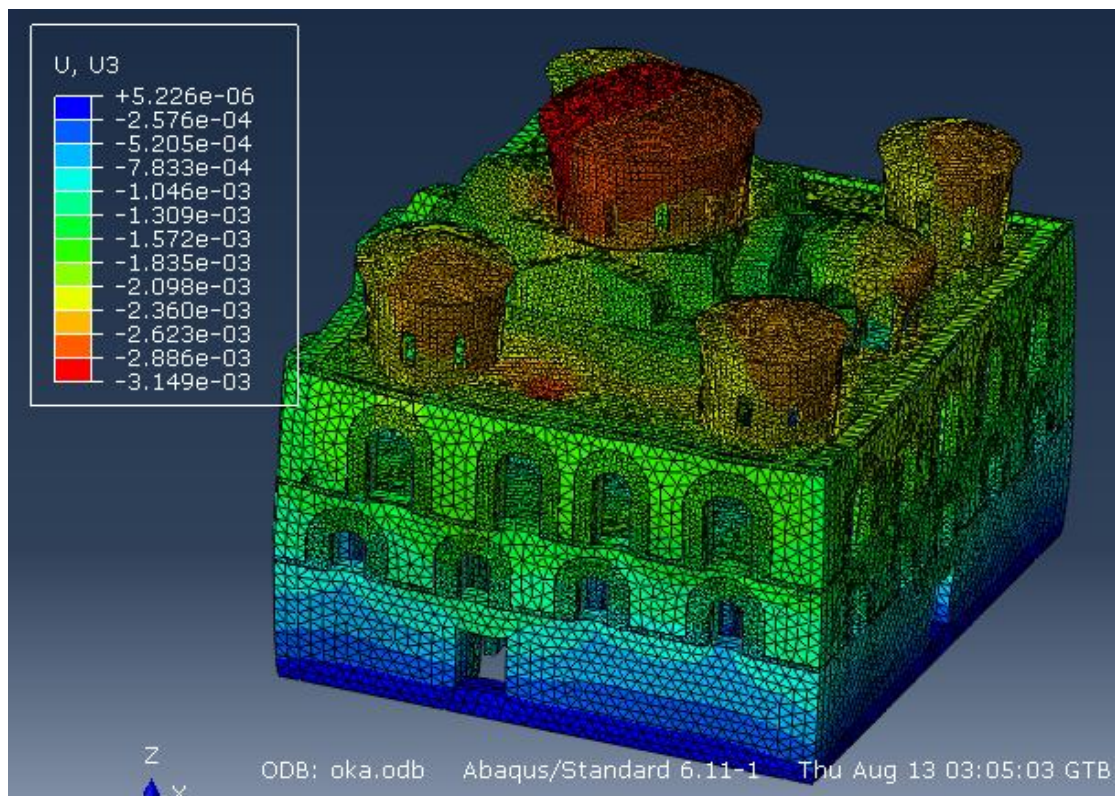


Εικόνα 6.5: Επιβολή φορτίου χιονιού στις σκεπές των τρούλων και στις δίκλινες και τρίκλινες σκεπές.

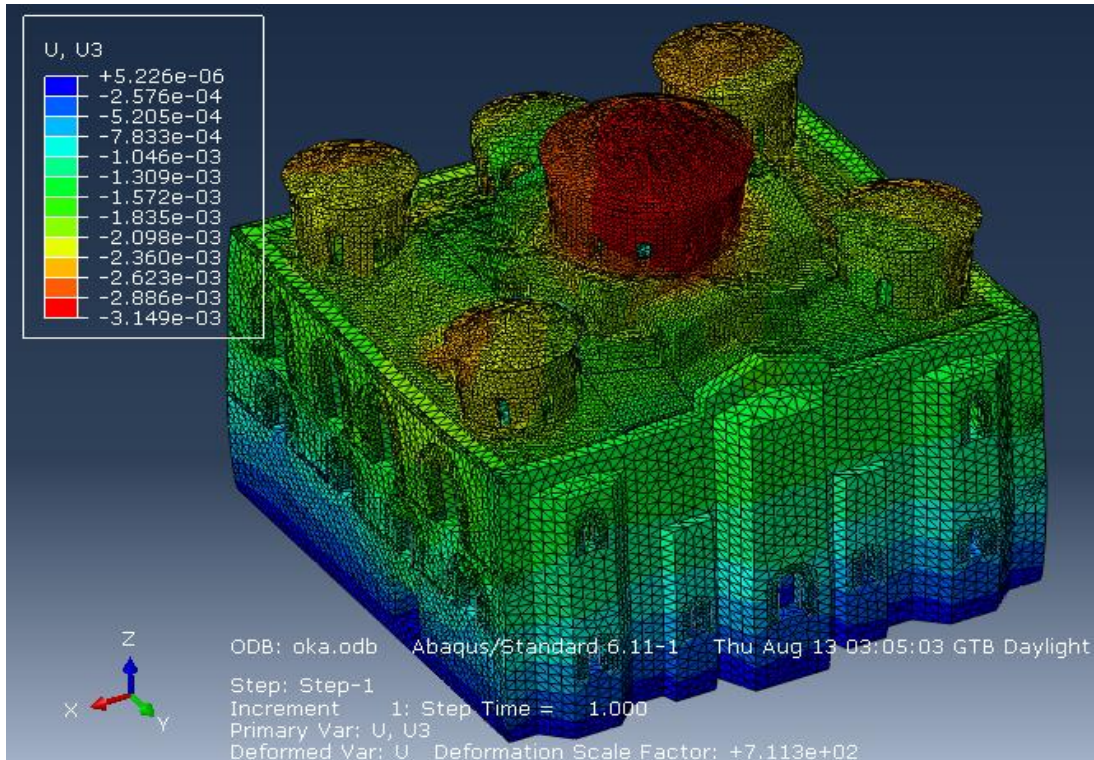
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

6.3.1 Μετατοπίσεις

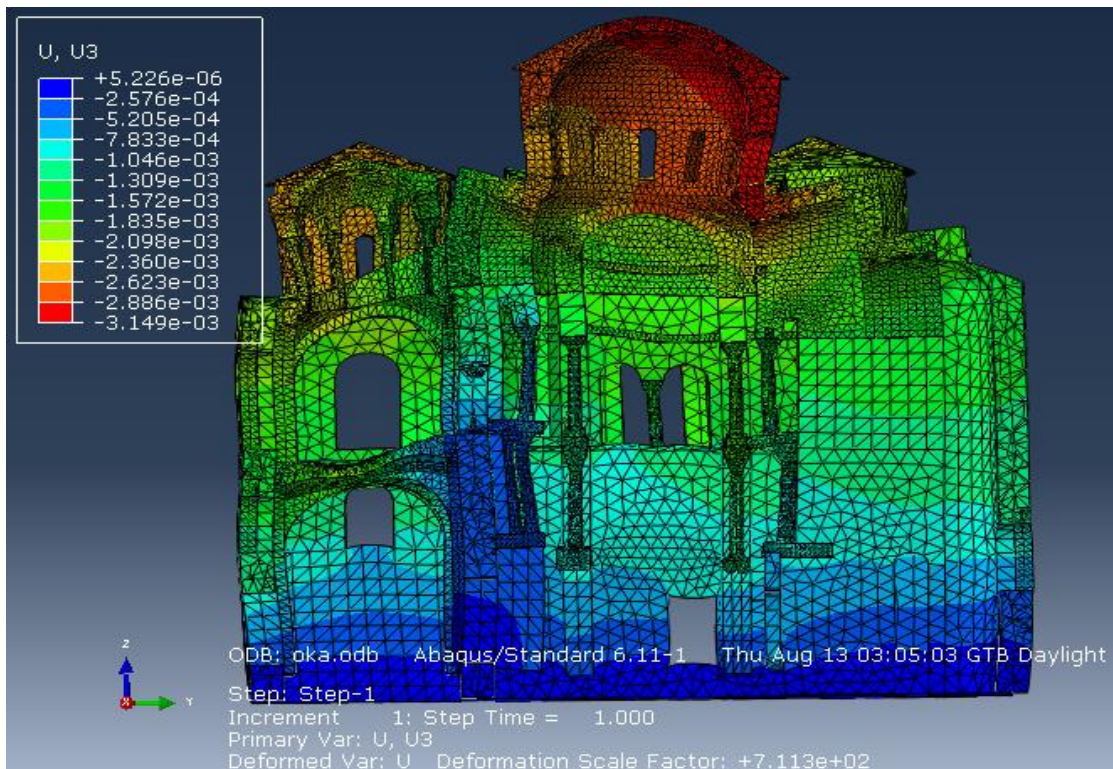
Οι μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται στο κέλυφος του κεντρικού τρούλου. Οι τιμές είναι της τάξεως των 3 χιλιοστών. Ακολουθούν σε μέγεθος οι τιμές των μετατοπίσεων των κορυφών των περιμετρικών τρούλων.



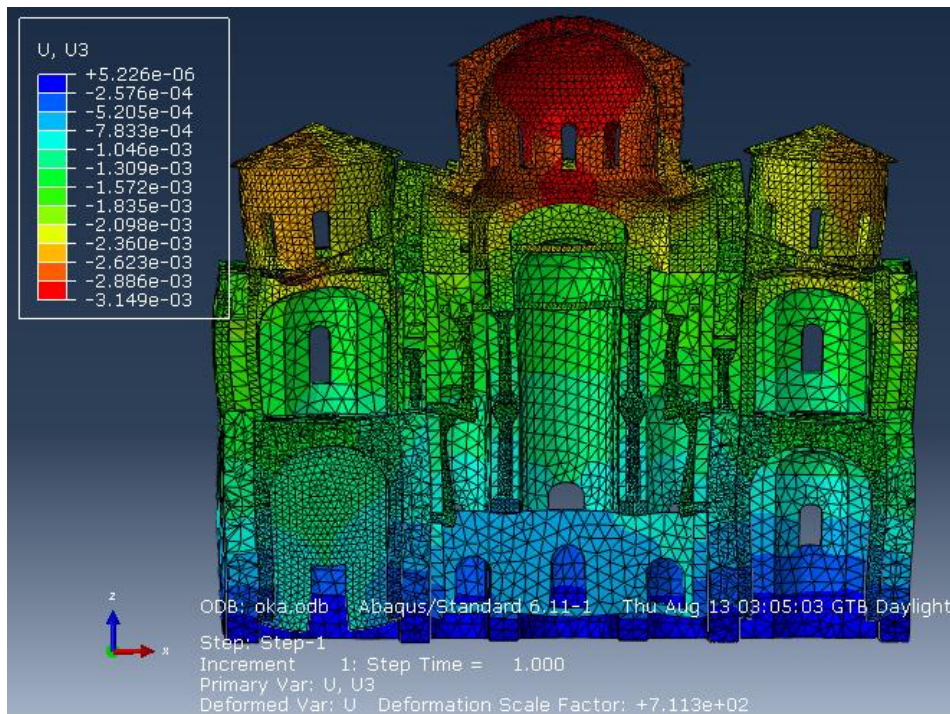
Εικόνα 6.6: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα εκ της βορειοδυτικής πλευράς.



Εικόνα 6.7: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα εκ της νοτιοανατολικής πλευράς.



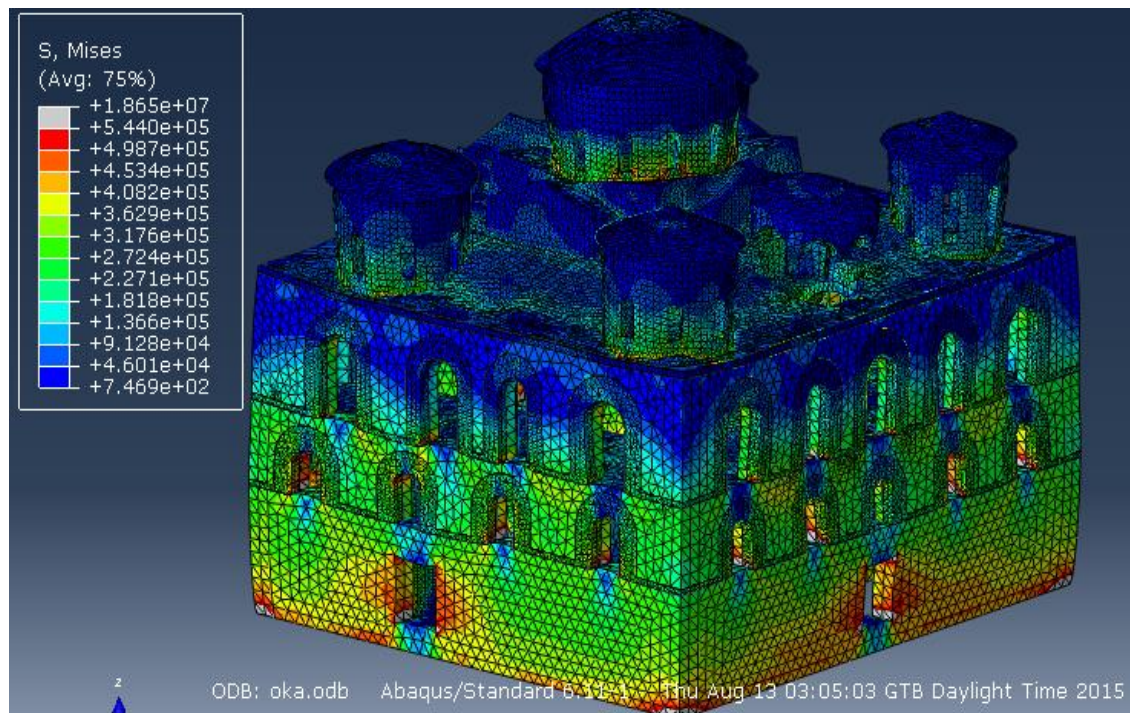
Εικόνα 6.8: Κατακόρυφες μετακινήσεις εσωτερικού του κτιρίου στο επίπεδο YZ.



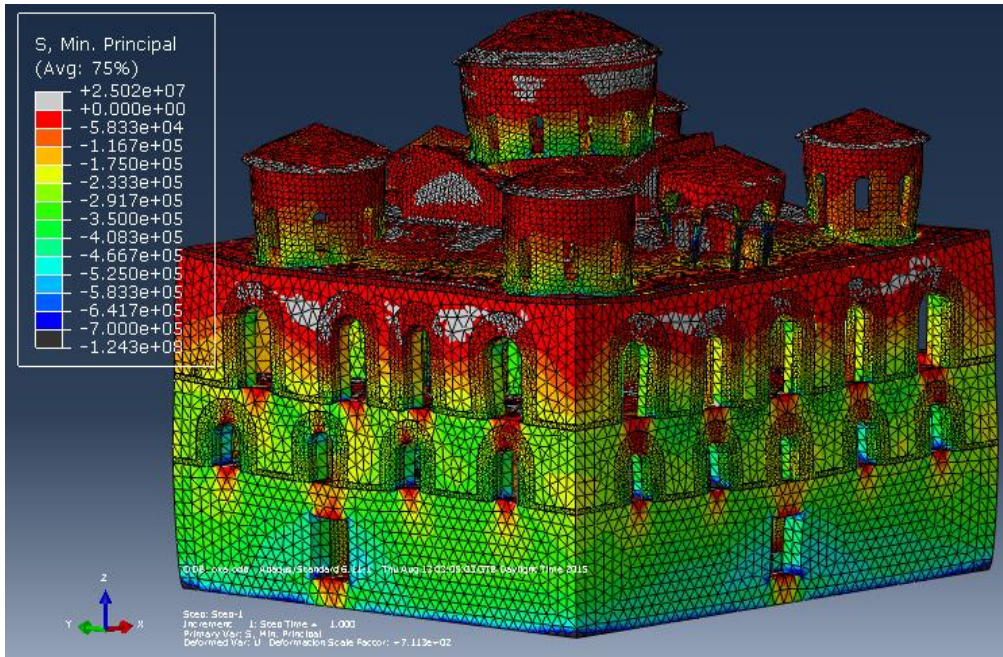
Εικόνα 6.9: Κατακόρυφες μετακινήσεις εσωτερικού του κτιρίου στο επίπεδο XZ.

6.3.2 Τάσεις

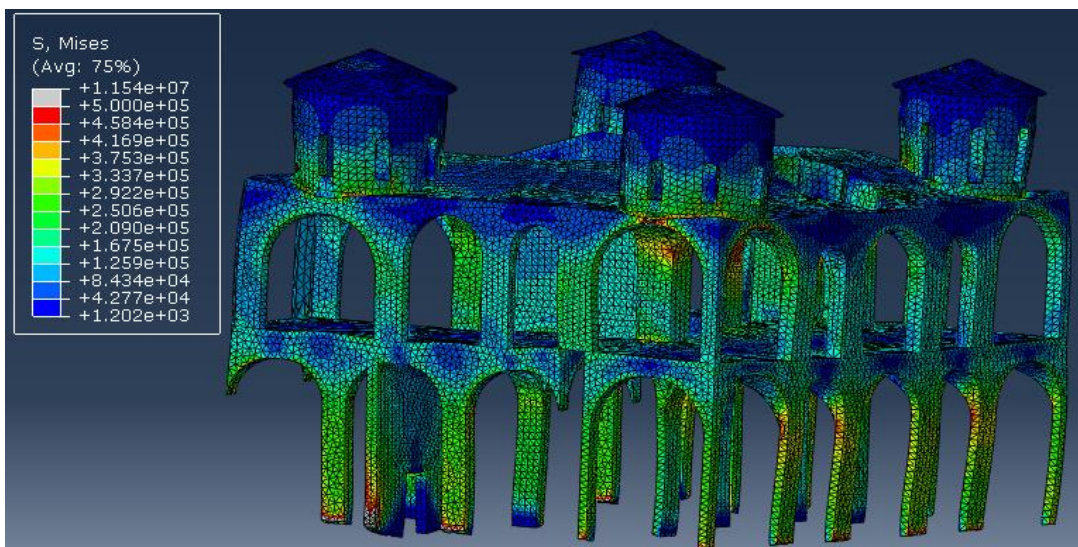
Οι τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή λόγω του στατικού φορτίου γενικά είναι μικρές. Περισσότερο καταπονούνται οι παραστάδες των διαμερισμάτων του νάρθηκα, ο κεντρικός τρούλος και η δυτική καμάρα που τον στηρίζει. Στον κεντρικό τρούλο και στη δυτική καμάρα παρατηρείται η μέγιστη καταπόνηση, οι τάσεις φτάνουν το 50% της θλιπτικής αντοχής.



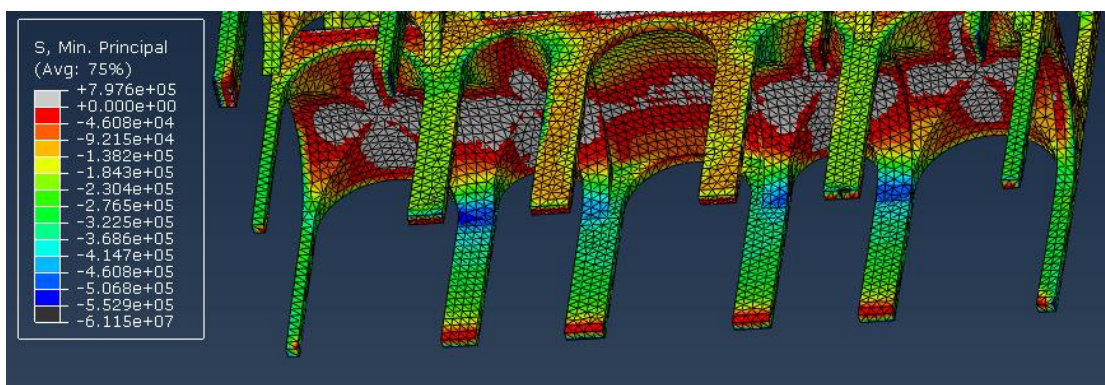
Εικόνα 6.10: Κατανομή τάσεων Von Mises στο συνολικό φορέα.



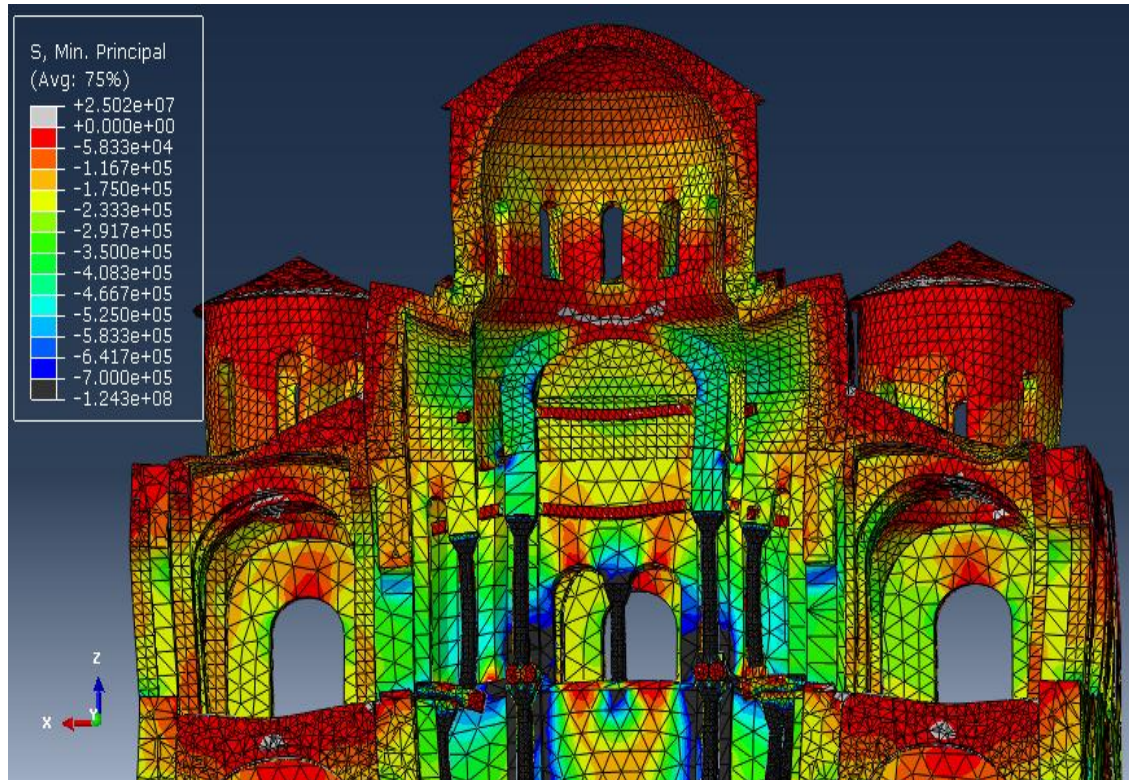
Εικόνα 6.11: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στο συνολικό φορέα.



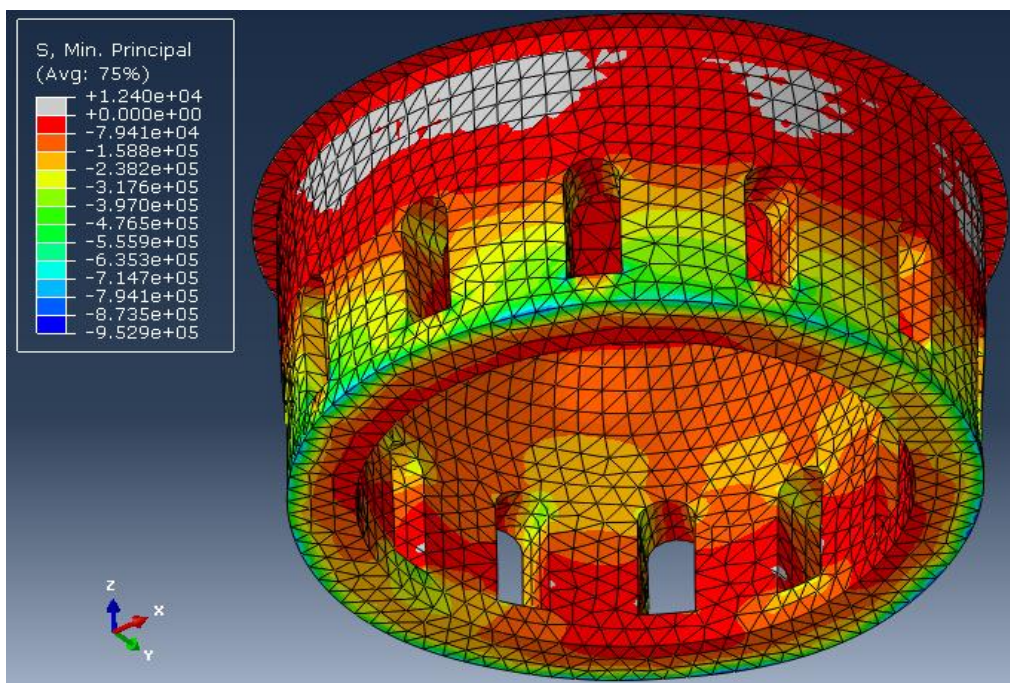
Εικόνα 6.12: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του περιστώου, οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται στις παραστάδες των διαμερισμάτων του νάρθηκα.



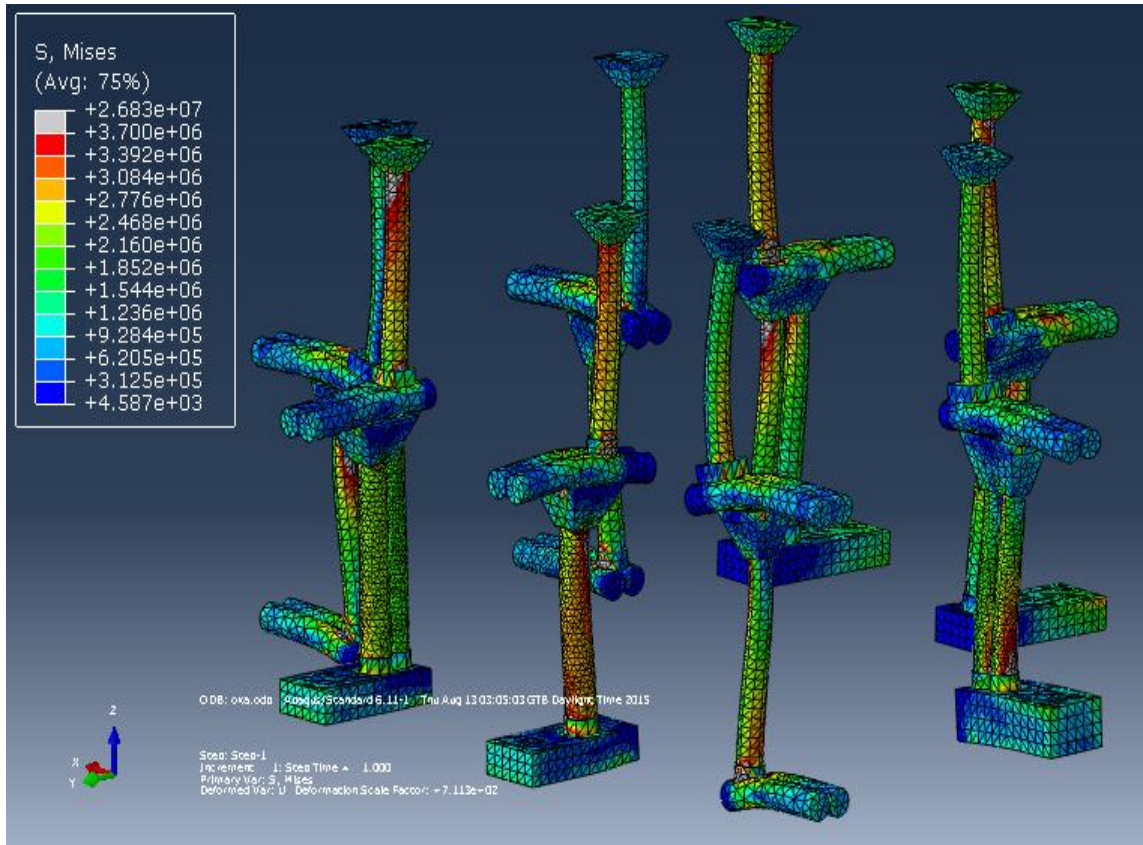
Εικόνα 6.13: Κατανομή θλιπτικών κύριων τάσεων στις παραστάδες των διαμερισμάτων του νάρθηκα, ξεπερνούν το 35% της θλιπτικής αντοχής.



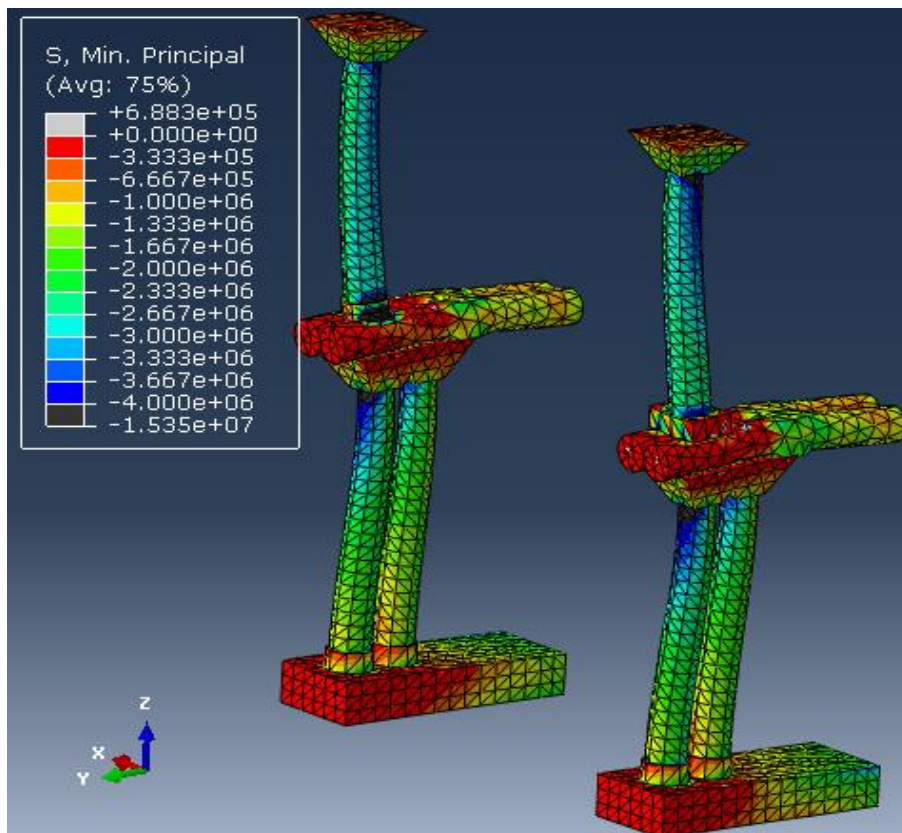
Εικόνα 6.14: Κατανομή θλιπτικών τάσεων στη δυτική πλευρά του εσωτερικού του κτιρίου. Οι μαύρες περιοχές εμφανίζουν μεγαλύτερες τάσεις. Μέγιστη καταπόνηση παρουσιάζει η δυτική καμάρα που στηρίζει τον κεντρικό τρούλο, φτάνει το 50% της θλιπτικής αντοχής.



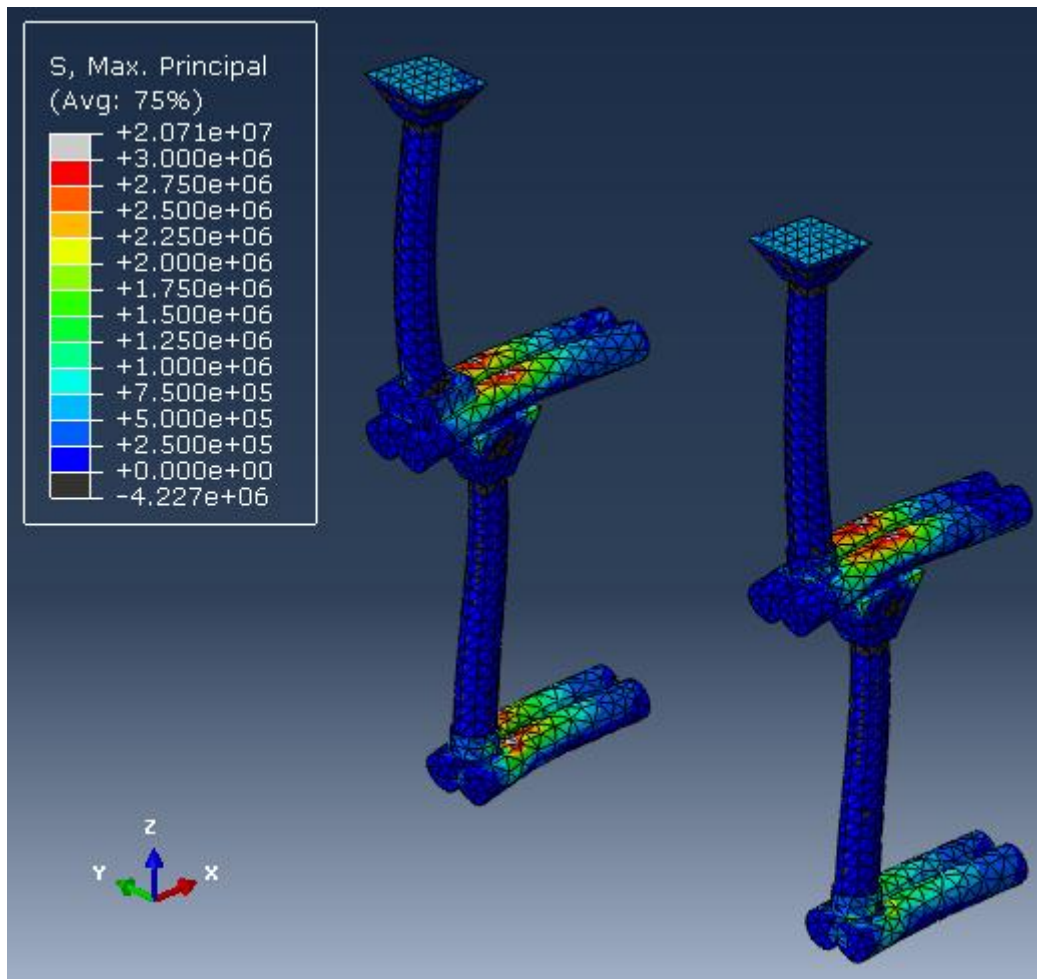
Εικόνα 6.15: Κατανομή θλιπτικών κύριων τάσεων στον κεντρικό τρούλο, ξεπερνούν το 50% της θλιπτικής αντοχής.



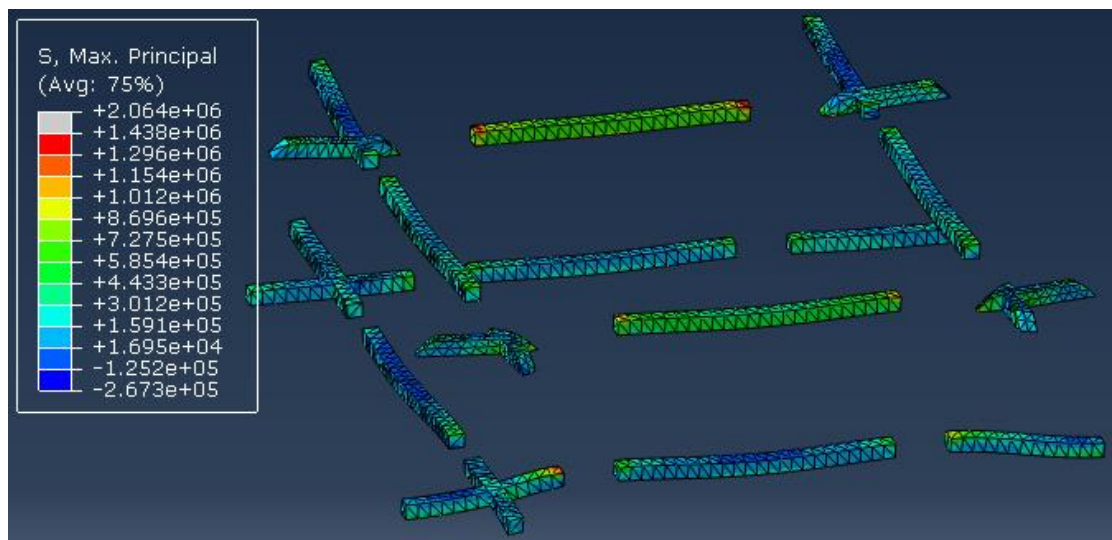
Εικόνα 6.16: Κατανομή τάσεων Von Mises των μαρμάρινων κίωνων που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.



Εικόνα 6.17: Κατανομή θλιπτικών κύριων τάσεων ζεύγους μαρμάρινων κίωνων δυτικής πλευράς, που εμφανίζουν μεγαλύτερες τάσεις φτάνουν τα 5 MPa στον κορμό, δηλαδή 20% θλιπτικής αντοχής.



Εικόνα 6.18: Κατανομή εφελκυστικών κύριων τάσεων ζεύγους μαρμάρινων κίωνων δυτικής πλευράς. Στους οριζόντιους προβόλους εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές.



Εικόνα 6.19: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων ξύλινων ελκυστήρων, οι εφελκυστικές φτάνουν 25% εφελκυστικής αντοχής.

7. ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ

7.1 ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ABAQUS

Σημαντικό κομμάτι για την κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής είναι η εύρεση των ιδιομορφών, από τις ελεύθερες ταλαντώσεις του φορέα. Για να προκύψουν οι τιμές των ιδιομορφών από το ABAQUS δημιουργείται βήμα μετά το αρχικό βήμα, επιλέγεται Create Step→Procedure type: Linear Perturbation→Frequency.

Το λογισμικό του ABAQUS υπολογίζει το μητρώο της μάζας και της δυσκαμψίας του φορέα, τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές της κατασκευής από τη γνωστή σχέση $(-\omega^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\varphi\} = 0$. Η συνολική μάζα του μοντέλου είναι 4690,2 Mgr.

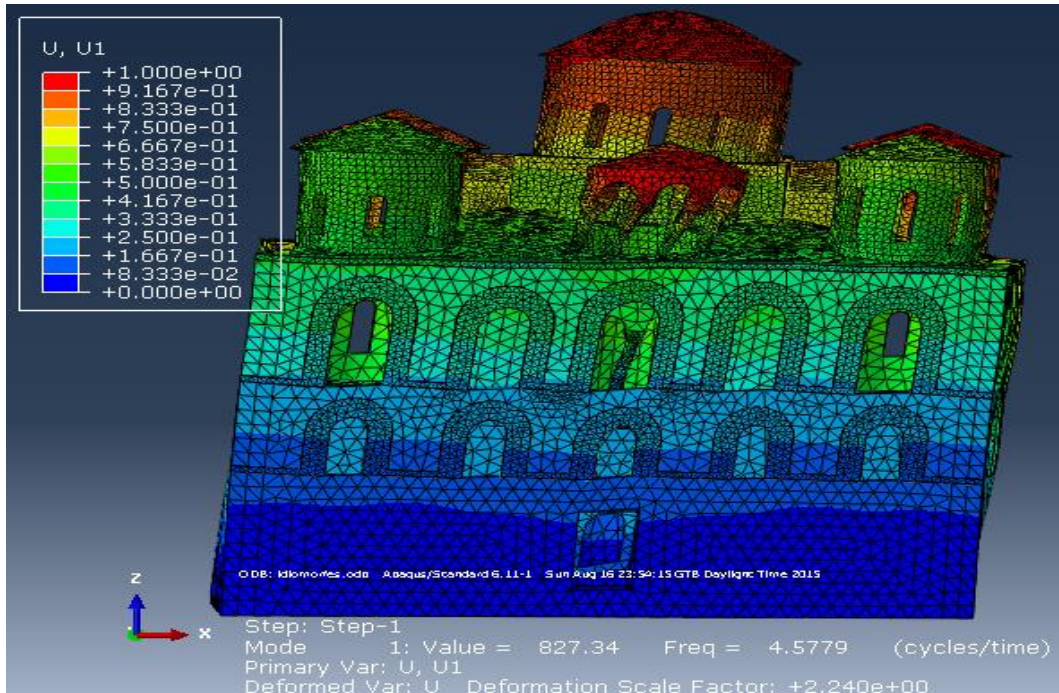
Οι ιδιομορφές υπολογίστηκαν με την αριθμητική μέθοδο Lanczos, που είναι η πλέον ενδεδειγμένη τόσο από άποψη απαιτούμενου χρόνου όσο και από άποψη ακριβείας. Στο βήμα ορίστηκε ο ζητούμενος αριθμός των ιδιομορφών. Η εκκλησία που εξετάζεται είναι δύσκαμπτη, αφού αποτελείται από στιβαρή τοιχοποιία μεγάλου πάχους και έχει μεγάλο κυβικό όγκο. Στην ανωδομή, όμως, που υπάρχουν οι τρούλοι είναι εύκαμπτη. Έτσι προκύπτουν ιδιομορφές που συμμετέχουν οι τρούλοι με μικρή δρώσα ιδιομορφική μάζα. Για να επιτευχθεί, λοιπόν, το 90% της μάζας πρέπει να επιλέξουμε υπέρογκο αριθμό ιδιομορφών της τάξεως του 100. Εντέλει, επιλέχθηκαν για εξοικονόμηση χρόνου 30 ιδιομορφές για να γίνουν οι δυναμικές αναλύσεις και συμπεριλαμβάνεται περίπου το 80% της μάζας κατά τις δύο οριζόντιες συνιστώσες και το 50% της μάζας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι απαραίτητες και για τις αναλύσεις που θα γίνουν στη συνέχεια. Για να γίνει, για παράδειγμα, η δυναμική φασματική ανάλυση πρέπει να δημιουργηθεί άλλο βήμα μετά το Frequency και να ξεκινήσει από εκεί η φασματική ανάλυση. Αν, όμως, τρέξουμε την ανάλυση από το περιβάλλον του ABAQUS (CAE) δεν προκύπτουν τα απαιτούμενα αρχεία για να μπορεί το πρόγραμμα να συνεχίσει μετά το βήμα εύρεσης των ιδιομορφών. Για αυτό το λόγο ζητήθηκε το Input (αρχείο που περιέχει όλα τα δεδομένα) πατώντας δεξί κλικ στο Job→Write Input. Μέσα στο αρχείο αυτό υπάρχει η εξής γραμμή: *Restart, write, frequency=0. Στη γραμμή αυτή πρέπει να αντικατασταθεί το 0 με το 1 ουσιαστικά για να προκύψει το Restart File (res).

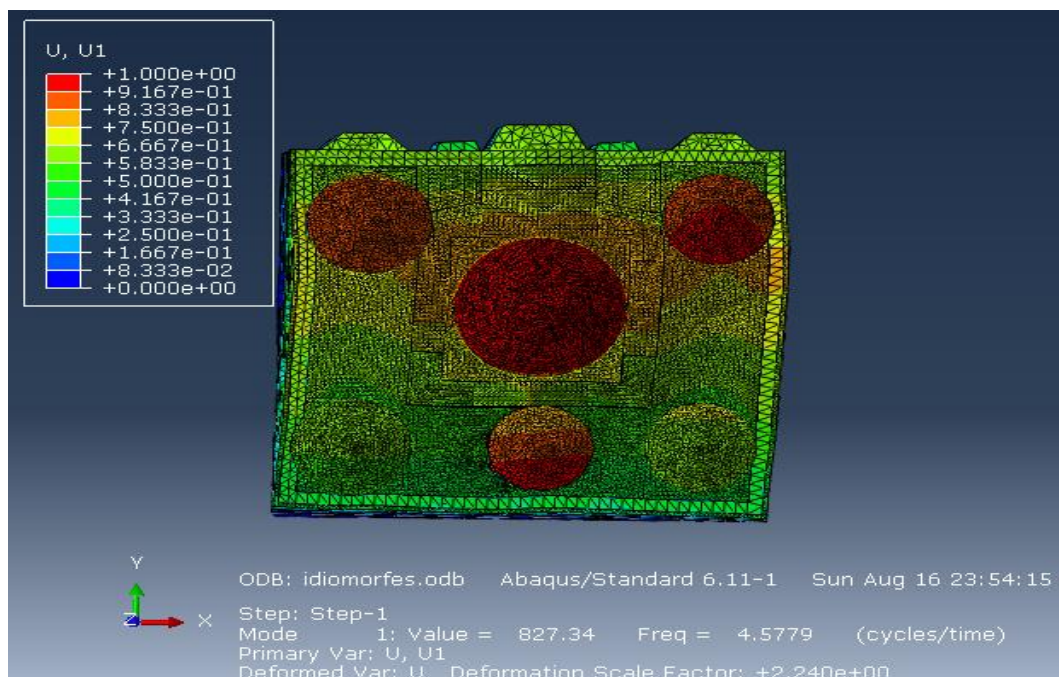
7.2 ΠΡΟΒΟΛΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ

Οι δύο κυρίαρχες ιδιομορφές αφορούν τους βαθμούς ελευθερίας των οριζόντιων συνιστωσών. Πιο αναλυτικά, η πρώτη ιδιομορφή αφορά το βαθμό ελευθερίας της οριζόντιας διεύθυνσης X με ιδιοπερίοδο $T_x = 0,218s$, και

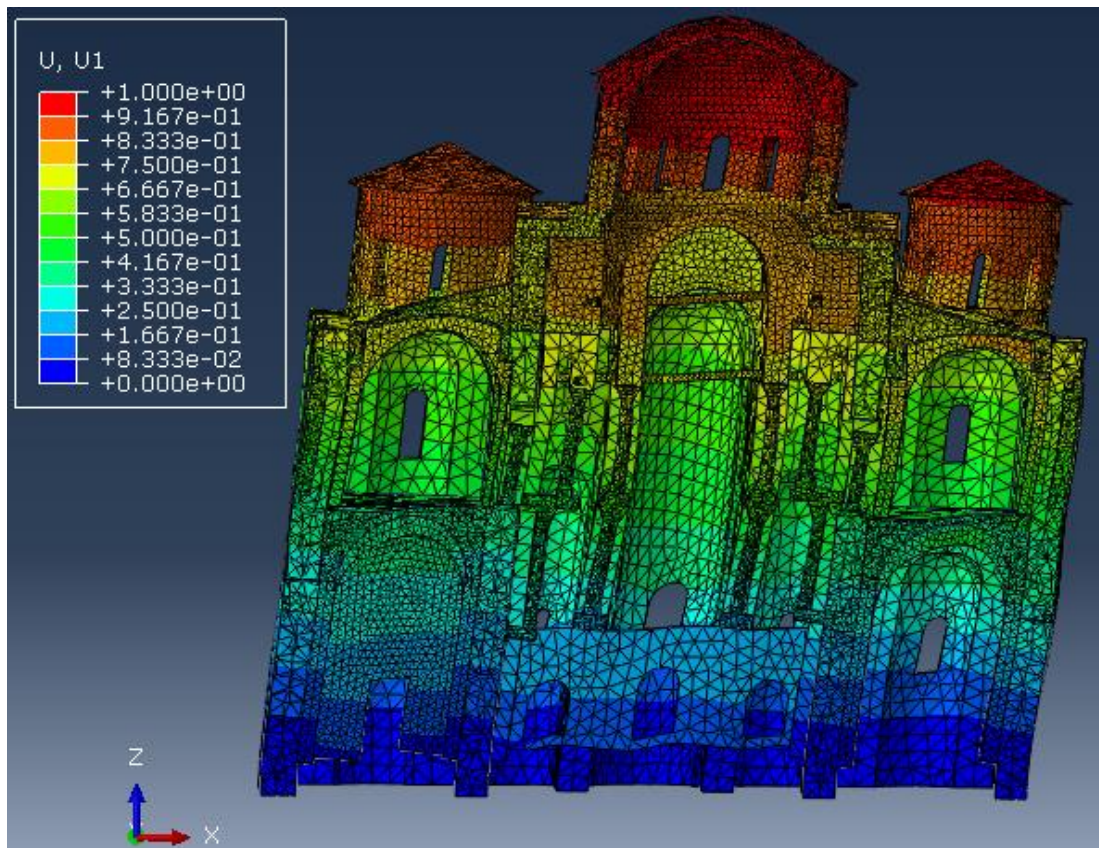
ποσοστό δρώσας ιδιομορφικής μάζας 68,5%. Η δεύτερη το βαθμό ελευθερίας της δεύτερης οριζόντιας διεύθυνσης Y με ιδιοπερίοδο $T_y=0,199s$ και ποσοστό δρώσας ιδιομορφικής μάζας 68,2 %. Αναφέρεται και η πέμπτη ιδιομορφή που είναι η πρώτη στην οποία διεγείρεται ο στροφικός βαθμός ελευθερίας του συστήματος στήριξης του κεντρικού τρούλου με ιδιοπερίοδο $T=0,129s$. Η ιδιομορφή με τη μεγαλύτερη δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με ποσοστό 26,5% είναι η 24^η ιδιομορφή με $T_z=0,0747s$.



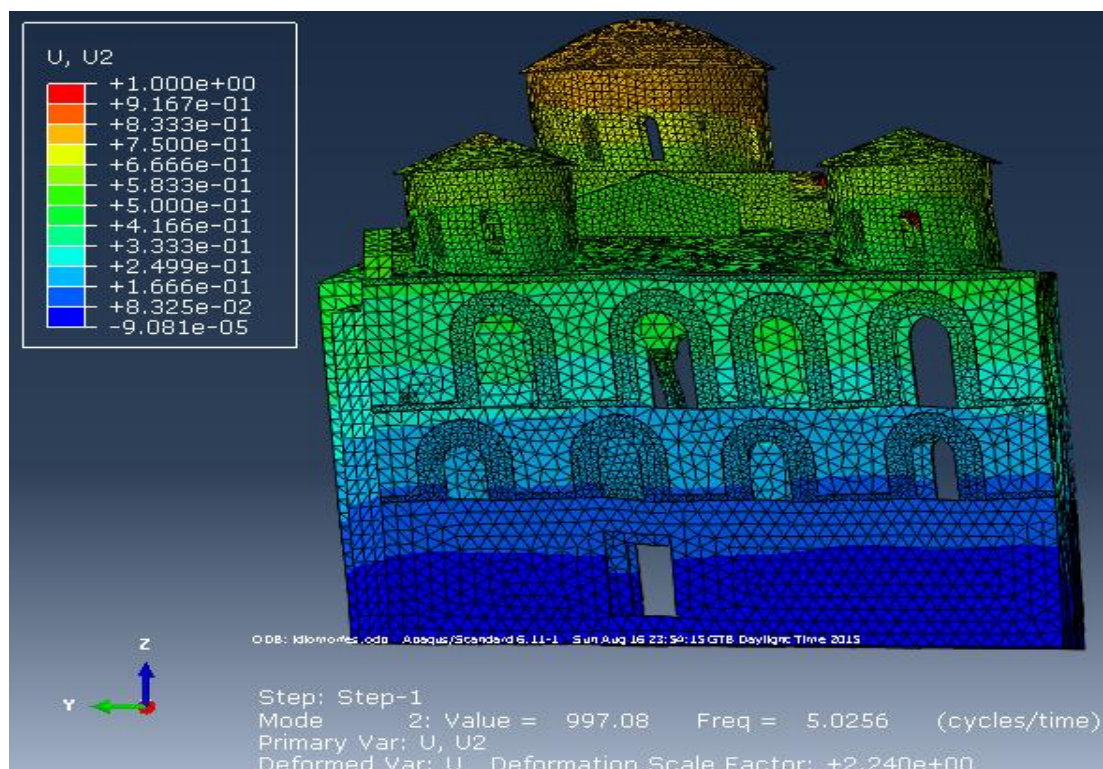
Εικόνα 7.1: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα για την πρώτη ιδιομορφή στο επίπεδο XZ.



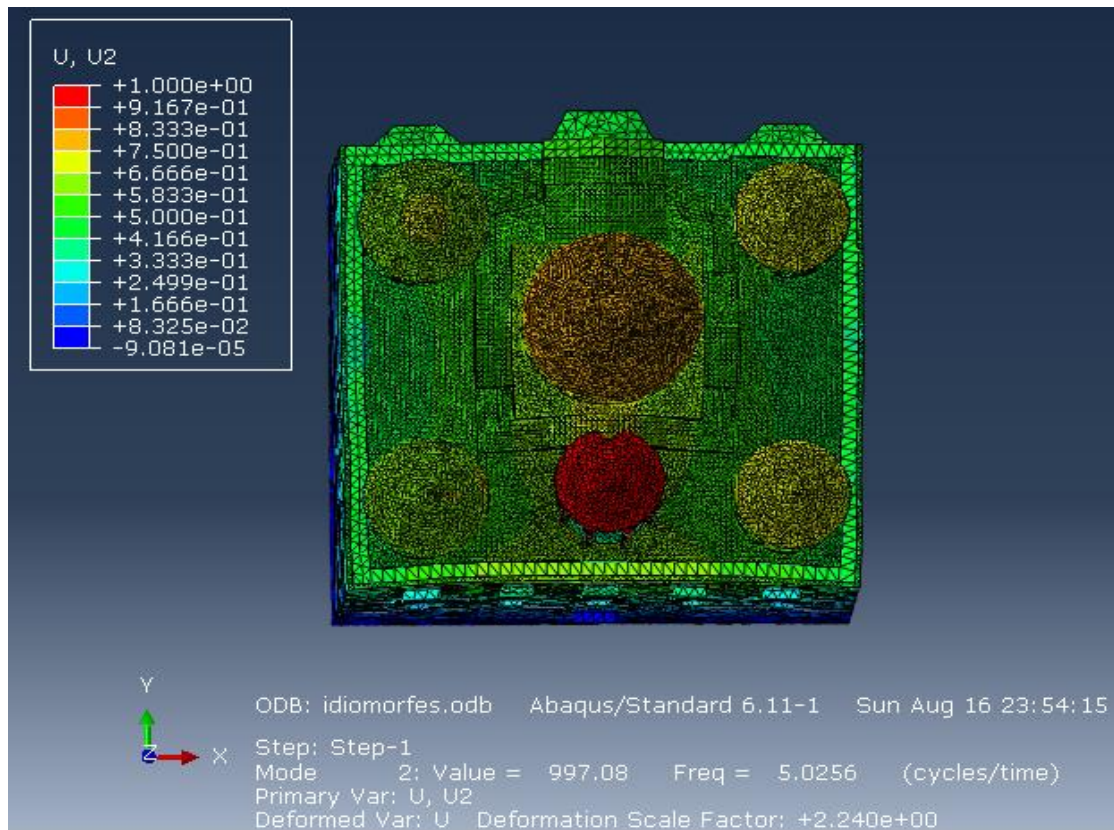
Εικόνα 7.2: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα για την πρώτη ιδιομορφή στο επίπεδο XY.



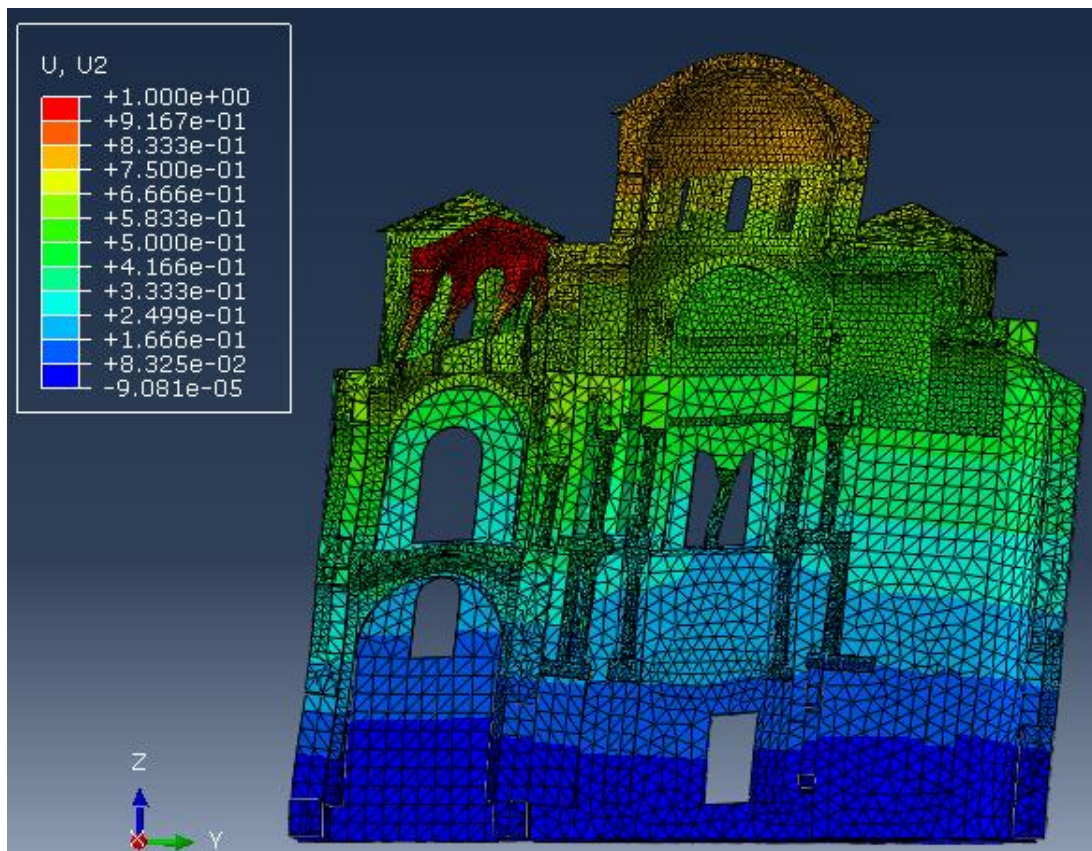
Εικόνα 7.3: Παραμορφωμένη γεωμετρία στο εσωτερικό του κτιρίου για την πρώτη ιδιομορφή στο επίπεδο XZ.



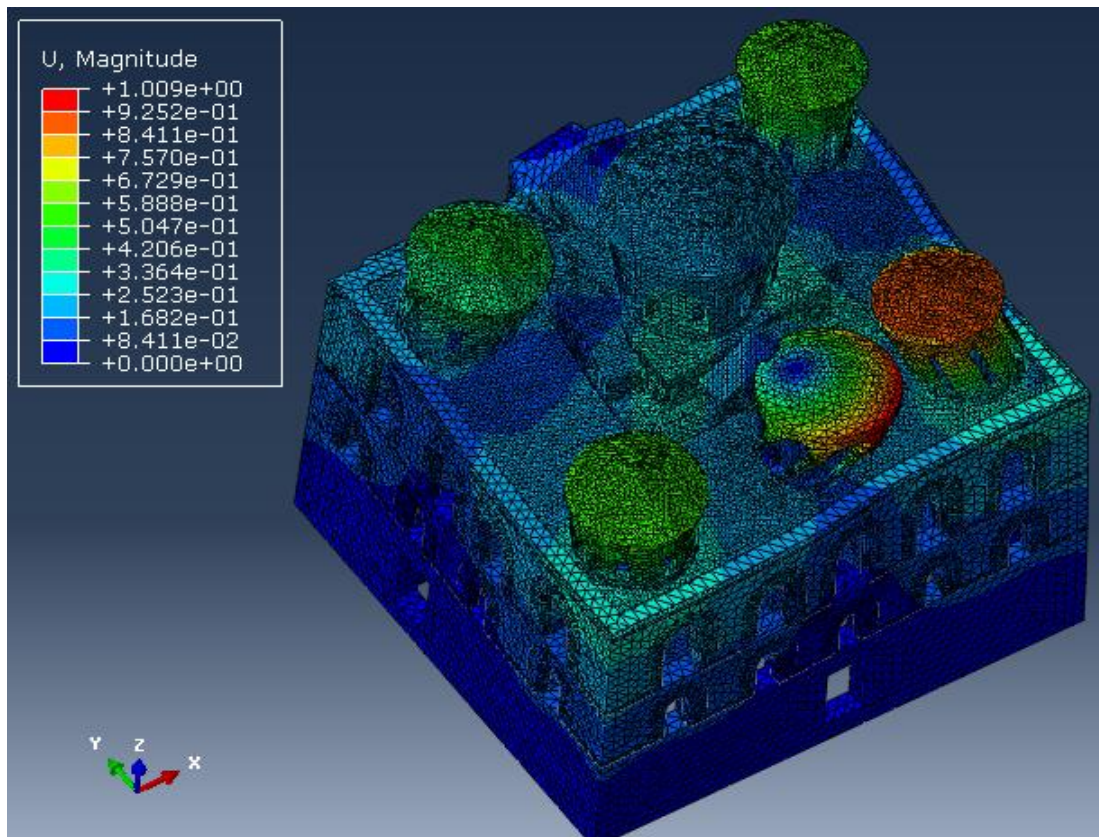
Εικόνα 7.4: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα για τη δεύτερη ιδιομορφή στο επίπεδο YZ.



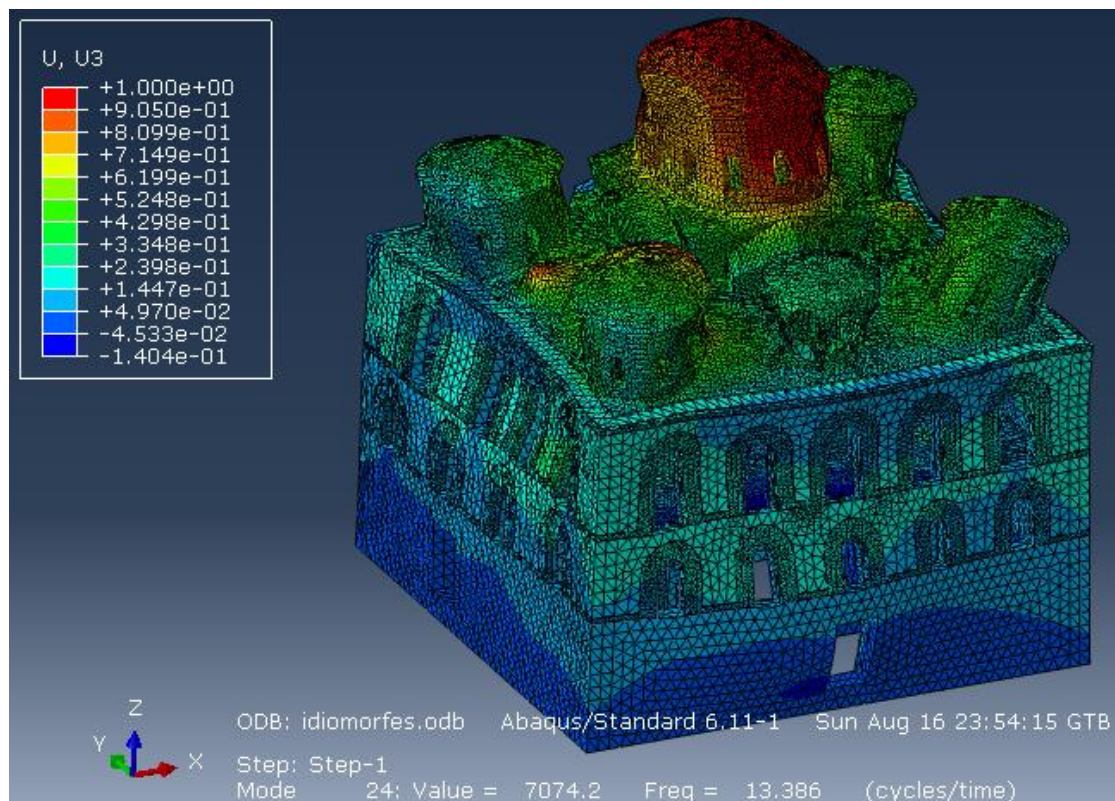
Εικόνα 7.5: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα για τη δεύτερη ιδιομορφή στο επίπεδο XY.



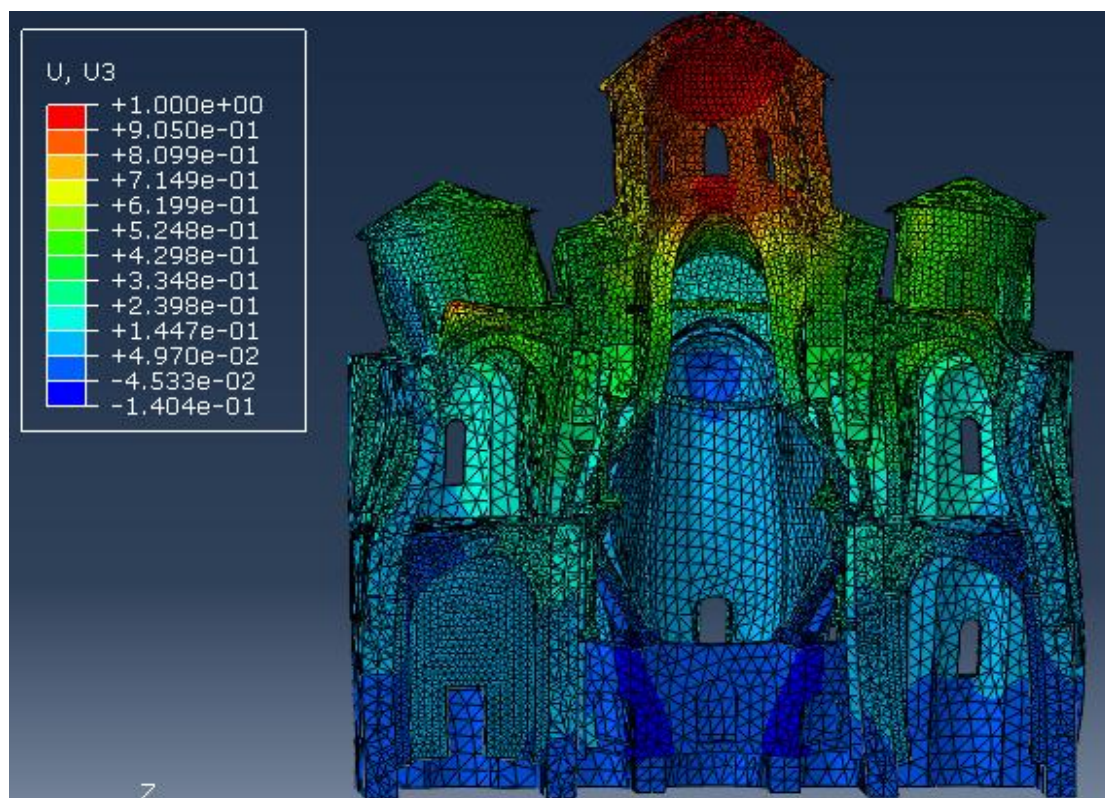
Εικόνα 7.6: Παραμορφωμένη γεωμετρία του εσωτερικού του κτιρίου για τη δεύτερη ιδιομορφή στο επίπεδο YZ.



Εικόνα 7.7: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα για την πέμπτη ιδιομορφή.



Εικόνα 7.8: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα για την 24^η ιδιομορφή.



Εικόνα 7.9: Παραμορφωμένη γεωμετρία στο εσωτερικό του κτιρίου για την 24^η ιδιομορφή στο επίπεδο XZ.

7.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΜΕΛΩΝ ΣΤΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Εκτός του υπολογισμού των ιδιομορφών στο τελικό προσομοίωμα, υπολογίστηκαν οι πρώτες δέκα ιδιομορφές αφού είχαν αφαιρεθεί κάποια από τα μέλη του φορέα. Για την ακρίβεια βρέθηκαν οι ιδιομορφές για το μοντέλο χωρίς τους ξύλινους ελκυστήρες, χωρίς τα πλίνθινα στοιχεία της εξωτερικής τοιχοποιίας, χωρίς όλους τους μαρμαρίνους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο, καθώς και χωρίς το νότιο και βόρειο ζεύγος των κίωνων και χωρίς το δυτικό και ανατολικό ζεύγος των κίωνων που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.

Σκοπός των αναλύσεων αυτών είναι να διερευνηθεί πόσο επηρεάζουν τα μέλη αυτά τόσο τη δυναμική απόκριση του συνολικού φορέα, όσο και του συστήματος στήριξης του κεντρικού τρούλου. Ιδιαίτερα για το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου έγιναν τρεις αναλύσεις για να εξακριβωθεί πως επηρεάζουν τα διαφορετικά ζεύγη των κίωνων τους βαθμούς ελευθερίας της κατασκευής. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι πρώτες δύο ιδιοσυχνότητες και η πέμπτη ιδιοσυχνότητα που προέκυψαν από κάθε ανάλυση, η τελευταία παρουσιάζεται γιατί αφορά το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου. Αναφέρεται και η συνολική μάζα του προσομοιώματος για κάθε ανάλυση.

Μοντέλο	1 ^η (Hz)	2 ^η (Hz)	5 ^η (Hz)	Μάζα(Mgr)
Αρχικό μοντέλο	4,5779	5,0256	7,7544	4690
Χωρίς ξύλινους ελκυστήρες	4,5766	5,0221	7,6175	4689
Χωρίς πλίνθινα στοιχεία	4,5107	4,963	7,7456	4589
Χωρίς μαρμάρινους κίονες	4,5459	4,9742	7,7129	4646
Χωρίς νότιο και βόρειο ζεύγος κίωνων	4,5663	4,9984	7,7429	4670
Χωρίς δυτικό και ανατολικό ζεύγος κίωνων	4,5569	5,0014	7,7262	4666

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα ιδιομορφικών αναλύσεων για κάθε μοντέλο.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Συμπεραίνουμε ότι τα πλίνθινα στοιχεία της εξωτερικής τοιχοποιίας παίζουν σημαντικό ρόλο στη δυσκαμψία του φορέα. Επίσης, οι ξύλινοι ελκυστήρες συμβάλλουν περισσότερο από τους μαρμάρινους κίονες στη στρωφική ακαμψία του κεντρικού τρούλου. Τέλος, από τους μαρμάρινους κίονες για σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση X διεγείρεται το βόρειο και νότιο ζεύγος των μαρμάρινων κίωνων, ενώ για διέγερση κατά τη διεύθυνση Y διεγείρεται το δυτικό και ανατολικό ζεύγος.

8. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

8.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

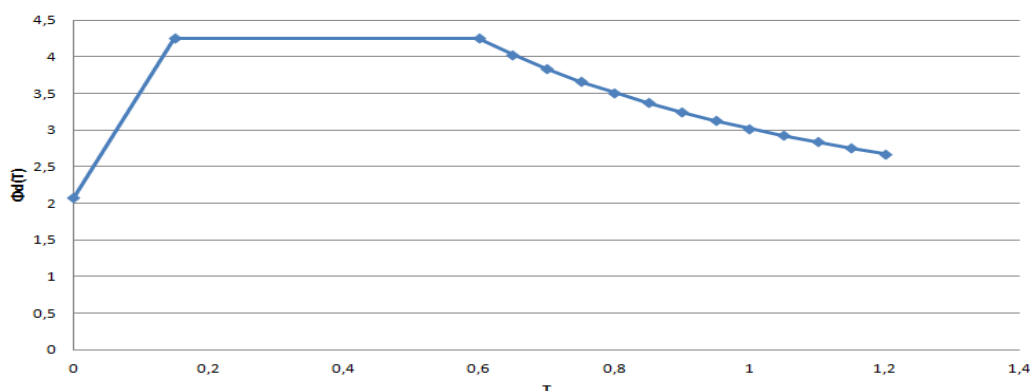
Το φάσμα σχεδιασμού του σεισμού υπολογίστηκε από το κεφάλαιο 2 του ΕΑΚ2000 (Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός) και θεωρήθηκε ίδιο σε κάθε διεύθυνση του σεισμού. Το φάσμα της εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού $\Phi_d(T)$ υπολογίστηκε από τις παρακάτω σχέσεις:

- $\Phi_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot [1 + T/T_1 \cdot (\eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q - 1)]$ για $0 \leq T < T_1$
- $\Phi_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q$ για $T_1 \leq T < T_2$,
- $\Phi_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q \cdot (T_2/T)^{2/3}$ για $T_2 < T$

Όπου στις παραπάνω σχέσεις:

- $A = \alpha \cdot g$ η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση τους εδάφους, η οποία εξαρτάται από τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας.
- γ_I ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου.
- q ο συντελεστής συμπεριφοράς του κτιρίου.
- η διορθωτικός συντελεστής για απόσβεση διάφορη του 5%.
- θ συντελεστής επιρροής της θεμελίωσης του κτιρίου.
- T_1 και T_2 χαρακτηριστικές περιόδους του φάσματος που εξαρτώνται από την κατηγορία του εδάφους Α, Β, Γ και Δ.
- $\beta_0 = 2,5$ συντελεστής φασματικής ενίσχυσης.

Στην Άρτα η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας είναι ΙΙ, άρα $\alpha = 0,16$. Επειδή, το κτίριο που εξετάζεται είναι μνημείο επιλέχθηκε $\gamma_I = 1,30$. Το κτίριο είναι από τοιχοποιία και επιλέγεται $q = 1,2$. Ακόμη, για την τοιχοποιία ποσοστό απόσβεσης $\zeta = 5\%$, οπότε $\eta = 1$. Κατηγορία του εδάφους επιλέγεται Β, άρα $T_1 = 0,15$, $T_2 = 0,60$ και ο συντελεστής θεμελίωσης $\theta = 1$. Προέκυψε το παρακάτω φάσμα σχεδιασμού.



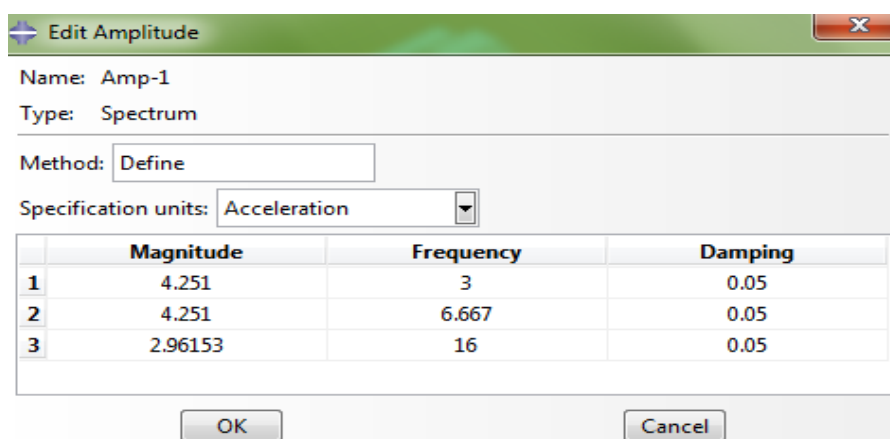
Εικόνα 8.1: Φάσμα σχεδιασμού των εδαφικών επιταχύνσεων.

Οι τεταγμένες του φάσματος αυξήθηκαν και στις τρεις διευθύνσεις (X, Y και Z), ώστε η δρώσα μάζα των ιδιομορφών του προσομοιώματος να είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής ταλαντούμενης μάζας του. Κατά τη διεύθυνση X αυξήθηκε κατά 1,2, κατά την Y κατά 1,25 και κατά τη Z 2,1.

8.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS

Για τη διενέργεια της δυναμικής φασματικής ανάλυσης δημιουργήθηκε δεύτερο βήμα μετά το βήμα εύρεσης των ιδιομορφών με την εντολή Create Step→Procedure Type: Linear Perturbation→Response Spectrum. Με τη συγκεκριμένη ανάλυση το πρόγραμμα ABAQUS διεγείρει τη βάση της κατασκευής με το φάσμα της επιτάχυνσης που ορίζεται.

Από το φάσμα σχεδιασμού στο πρόγραμμα εισήχθη το εύρος των τιμών των επιταχύνσεων που αφορά τις ιδιοπεριόδους της κατασκευής. Δηλαδή, μόνο οι δύο πρώτοι κλάδοι του φάσματος σχεδιασμού.



	Magnitude	Frequency	Damping
1	4.251	3	0.05
2	4.251	6.667	0.05
3	2.96153	16	0.05

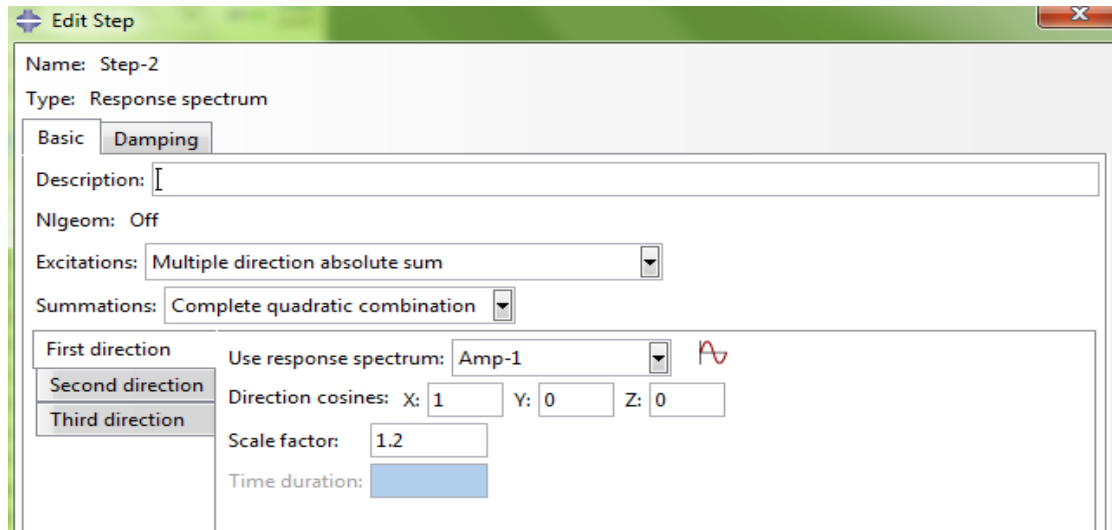
Εικόνα 8.2: Τιμές φασματικής επιτάχυνσης όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα ABAQUS.

Για τη δυναμική φασματική ανάλυση λήφθηκαν υπόψη όλες οι ιδιομορφές του προσομοιώματος που υπολογίστηκαν. Η απόσβεση όλων των ιδιομορφών λήφθηκε ίση με $\zeta=5\%$. Έγιναν συνολικά πέντε δυναμικές φασματικές αναλύσεις για τους παρακάτω συνδυασμούς με διευθύνσεις σεισμού:

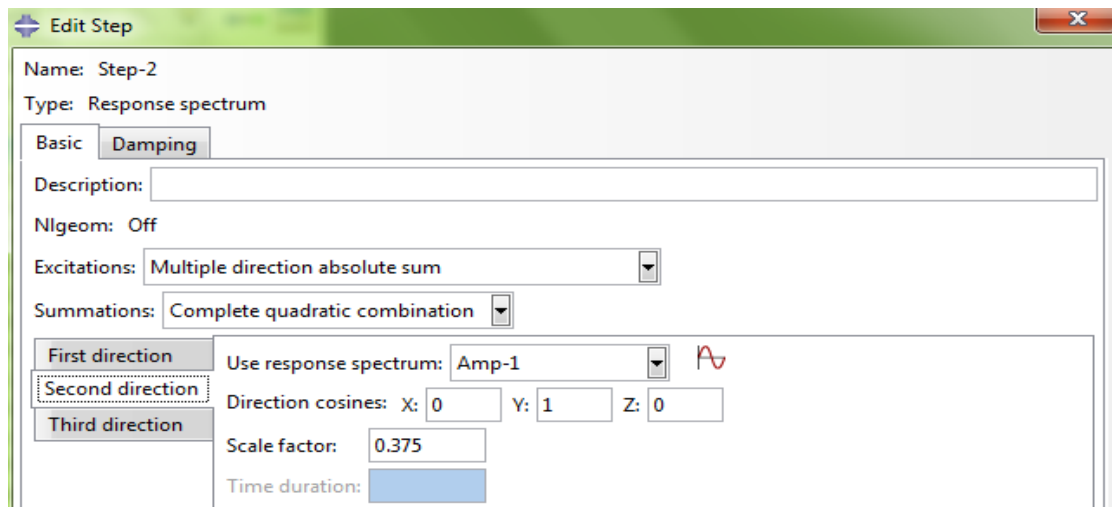
- $X+0.3Y$
- $Y+0.3X$
- $0.7Z$
- $X+0.3Y+0.3Z$
- $Y+0.3X+0.3Z$

Οι δύο τελευταίες έγιναν για τη διερεύνηση της επιρροής της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού και έχουν προβληθεί τα αποτελέσματά τους συνοπτικά σε ξεχωριστό υποκεφάλαιο. Στο πρόγραμμα ορίστηκαν οι διευθύνσεις που ασκείται ο σεισμός και ο συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το φάσμα των επιταχύνσεων για να ληφθεί το 90% της

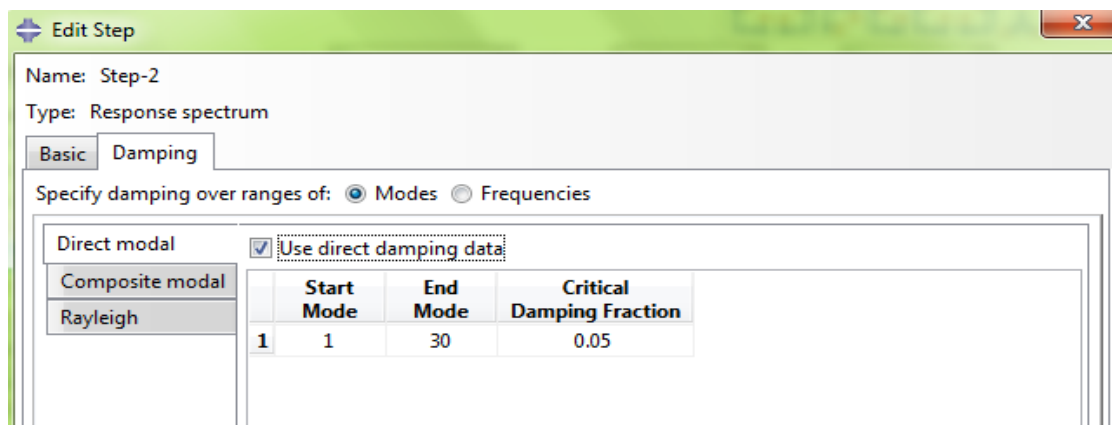
ταλαντούμενης μάζας. Η χωρική επαλληλία για την ταυτόχρονη δράση των δύο συνιστωσών του σεισμού υπολογίστηκε με το συνδυασμό του απόλυτου αθροίσματος (ABSSUM), που προκύπτουν πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Η επαλληλία των ιδιομορφικών αποκρίσεων υπολογίστηκε με τη μέθοδο της πλήρους τετραγωνικής επαλληλίας (CQC –Complete Quadratic Combination).



Εικόνα 8.3: Επιβολή επιταχύνσεων σχεδιασμού κατά τη διεύθυνση X για συνδυασμό φόρτισης $X+0.3Y$.



Εικόνα 8.4: Επιβολή επιταχύνσεων σχεδιασμού κατά τη διεύθυνση Y για συνδυασμό φόρτισης $X+0.3Y$.



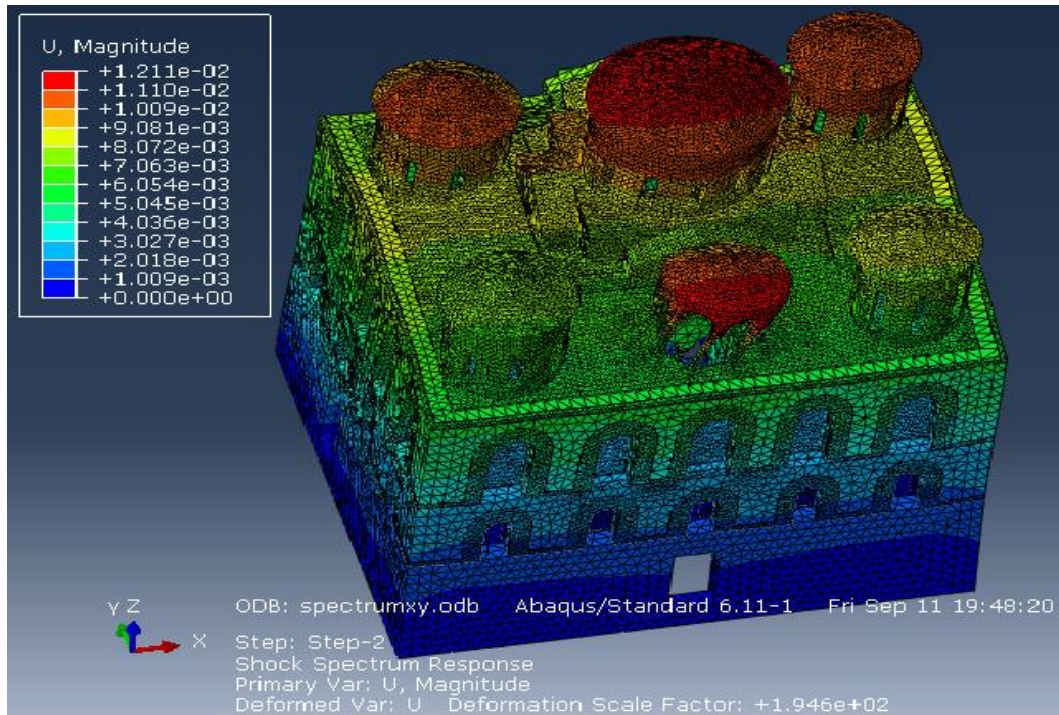
Εικόνα 8.5: Ορισμός απόσβεσης ιδιομορφών στο πρόγραμμα ABAQUS.

8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

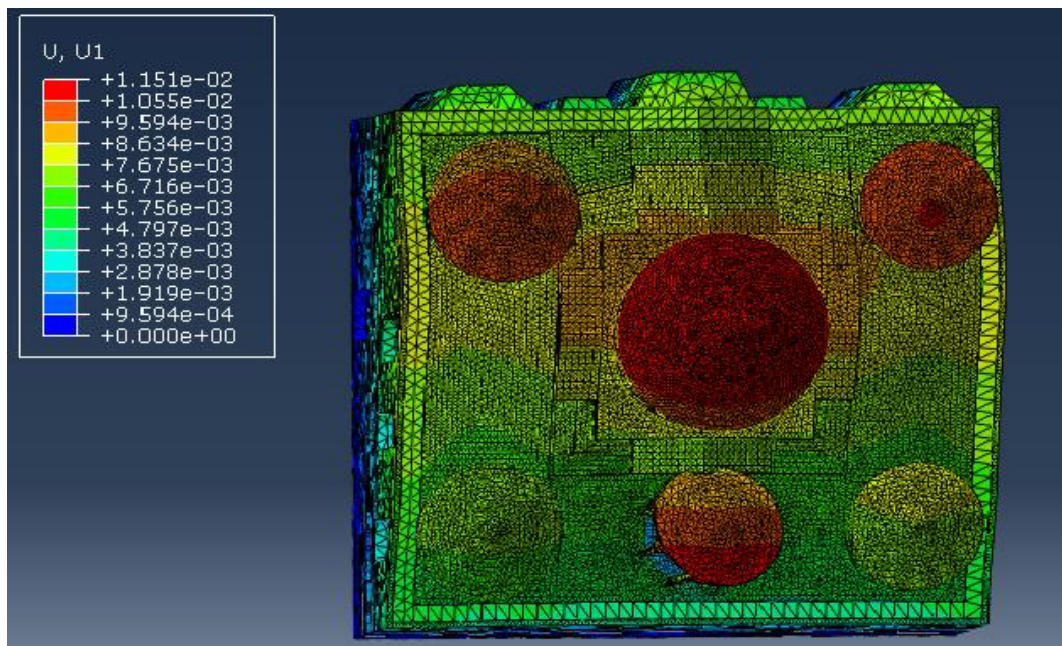
8.3.1 X+0.3Y

Μετατοπίσεις

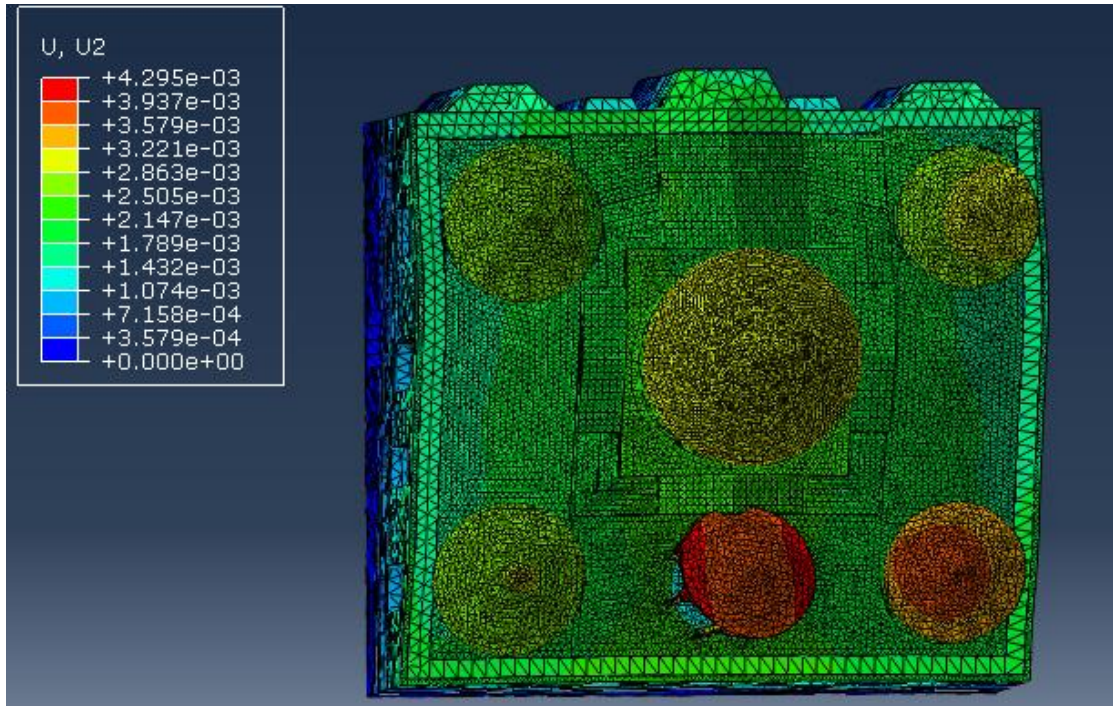
Οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται στις οροφές του κεντρικού τρούλου και του ανοιχτού ουρανόσκου και ξεπερνούν το ένα εκατοστό.



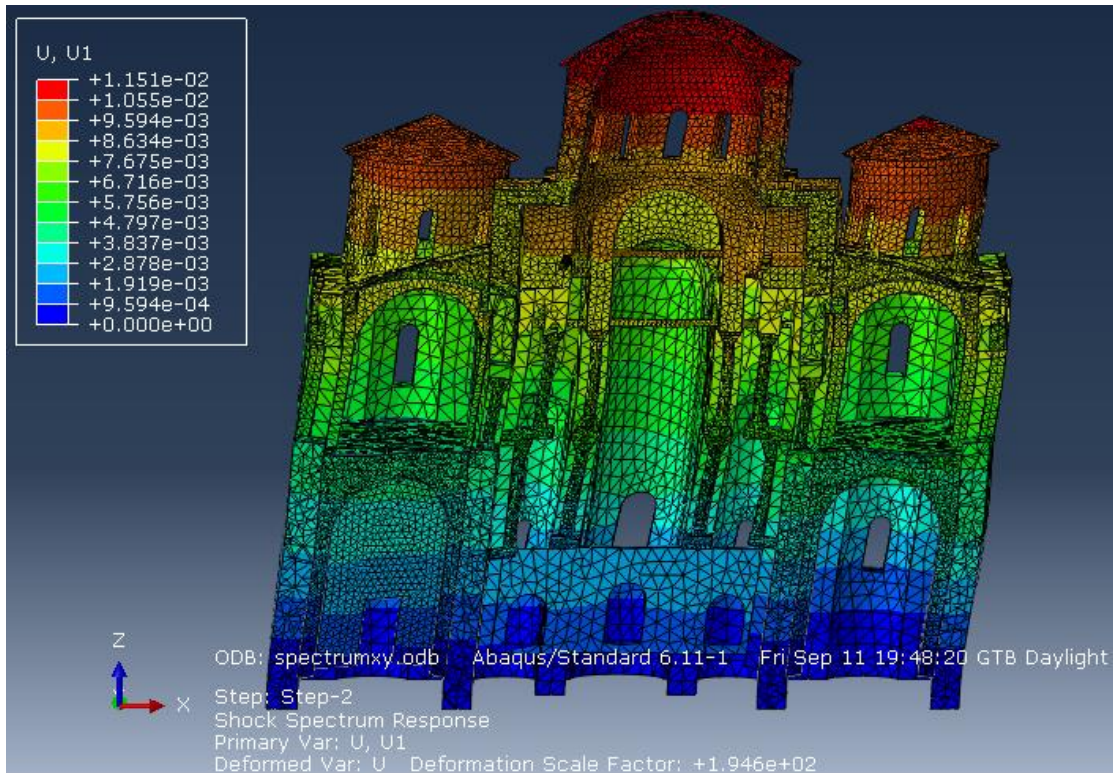
Εικόνα 8.6: Παραμορφωμένη γεωμετρία συνολικού φορέα.



Εικόνα 8.7: Μετατοπίσεις κατά την X διεύθυνση στο επίπεδο XY.



Εικόνα 8.8: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση Y στο επίπεδο XY.

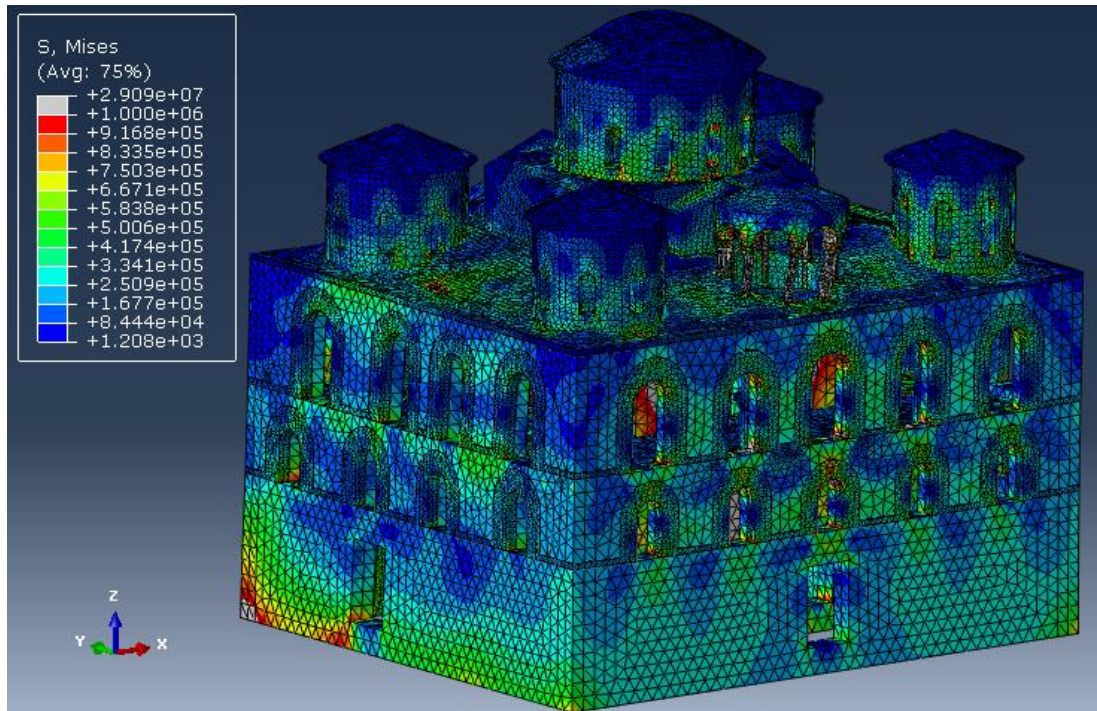


Εικόνα 8.9: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση X στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο XZ.

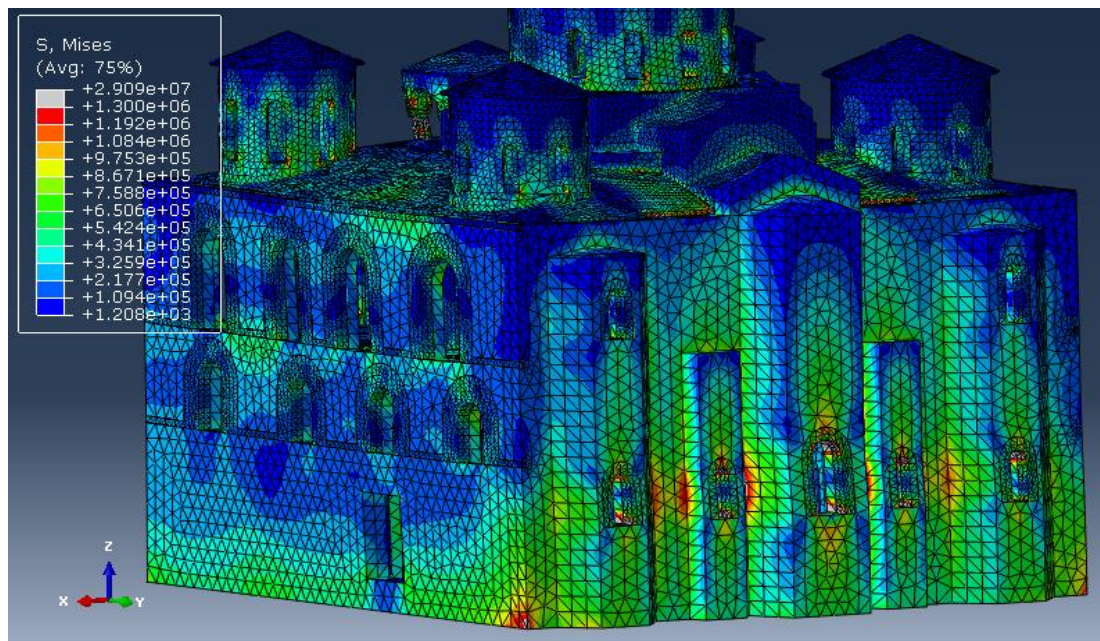
Τάσεις

Σημαντικές τάσεις παρατηρούνται στον ανατολικό τοίχο του ιερού, στα διαμερίσματα των παρεκκλησιών, στον κεντρικό τρούλο, στη δυτική καμάρα

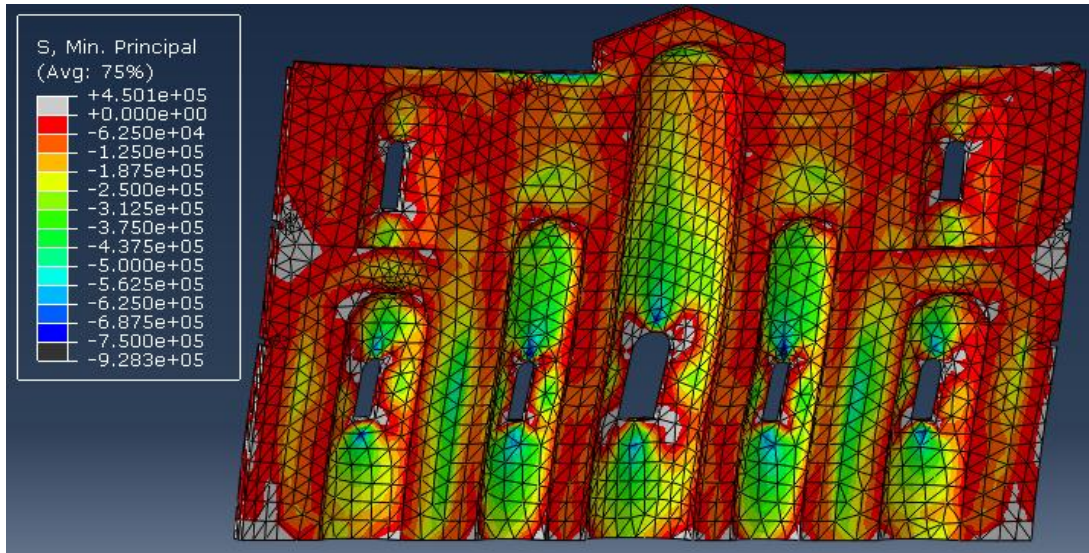
που τον στηρίζει, στο άνω μέρος του δυτικού τοίχου του κυρίως ναού, καθώς και στον ανοιχτό ουρανίσκο. Στον κεντρικό τρούλο οι τάσεις Von Mises φτάνουν το 90% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας, ενώ στον ουρανίσκο ξεπερνούν τη θλιπτική αντοχή. Στους οριζόντιους προβόλους της νότιας πλευράς που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο οι τάσεις Von Mises φτάνουν το 30% θλιπτικής αντοχής.



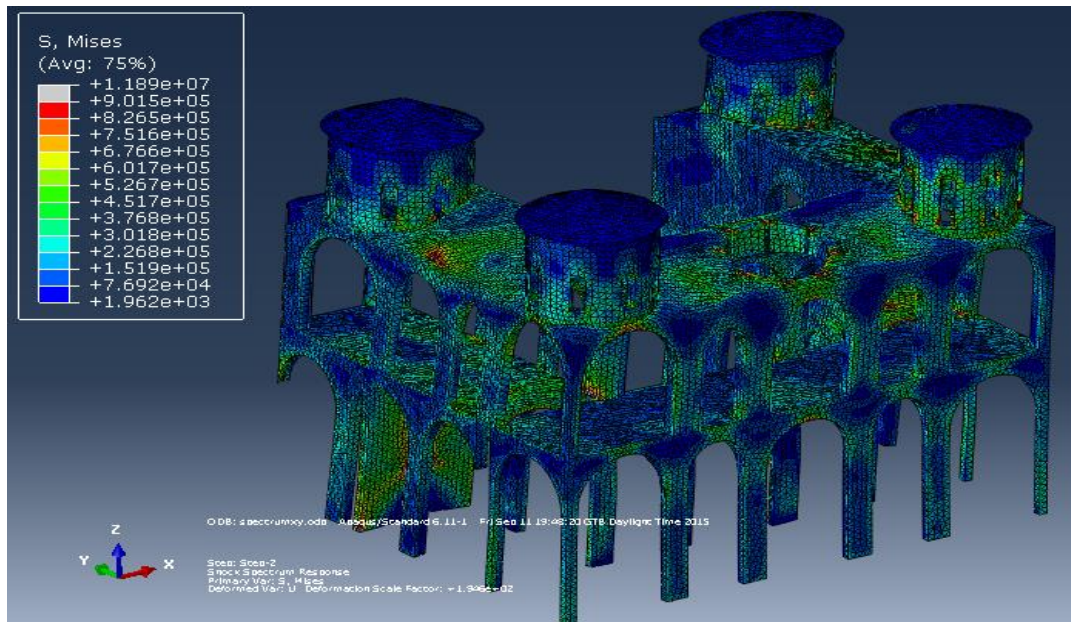
Εικόνα 8.10: Κατανομή τάσεων Von Mises που αναπτύσσονται στο συνολικό φορέα.



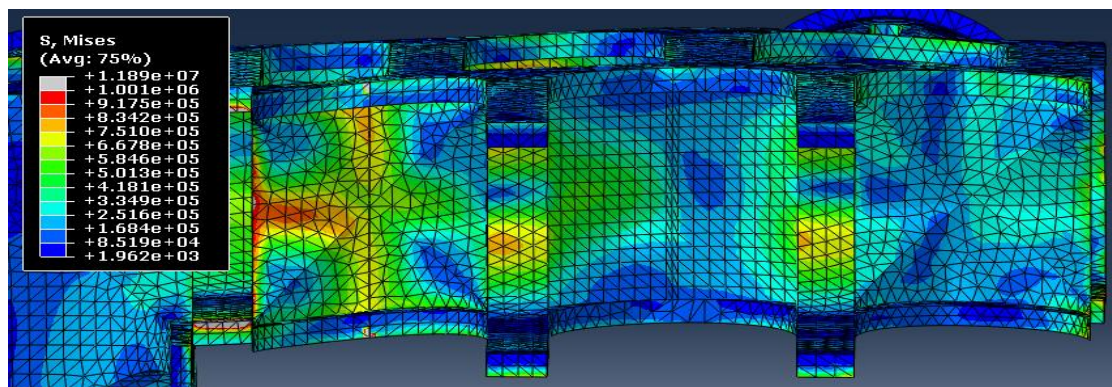
Εικόνα 8.11: Κατανομή τάσεων Von Mises στην ανατολική πλευρά του κτιρίου, που φτάνουν το 65% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας.



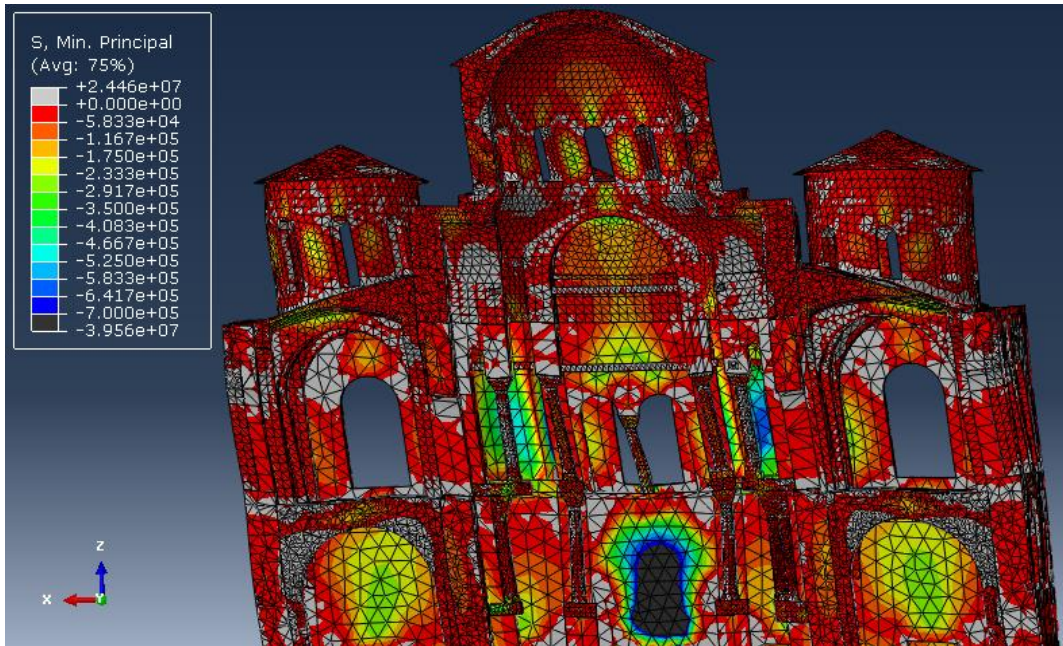
Εικόνα 8.12: Κατανομή θλιπτικών κύριων τάσεων στο εσωτερικό του ανατολικού τοίχου του κτιρίου, φτάνουν το 50% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας.



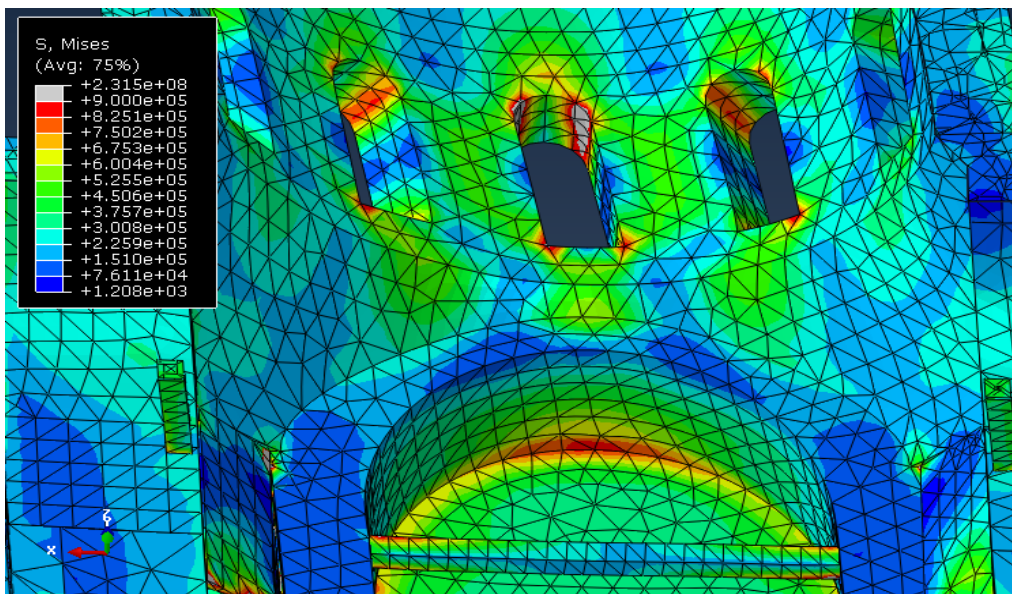
Εικόνα 8.13: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του περιστάου, μέγιστη καταπόνηση παρατηρείται στα διαμερίσματα των παρεκκλησιών.



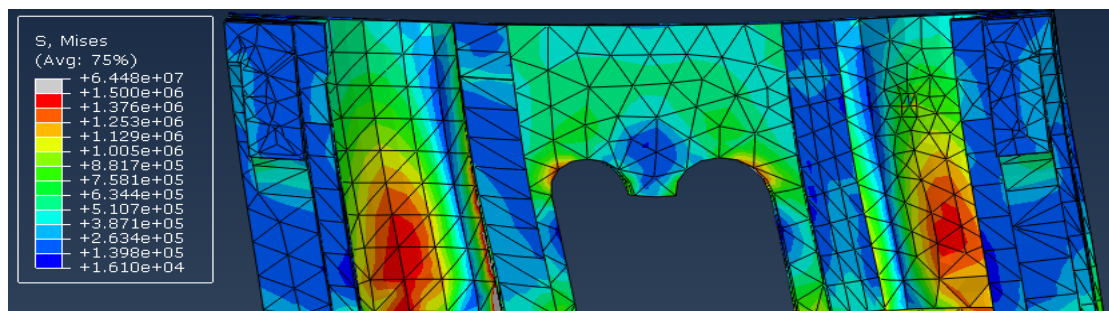
Εικόνα 8.14: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του νότιου παρεκκλησιού στο επίπεδο XY, φτάνουν 65% θλιπτικής αντοχής.



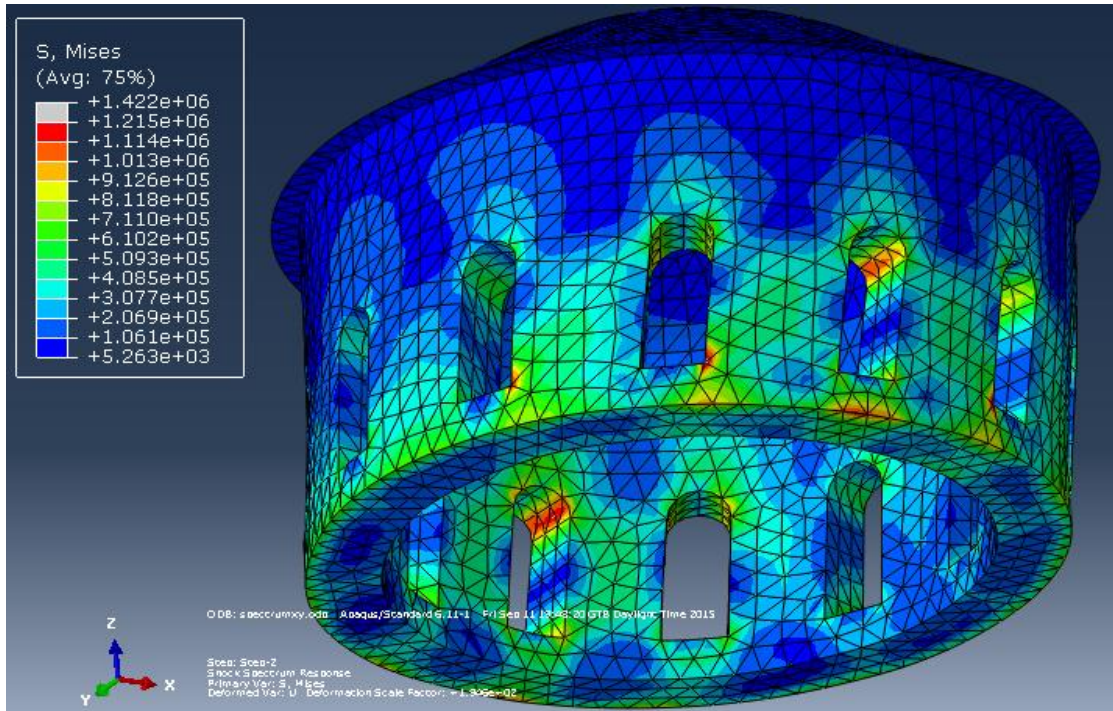
Εικόνα 8.15: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στη δυτική πλευρά του εσωτερικού του ναού, μέγιστη καταπόνηση παρουσιάζουν η δυτική καμάρα και το άνω μέρος της δυτική τοιχοποιίας του κυρίως ναού.



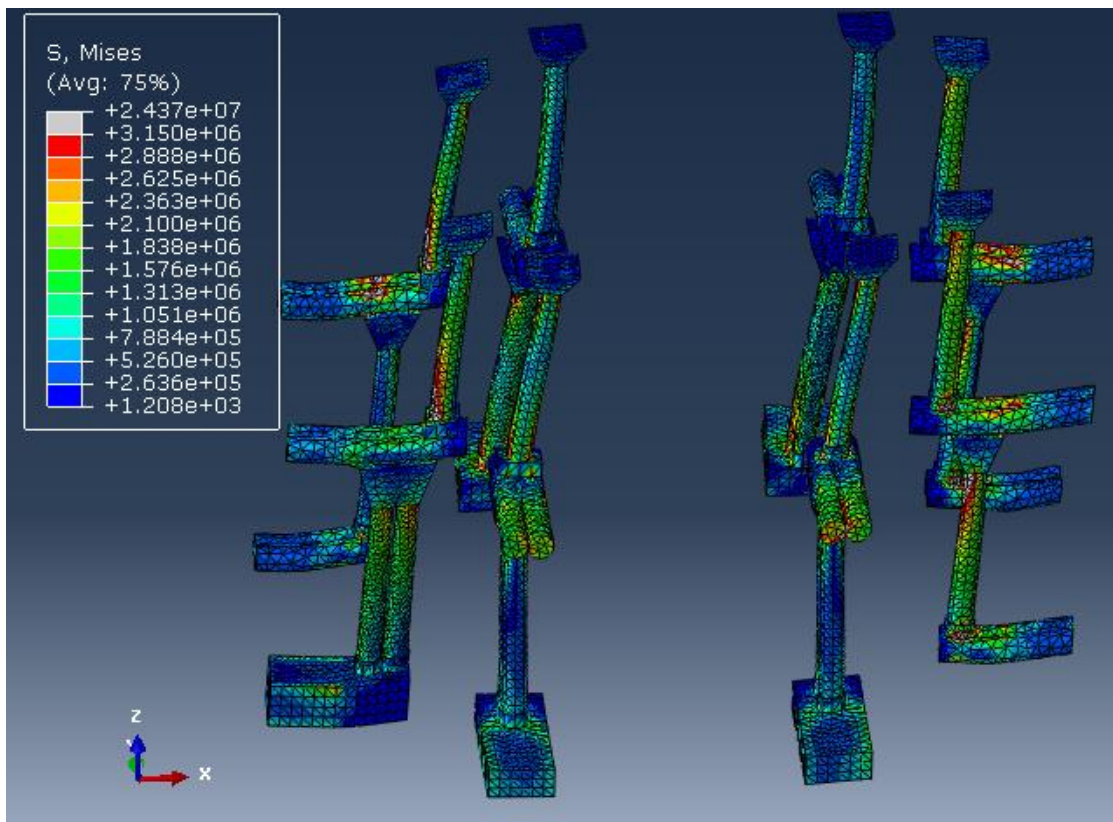
Εικόνα 8.16: Κατανομή τάσεων Von Mises στη δυτική καμάρα του κυρίως ναού, φτάνουν 60% θλιπτικής αντοχής.



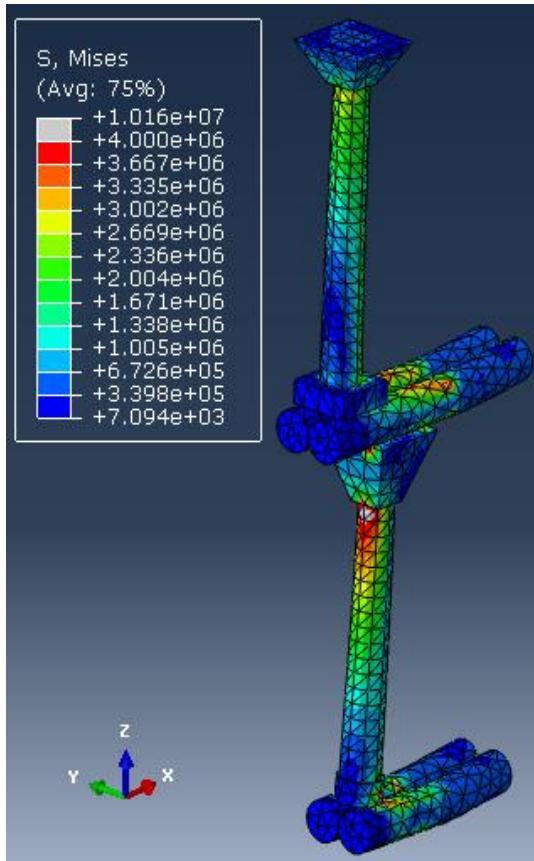
Εικόνα 8.17: Κατανομή τάσεων Von Mises στο άνω μέρος του δυτικού τοίχου του κυρίως ναού. Στις κυκλικές κόγχες των γωνιών εμφανίζονται τάσεις 60% θλιπτικής αντοχής.



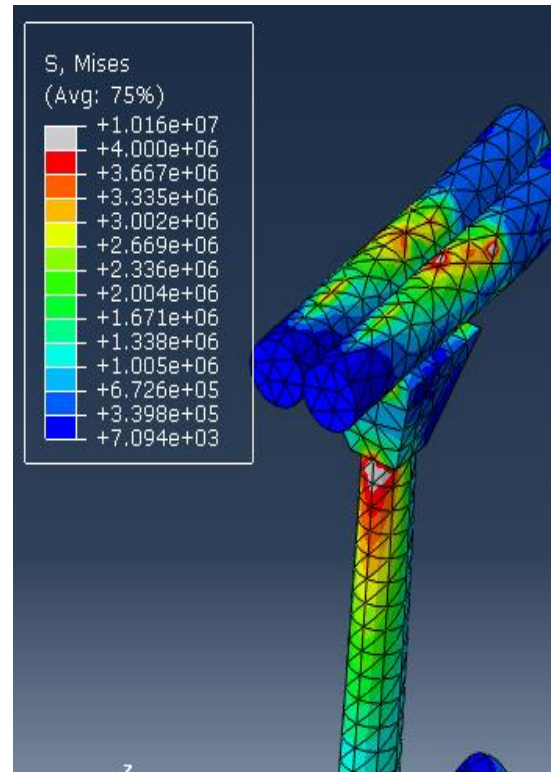
Εικόνα 8.18: Κατανομή τάσεων Von Mises που αναπτύσσονται στον κεντρικό τρούλο, φτάνουν το 90% της θλιπτικής αντοχής.



Εικόνα 8.19: Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμαρίνους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.

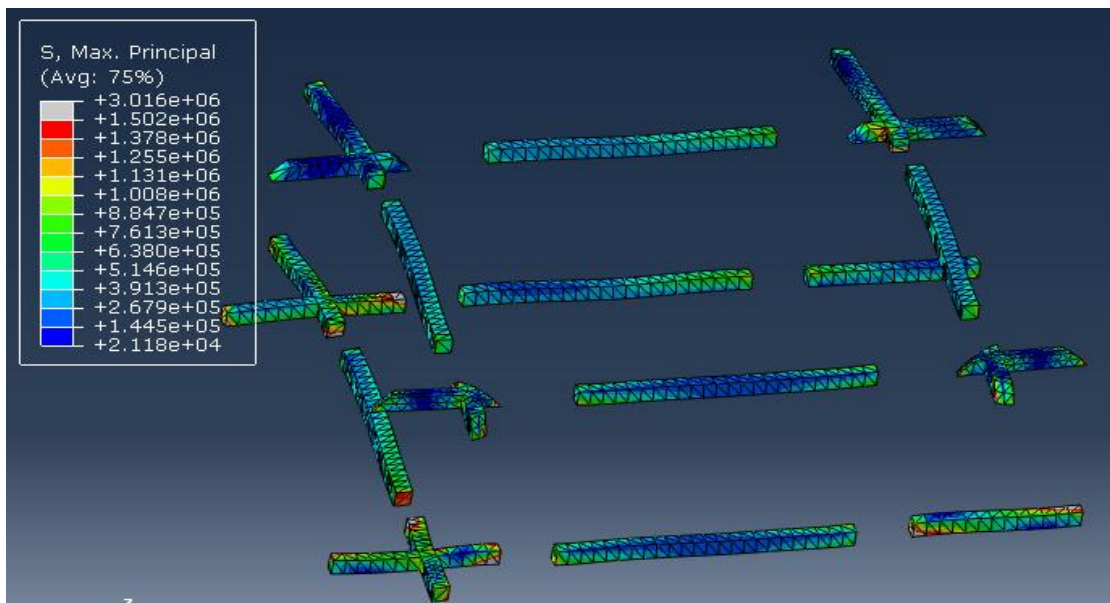


(α)

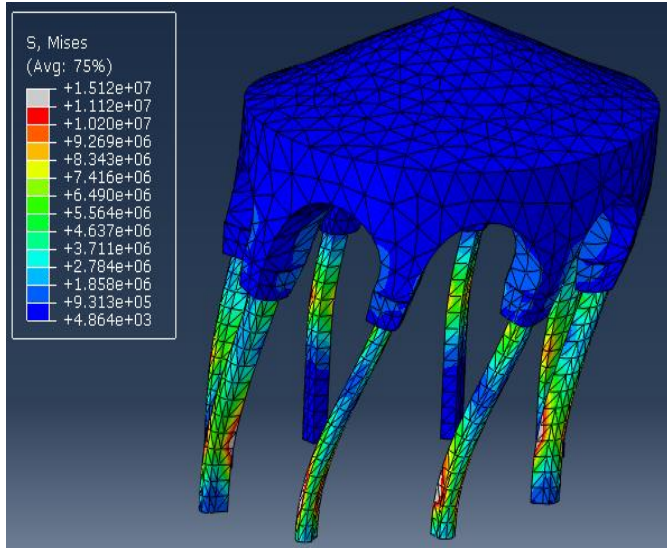


(β)

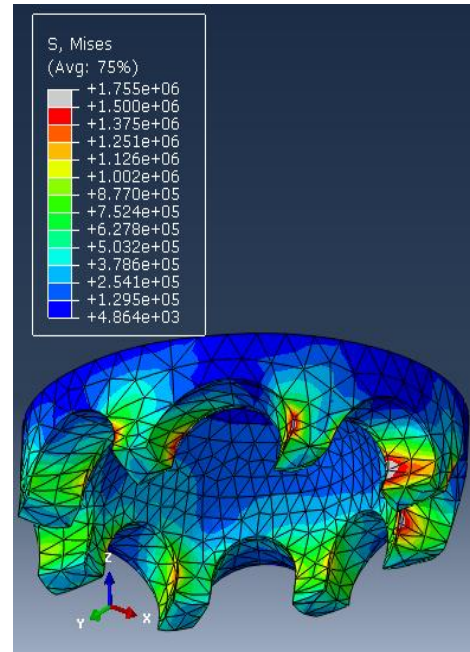
Εικόνα 8.20: (α) Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμαρίνους κίονες της νότιας πλευράς στον κορμό των οποίων παρατηρούνται οι μέγιστες τάσεις μεγέθους 20% της θλιπτικής αντοχής. (β) Κατανομή τάσεων Von Mises στον πάνω οριζόντιο πρόβολο, που φτάνουν 30% θλιπτικής αντοχής.



Εικόνα 8.21: Κατανομή εφελκυστικών κύριων τάσεων που αναπτύσσονται στους ξύλινους ελκυστήρες, φτάνουν το 40% της εφελκυστικής αντοχής.



(α)



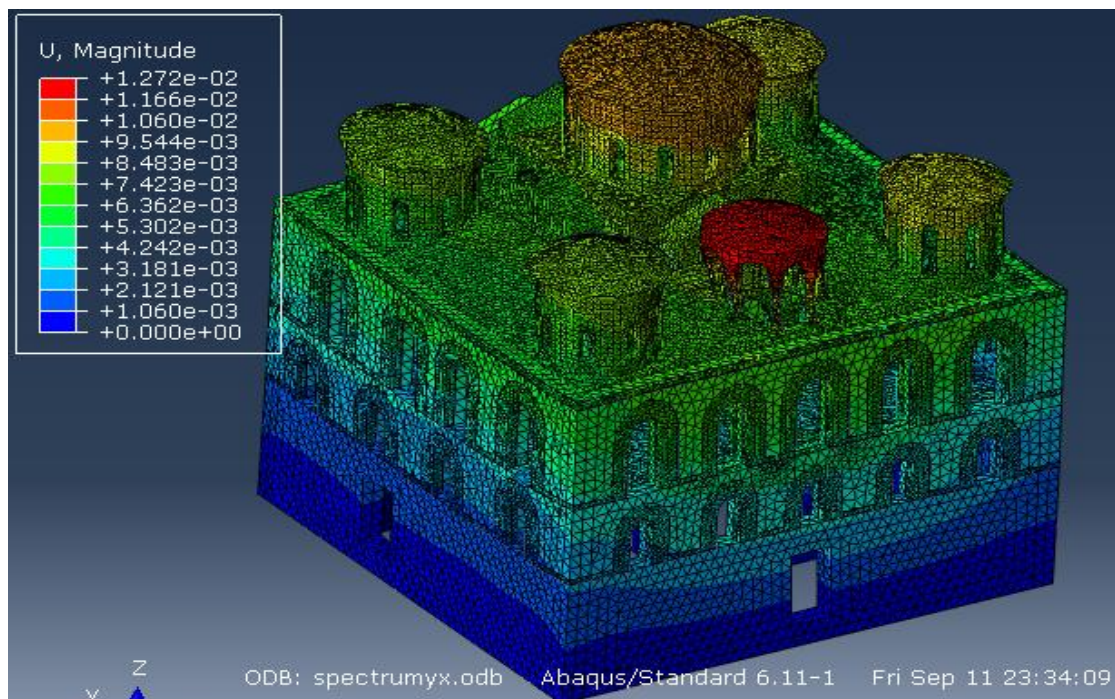
(β)

Εικόνα 8.22: (α) Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον ουρανίσκο, φτάνουν το 60% της αντοχής. (β) Κατανομή τάσεων Von Mises στο κέλυφος του ουρανίσκου, ξεπερνούν κατά 0.2 MPa την θλιπτική αντοχή.

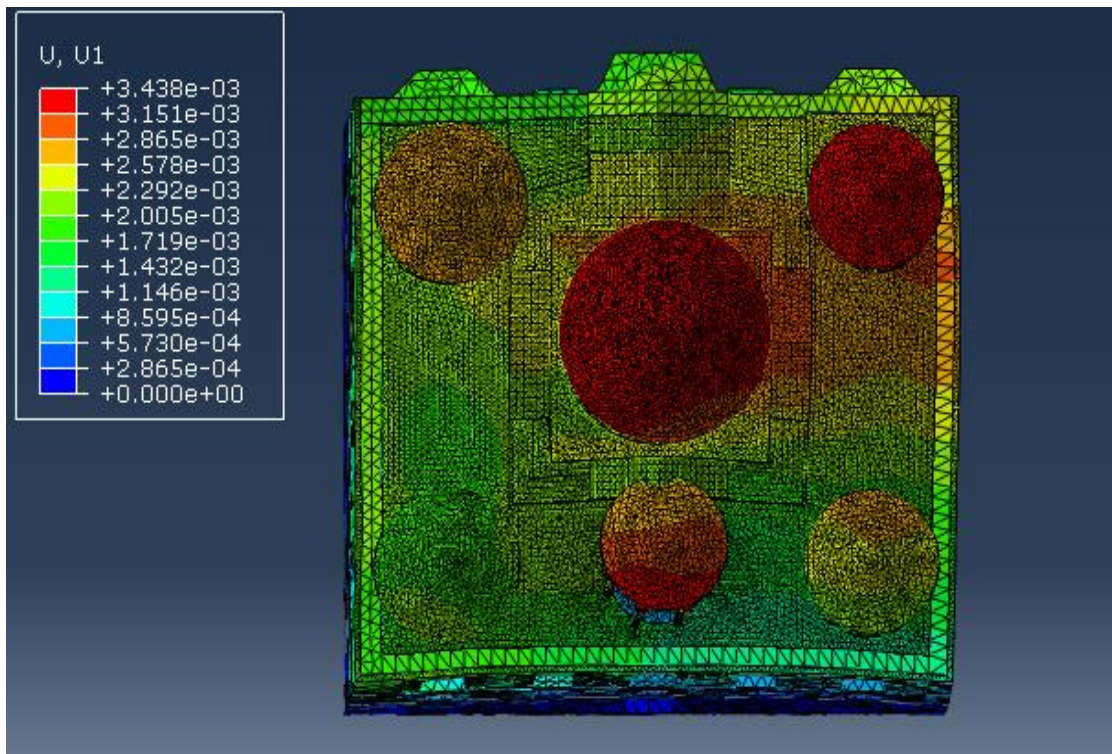
8.3.2 Y+0.3X

Μετατοπίσεις

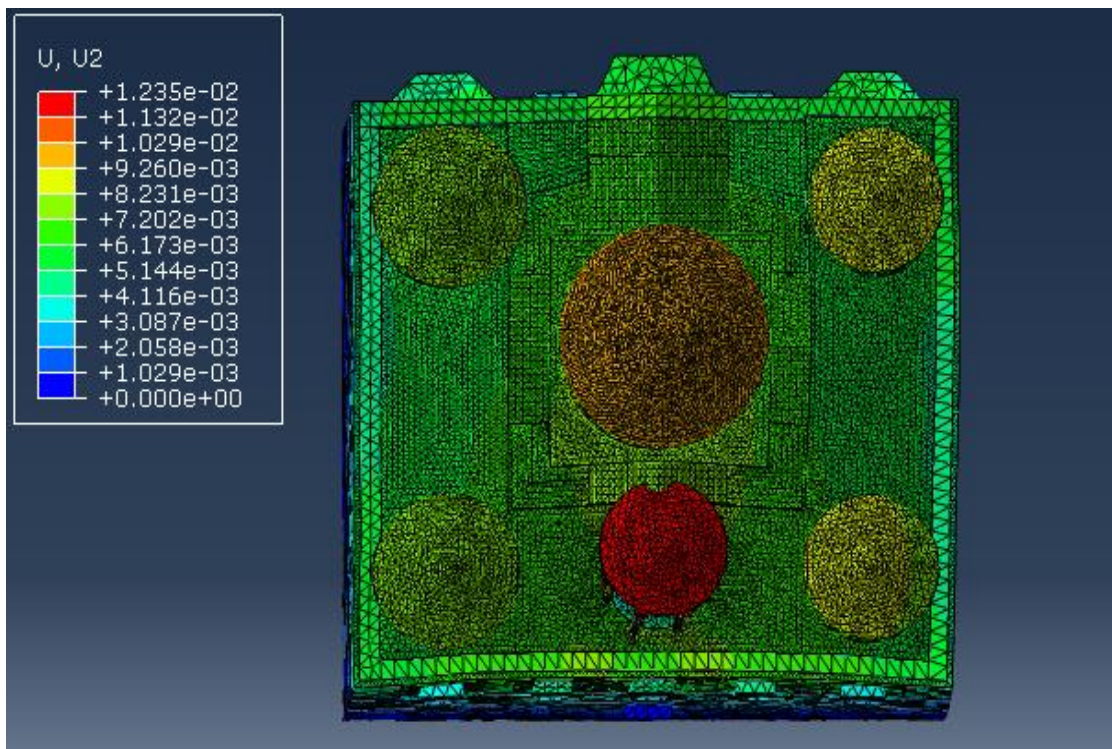
Μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται στην οροφή του ουρανίσκου, όπου ξεπερνούν το ένα εκατοστό. Ακολουθούν οι τιμές των μετακινήσεων της οροφής του κεντρικού τρούλου, που είναι της τάξεως του ενός εκατοστού.



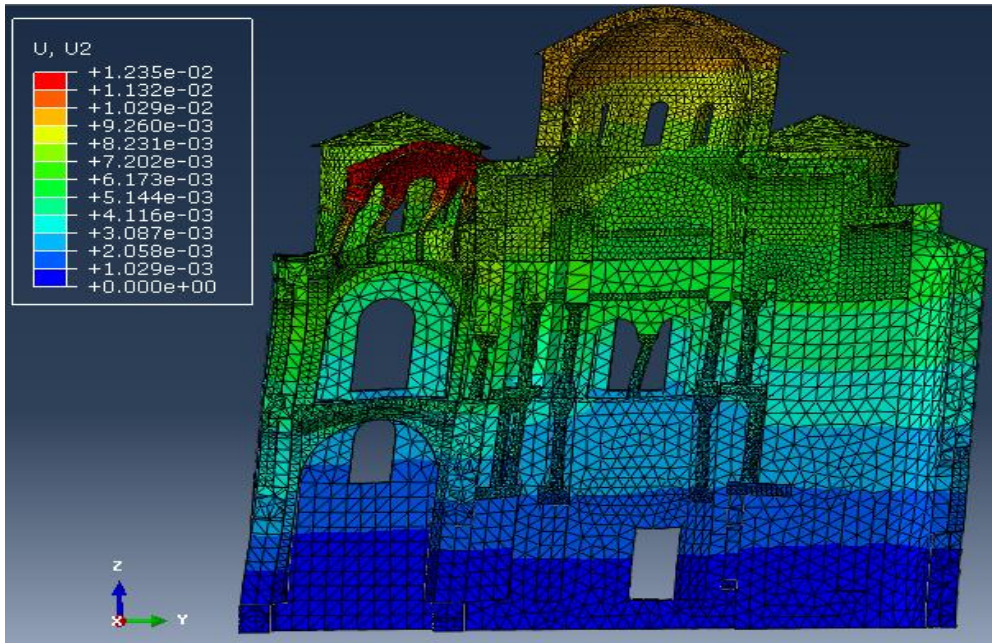
Εικόνα 8.23: Παραμορφωμένη γεωμετρία συνολικού φορέα.



Εικόνα 8.24: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση X στο επίπεδο XY.



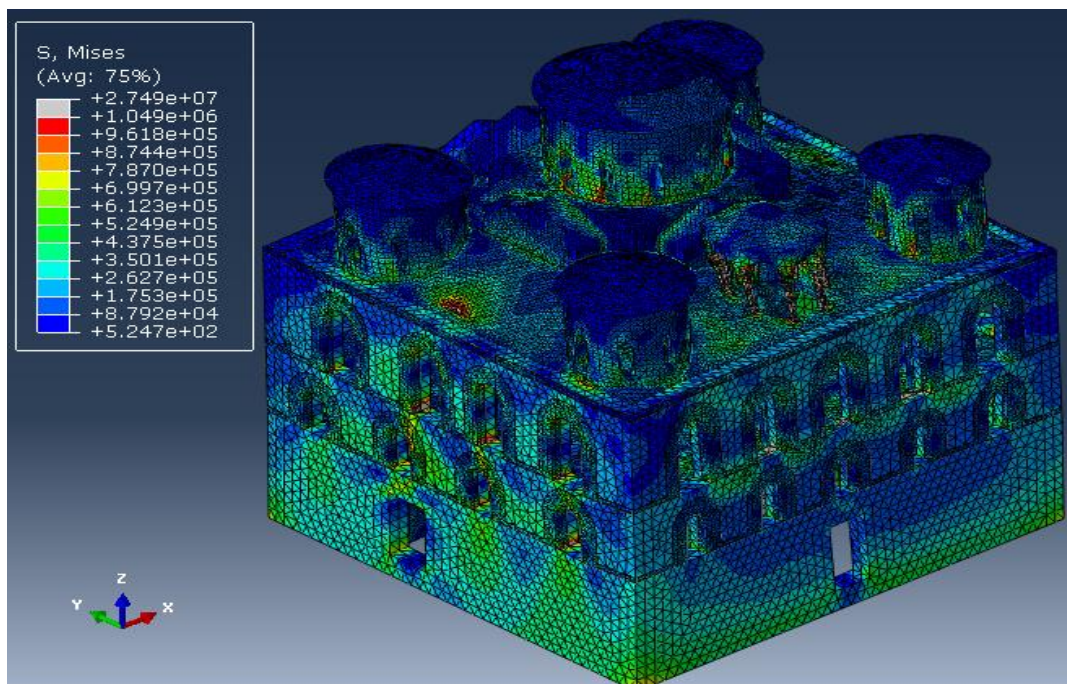
Εικόνα 8.25: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση Y στο επίπεδο XY.



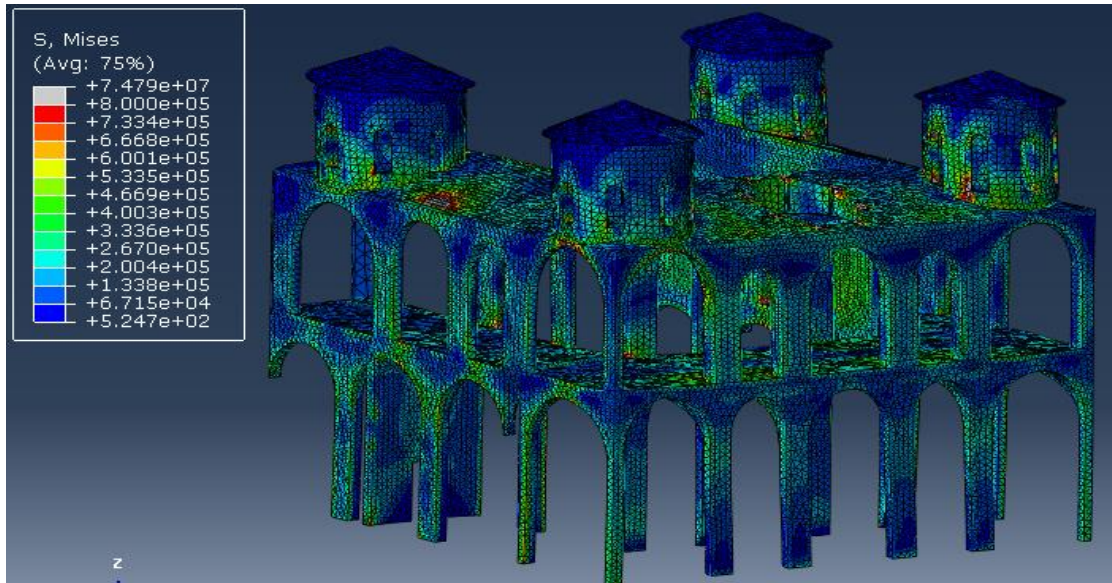
Εικόνα 8.26: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση Y στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο YZ.

Τάσεις

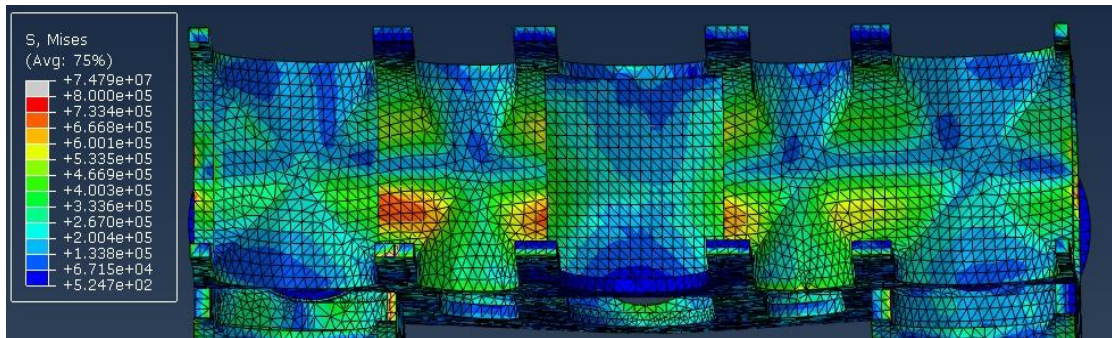
Σημαντικές τάσεις αναπτύσσονται στον κεντρικό τρούλο, στα διαμερίσματα του νάρθηκα, στον εσωτερικό νότιο τοίχο του κυρίως ναού και στον ουρανόσκο. Στον κεντρικό τρούλο οι τάσεις Von Mises φτάνουν το 90% θλιπτικής αντοχής, ενώ στον ανοιχτό ουρανόσκο ξεπερνούν κατά πολύ τη θλιπτική αντοχή. Στους μαρμαρίνους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο οι τάσεις φτάνουν το 20% της θλιπτικής αντοχής.



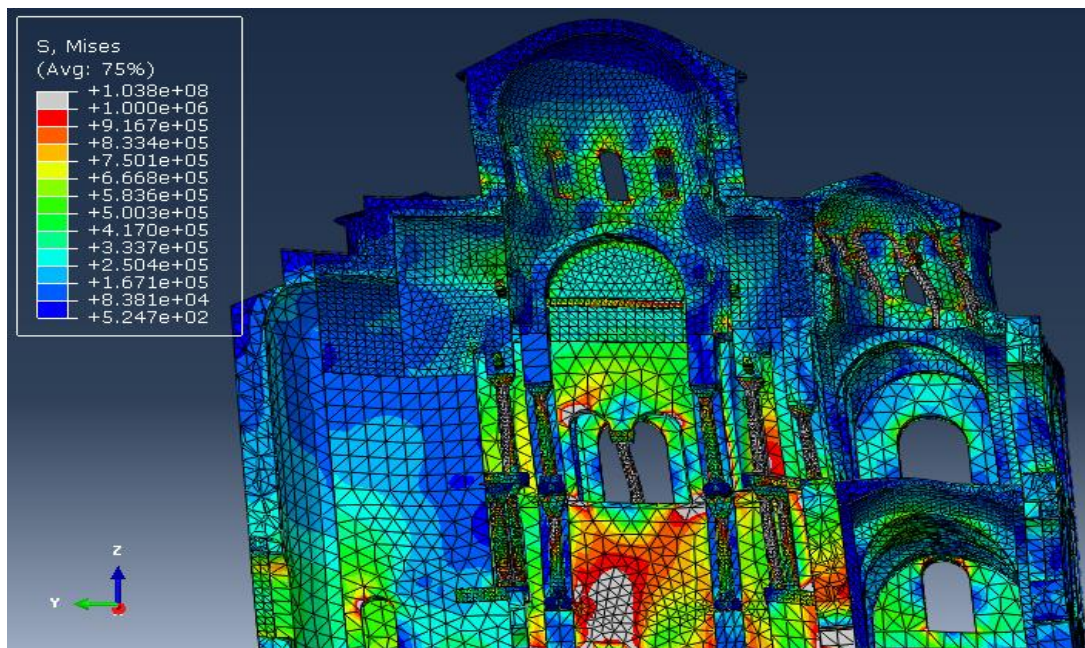
Εικόνα 8.27: Κατανομή τάσεων Von Mises στο συνολικό φορέα.



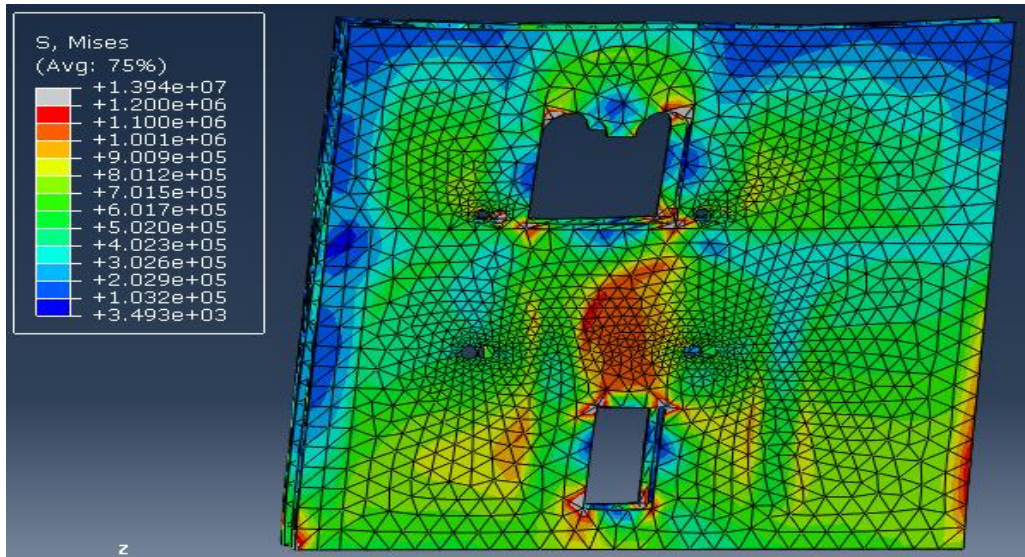
Εικόνα 8.28: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του περιστώου, μέγιστη ένταση παρουσιάζουν τα διαμερίσματα του νάρθηκα.



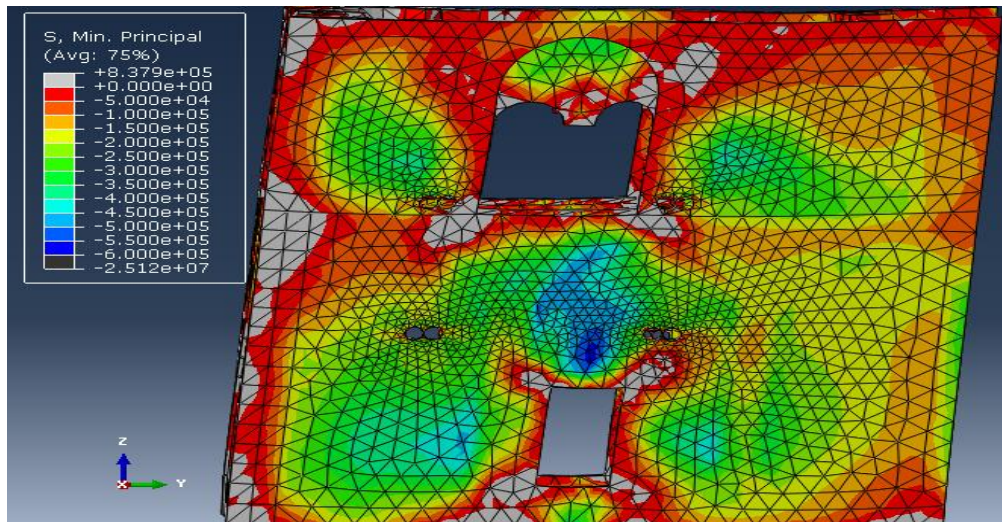
Εικόνα 8.29: Κατανομή τάσεων Von Mises στις οροφές των διαμερισμάτων του νάρθηκα, φτάνουν 55% θλιπτικής αντοχής.



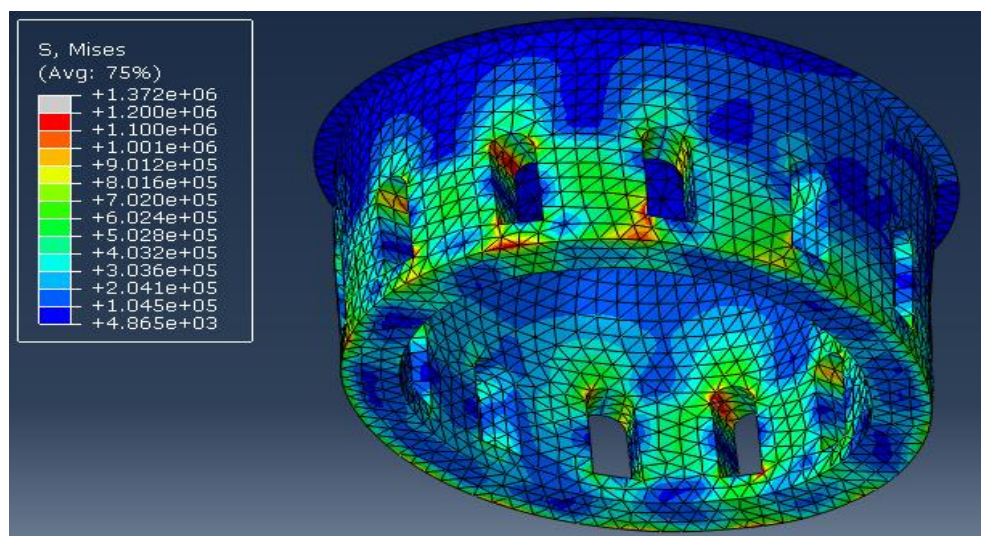
Εικόνα 8.30: Κατανομή τάσεων Von Mises στο εσωτερικό του κτιρίου στη νότια πλευρά του κυρίως ναού.



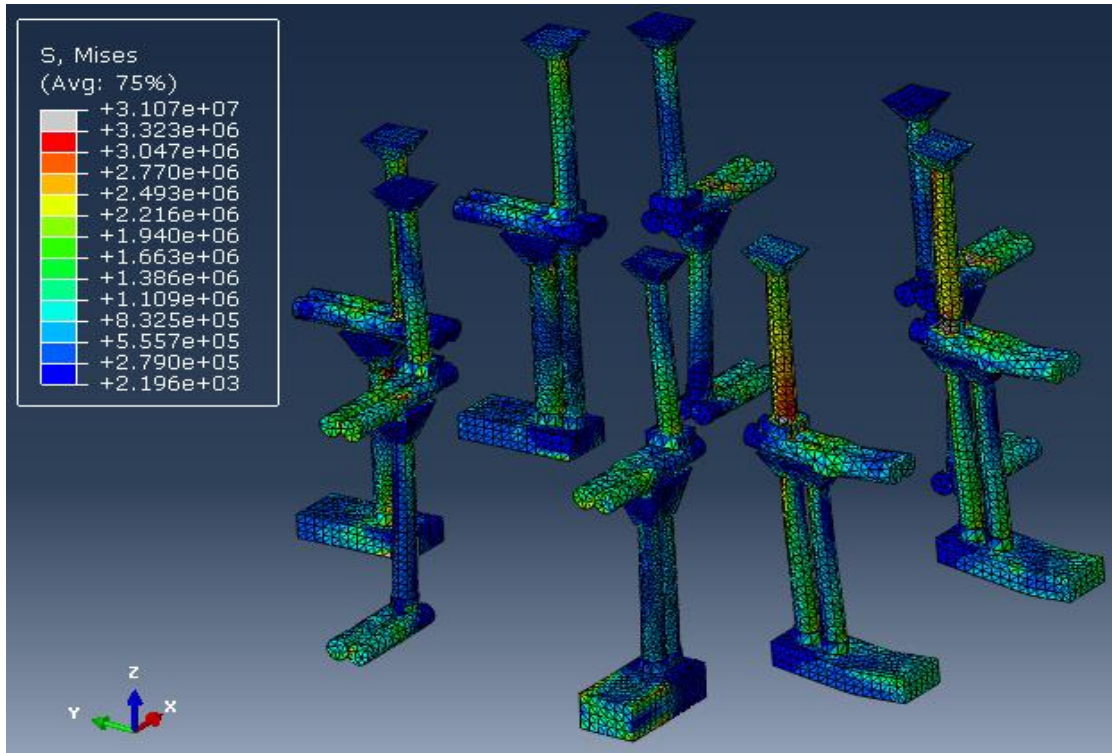
Εικόνα 8.31: Κατανομή τάσεων Von Mises στον εσωτερικό νότιο τοίχο του κυρίως ναού, φτάνουν 40% αντοχής.



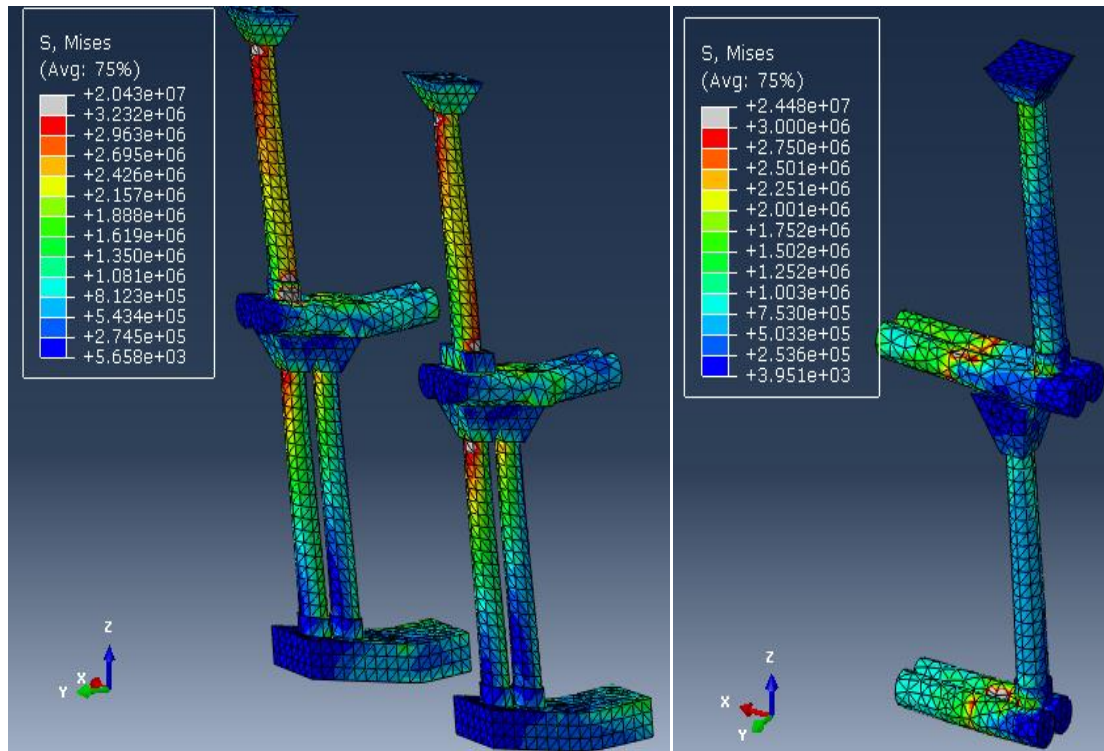
Εικόνα 8.32: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στον εσωτερικό νότιο τοίχο του κυρίως ναού.



Εικόνα 8.33: Κατανομή τάσεων Von Mises στον κεντρικό τρούλο, φτάνουν 90% της θλιπτικής αντοχής.



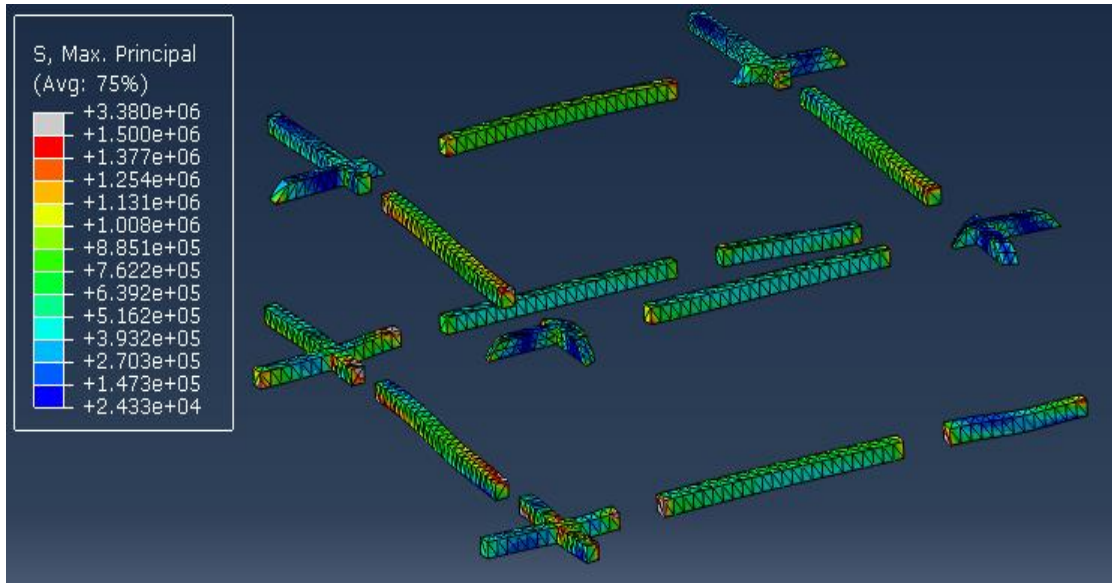
Εικόνα 8.34: Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο, δεν ξεπερνούν το 20% της αντοχής στον κορμό.



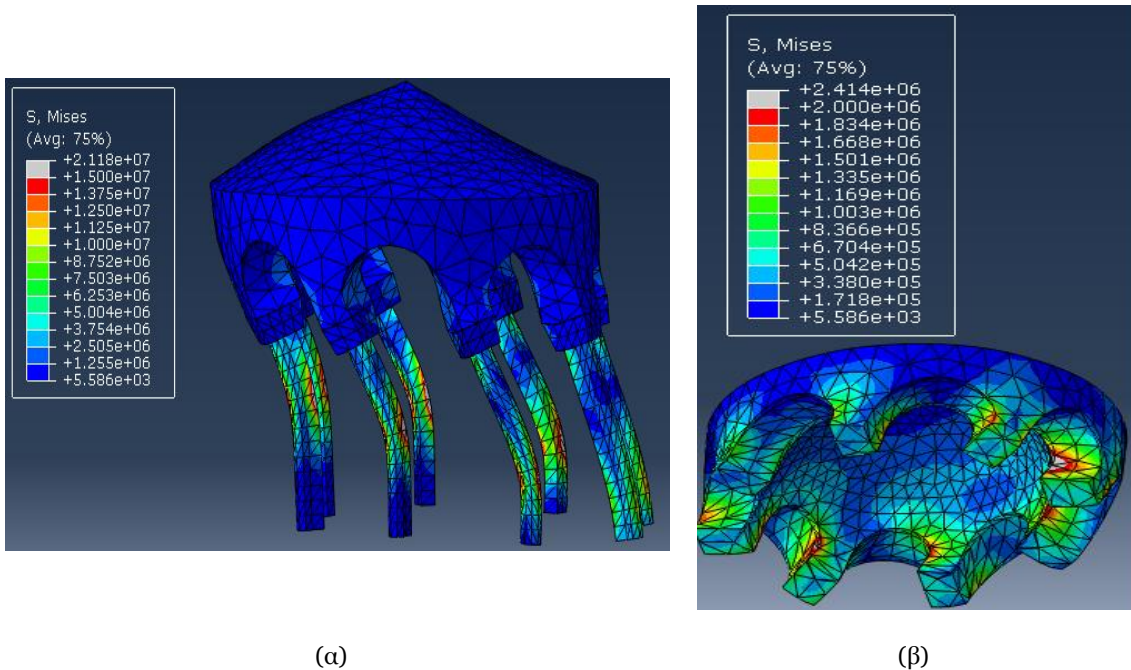
(α)

(β)

Εικόνα 8.35: (α) Κατανομή τάσεων Von Mises στο ζεύγος των μαρμάρινων κίωνων της δυτικής πλευράς του κυρίου ναού, στους οποίους εμφανίζονται οι δυσμενέστερες τάσεις στον κορμό των κίωνων, δεν ξεπερνούν 20% θλιπτικής αντοχής. (β) Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες της βόρειας πλευράς που εμφανίζονται οι δυσμενέστερες τάσεις στους οριζόντιους προβόλους ξεπερνούν 20% θλιπτικής αντοχής.



Εικόνα 8.36: Εφελκυστικές κύριες τάσεις ξύλινων ελκυστήρων φτάνουν 40% εφελκυστικής αντοχής.



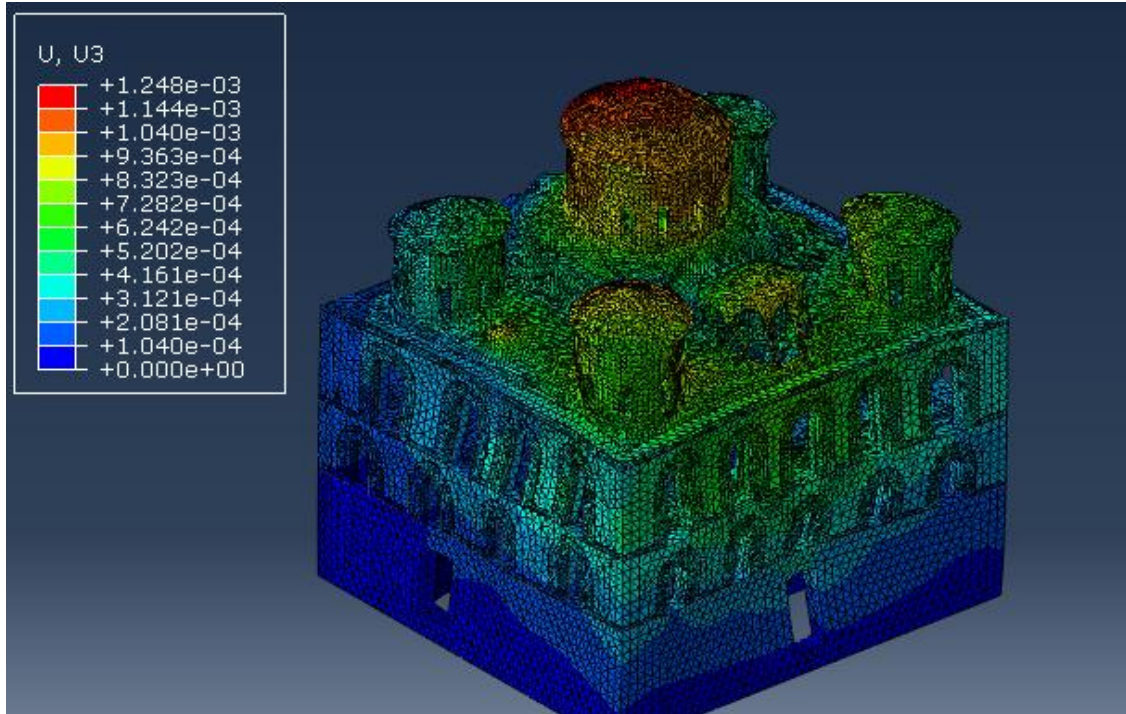
Εικόνα 8.37: (α) Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον ουρανόξυλο ξεπερνούν 80% θλιπτικής αντοχής. (β) Κατανομή τάσεων Von Mises στο κέλυφος του ουρανόξυλου ξεπερνούν θλιπτική αντοχή κατά 0.9 MPa.

8.3.3 0.7Z

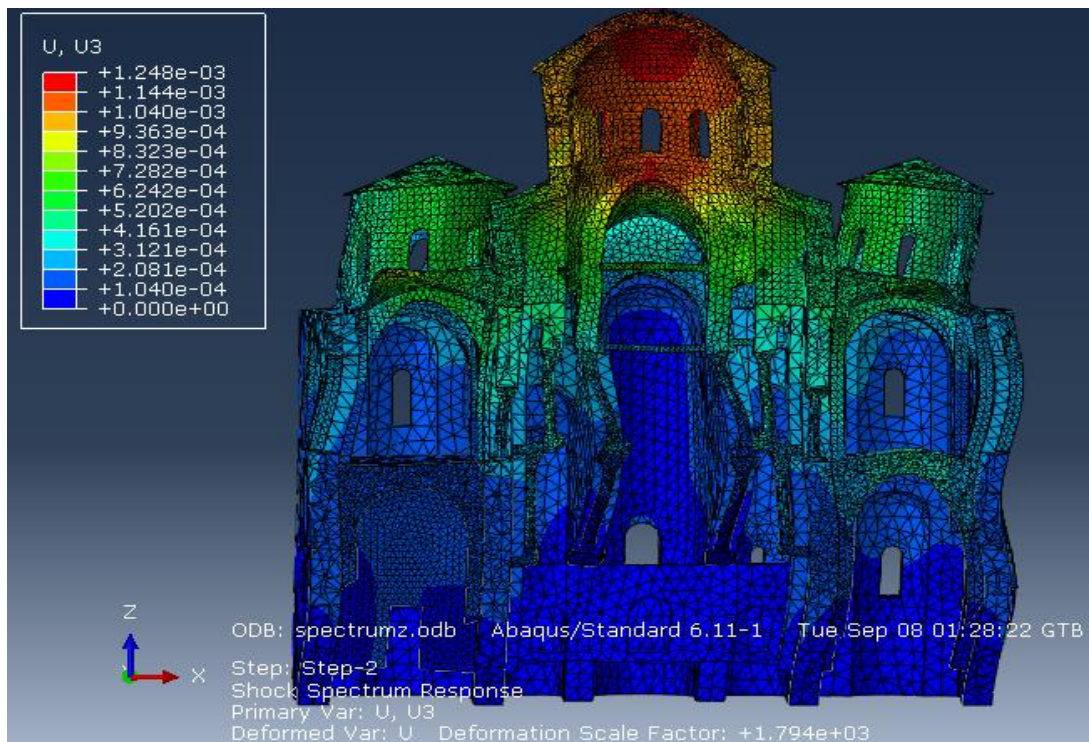
Οι τιμές των μετακινήσεων και των τάσεων που προκύπτουν είναι πολύ μικρότερες για σεισμό κατά την κατακόρυφη συνιστώσα, όπως αναμενόταν αφού η κατασκευή είναι πολύ πιο δύσκαμπτη κατά τη διεύθυνση αυτή.

Μετατοπίσεις

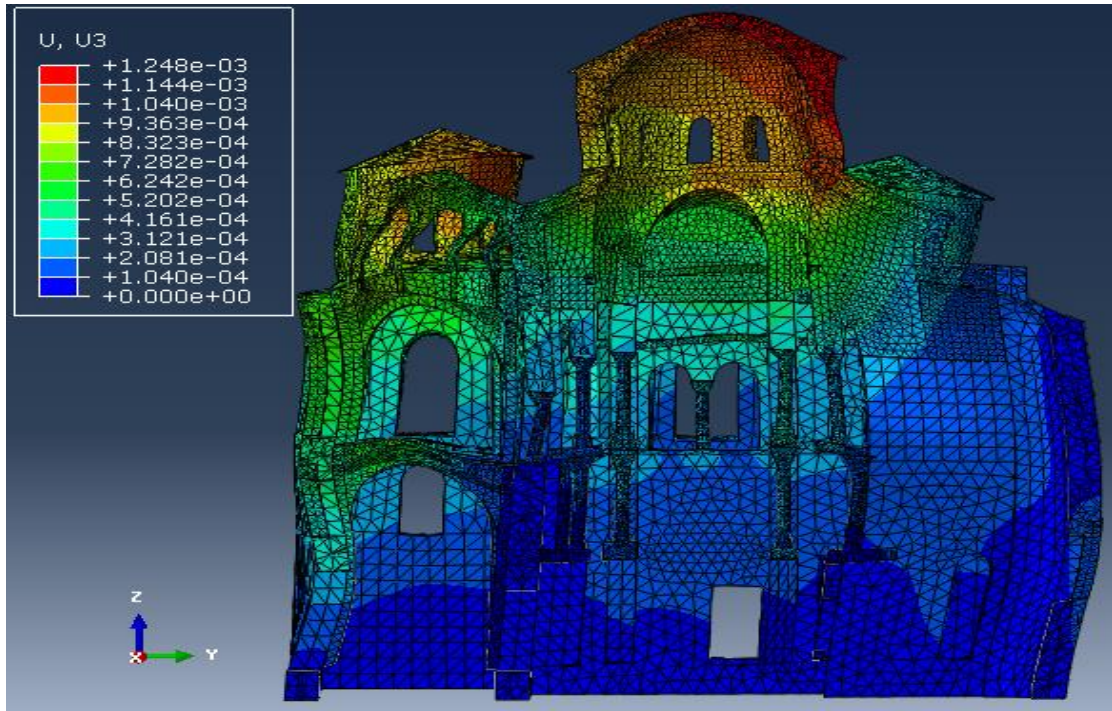
Μέγιστες μετατοπίσεις παρουσιάζονται στην οροφή του κεντρικού τρούλου και στον βορειοδυτικό περιμετρικό τρούλο, ξεπερνούν κατά λίγο το ένα χιλιοστό.



Εικόνα 8.38: Παραμορφωμένη γεωμετρία συνολικού φορέα.



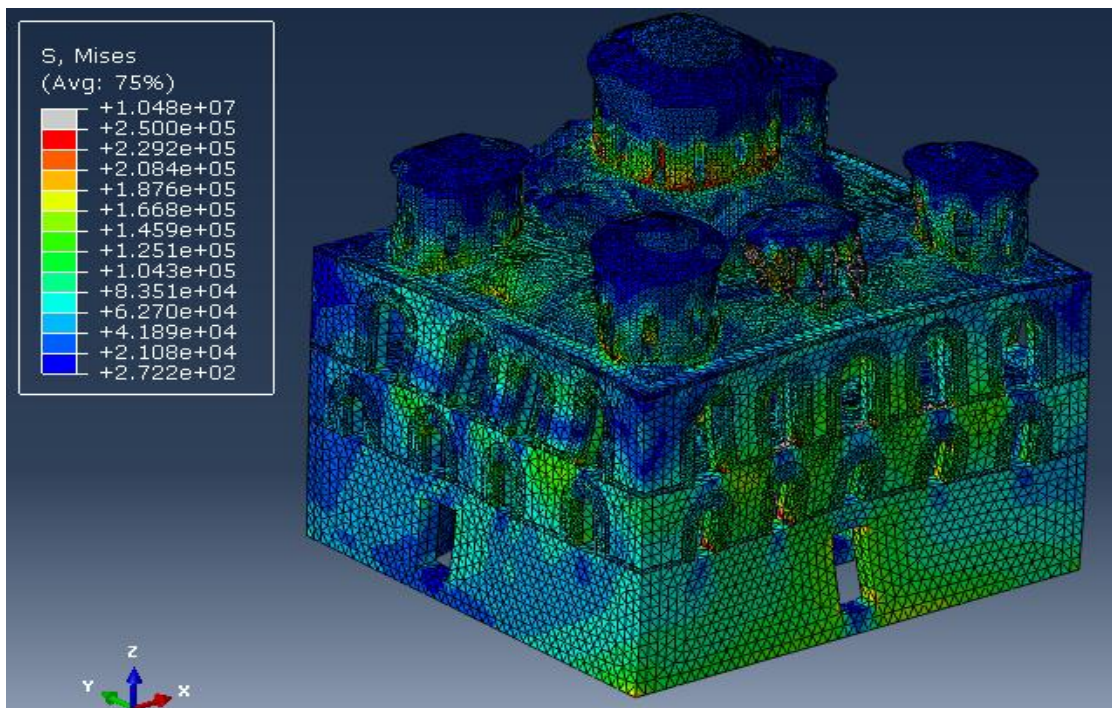
Εικόνα 8.39: Μετακινήσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο XZ.



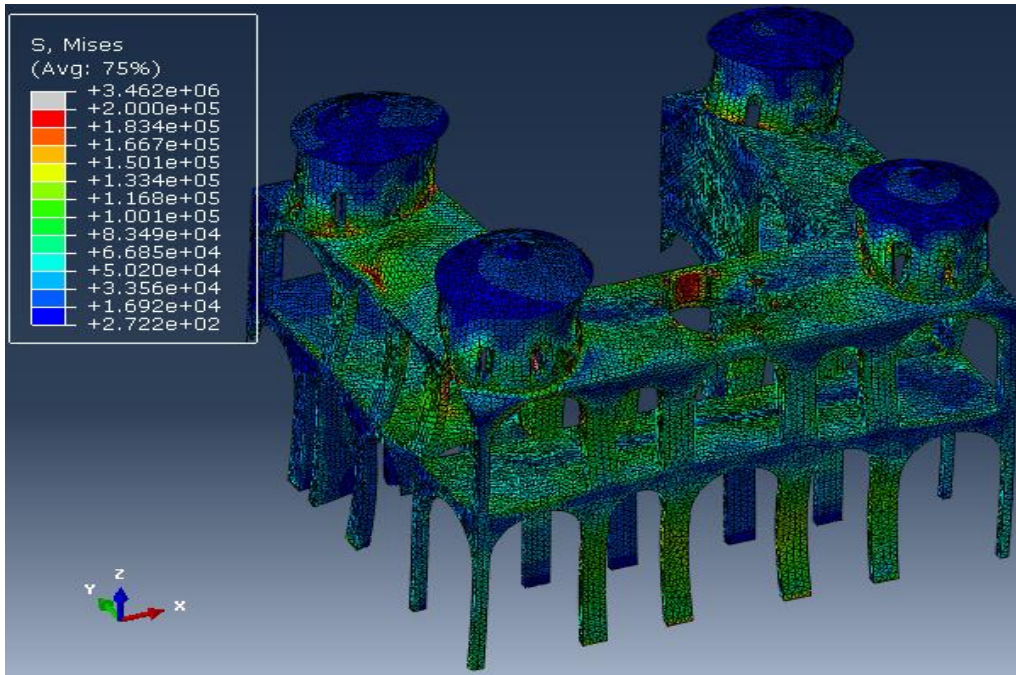
Εικόνα 8.40: Μετακινήσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο YZ.

Τάσεις

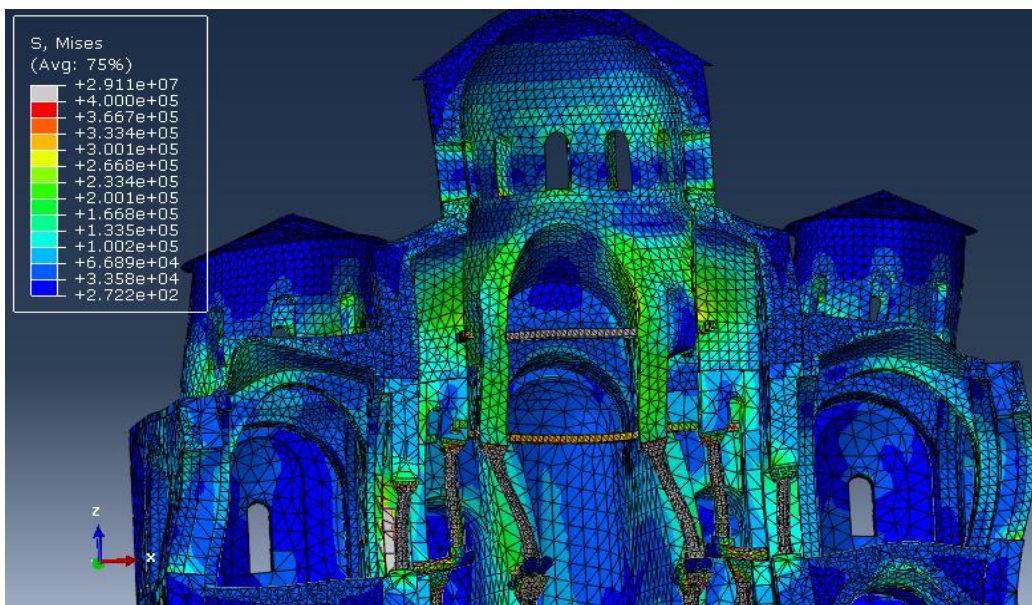
Στοιχεία που καταπονούνται περισσότερο είναι ο κεντρικός τρούλος, η ανατολική καμάρα που τον στηρίζει, το ζεύγος των μαρμάρινων κίωνων της ανατολικής πλευράς, οι ξύλινοι ελκυστήρες και οι μαρμάρινοι κίονες που στηρίζουν τον ουρανίσκο.



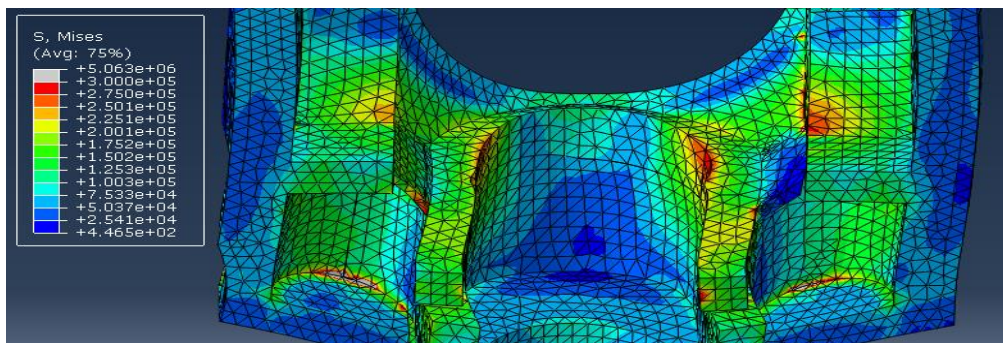
Εικόνα 8.41: Κατανομή τάσεων Von Mises στο συνολικό φορέα.



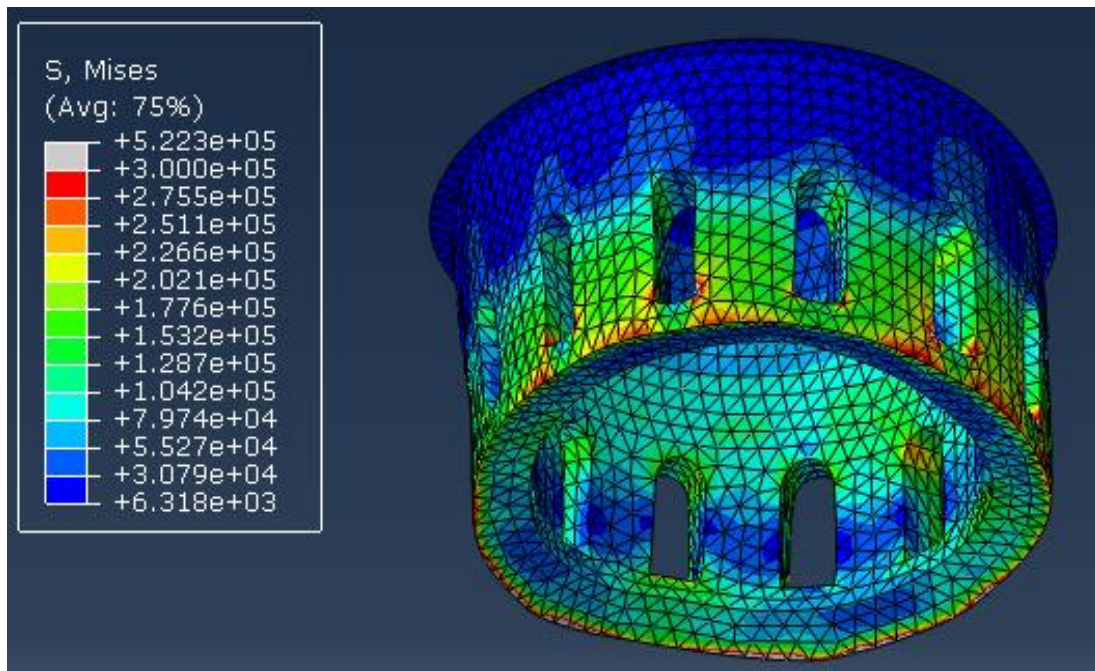
Εικόνα 8.42: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του περιστώου.



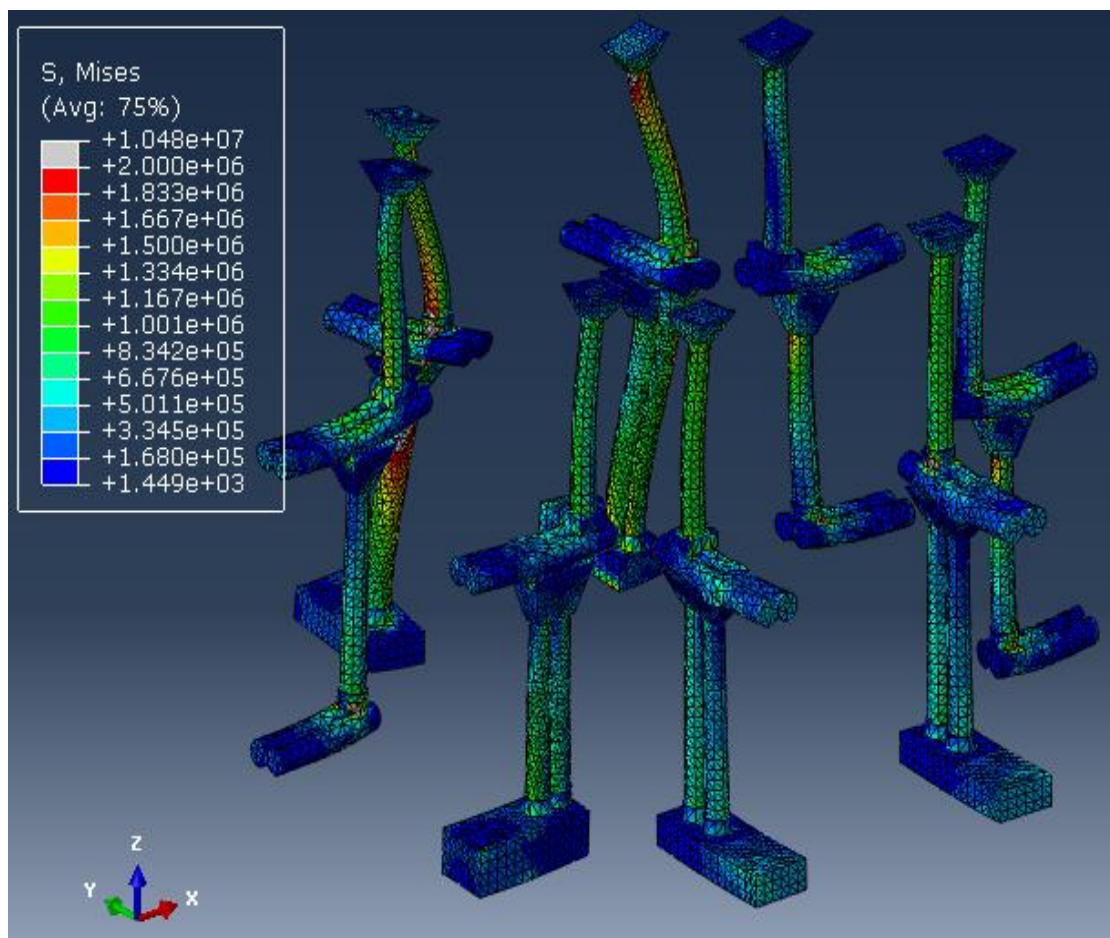
Εικόνα 8.43: Κατανομή τάσεων Von Mises στην ανατολική εσωτερική πλευρά του κυρίως ναού.



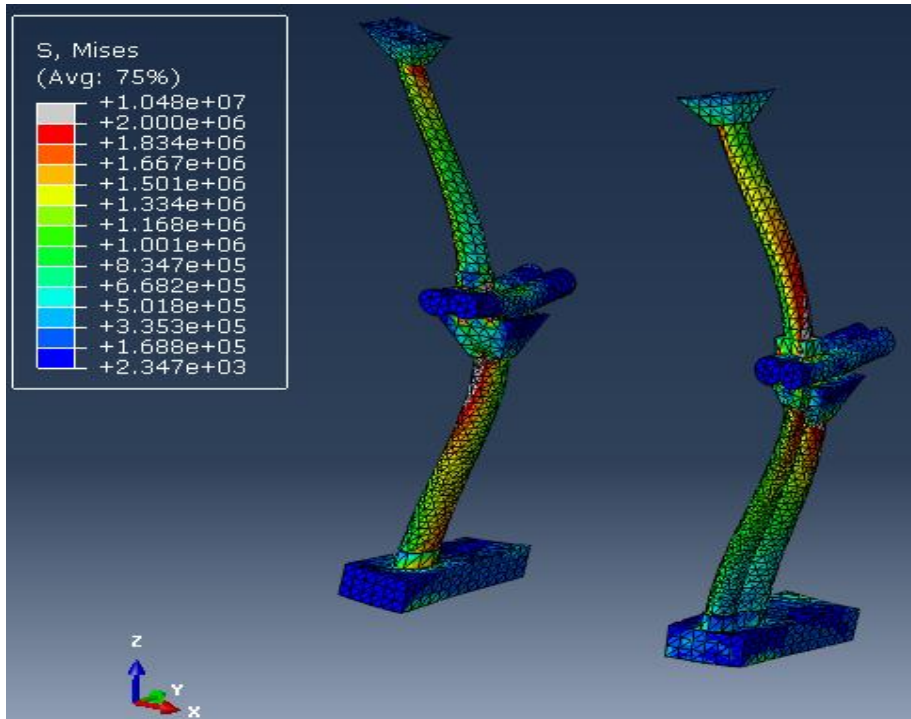
Εικόνα 8.44: Κατανομή τάσεων Von Mises στη καμάρα της ανατολική πλευράς του κυρίως ναού, φτάνουν 20% αντοχής.



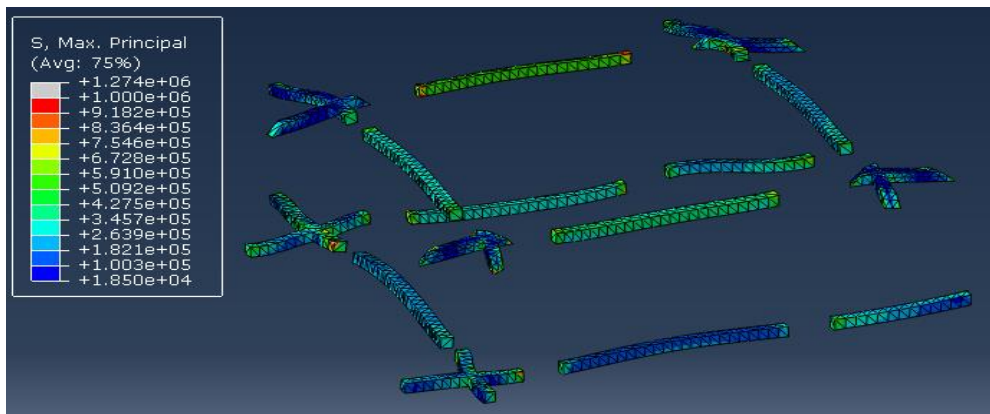
Εικόνα 8.45: Κατανομή τάσεων Von Mises στον κεντρικό τρούλο, φτάνουν 1/3 αντοχής.



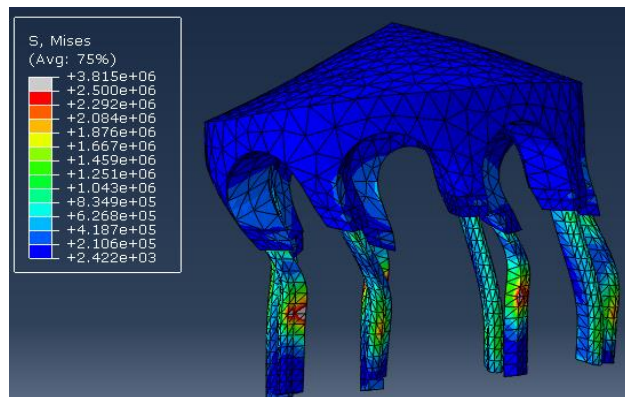
Εικόνα 8.46: Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.



Εικόνα 8.47: Κατανομή τάσεων Von Mises στο ζεύγος των μαρμαρίνων κίονων της ανατολικής πλευράς, που εμφανίζουν τις μέγιστες τάσεις, φτάνουν 15 % θλιπτικής αντοχής.



Εικόνα 8.48: Κατανομή εφελκυστικών κύριων τάσεων ξύλινων ελκυστήρων, φτάνουν 15% εφελκυστικής αντοχής.



Εικόνα 8.49: Κατανομή τάσεων Von Mises στον ουρανίσκο και στους κίονες που τον στηρίζουν, φτάνουν 15% αντοχής στους τελευταίους.

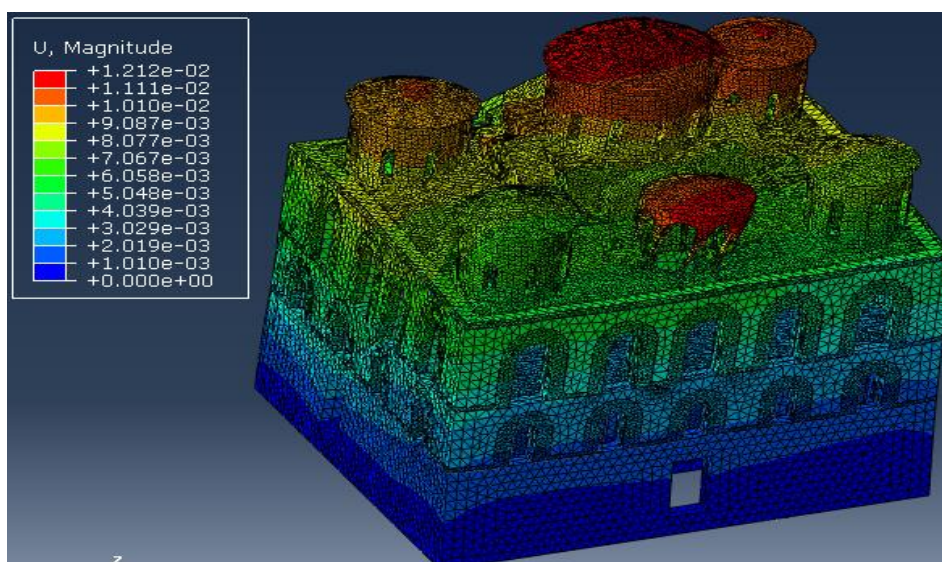
8.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

Διενεργήθηκαν δύο αναλύσεις όπου λήφθηκε υπόψη κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, ώστε να διαπιστωθεί εάν επηρεάζει το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου. Για την κατακόρυφη συνιστώσα έχει ληφθεί το 70% των τιμών των επιταχύνσεων του φάσματος σχεδιασμού. Θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι διαφορές στις μετακινήσεις του συνολικού φορέα και οι πιο σημαντικές διαφορές στις τάσεις των μαρμάρινων κιόνων που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.

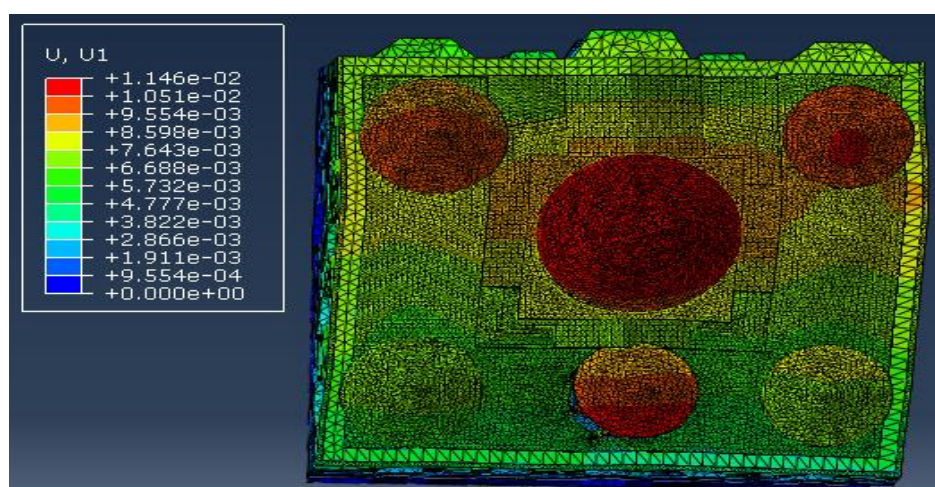
8.4.1 X+0.3Y+0.3Z

Διαφορές μετακινήσεων

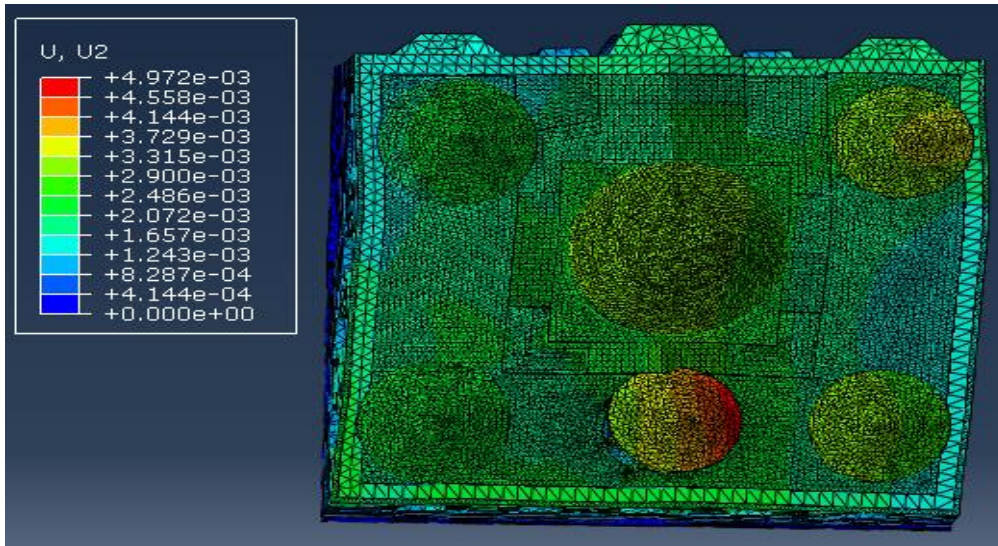
Οι μετακινήσεις που προκύπτουν παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές σε σχέση με την ανάλυση για συνδυασμό σεισμού με διευθύνσεις X+0.3Y.



Εικόνα 8.50: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα. Μεγαλύτερη η μέγιστη μετακίνηση κατά ένα χιλιοστό.



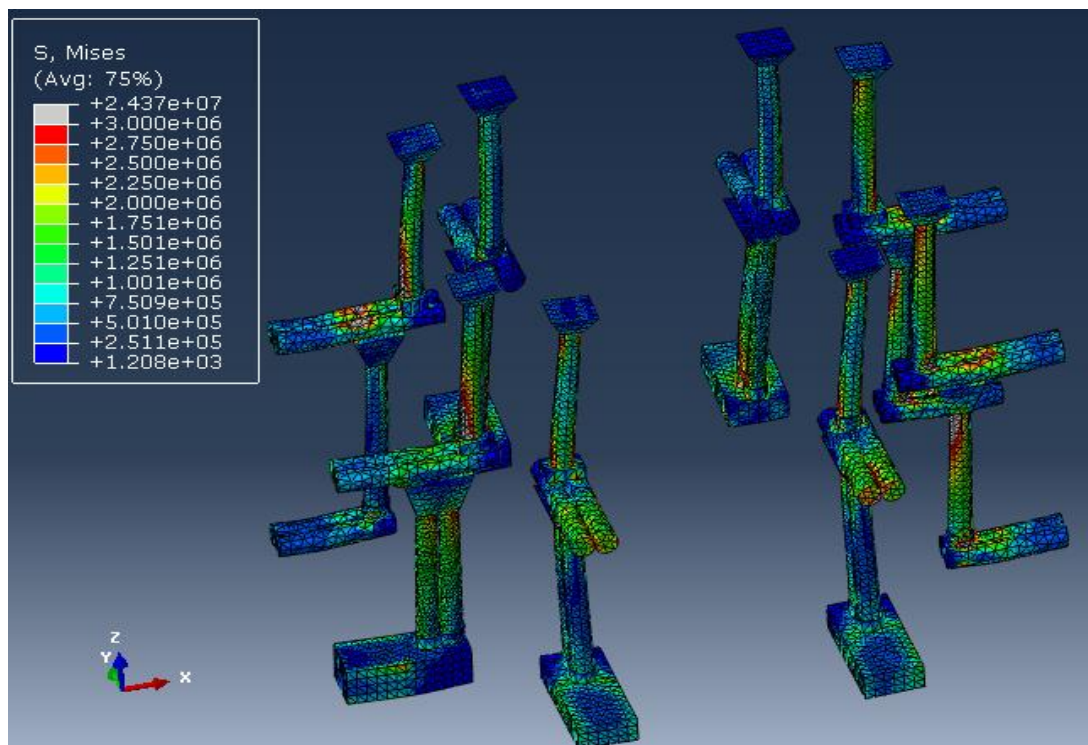
Εικόνα 8.51: Μετακινήσεις φορέα κατά τη διεύθυνση X, είναι μικρότερη η μέγιστη τιμή κατά πέντε χιλιοστά.



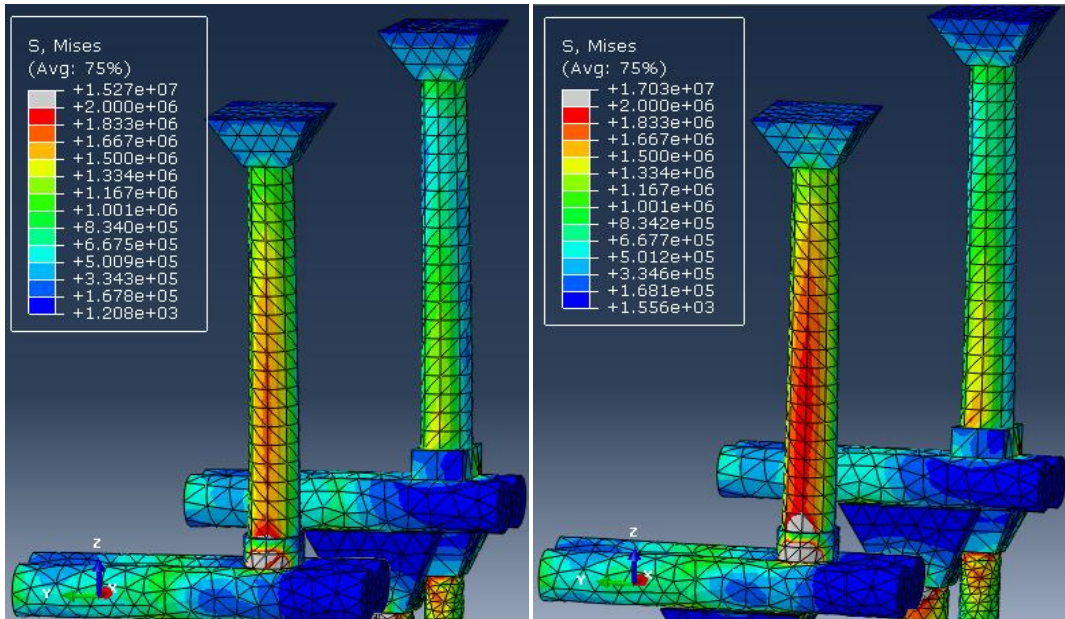
Εικόνα 8.52: Μετακινήσεις κατά την Y διεύθυνση, η μέγιστη τιμή μεγαλύτερη κατά 7 χιλιοστά.

Διαφορές τάσεων

Οι διαφορές στην κατανομή των τάσεων είναι πολύ μικρές σε σχέση με την περίπτωση σεισμού X+0.3Y. Οι σημαντικότερες διαφορές παρατηρούνται στα ζεύγη των μαρμάρινων κίωνων της δυτικής και ανατολικής πλευράς. Οι άνω κίονες καταπονούνται περισσότερο στην περίπτωση που συμμετέχει και η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού χωρίς όμως οι διαφορές στις τιμές των τάσεων να είναι μεγάλες.



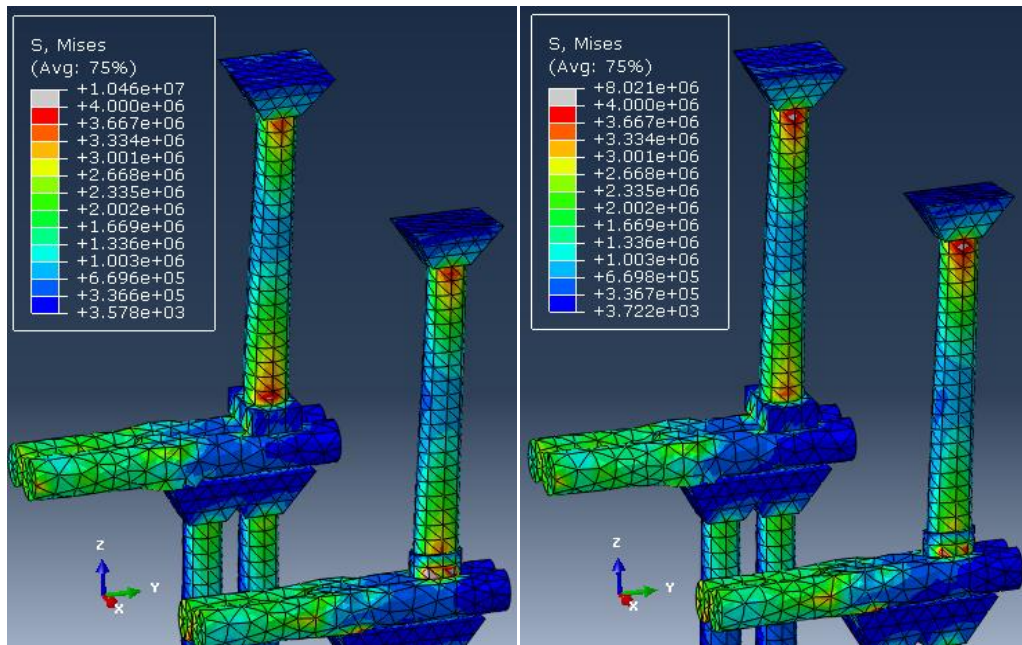
Εικόνα 8.53: Κατανομή τάσεων Von Mises, μικρές οι διαφορές σε σχέση με την περίπτωση σεισμού X+0.3Y.



(α) Περίπτωση $X+0.3Y$

(β) Περίπτωση $X+0.3Y+0.3Z$.

Εικόνα 8.54: Κατανομή τάσεων Von Mises ζεύγους κίονων ανατολικής πλευράς για τις δύο αναλύσεις όπου φαίνονται οι διαφορές των τάσεων. Μέγιστη διαφορά παρατηρείται στο κάτω μέρος του κορμού του άνω κίονα μεγέθους 0,5 MPa.



(α) Περίπτωση $X+0.3Y$

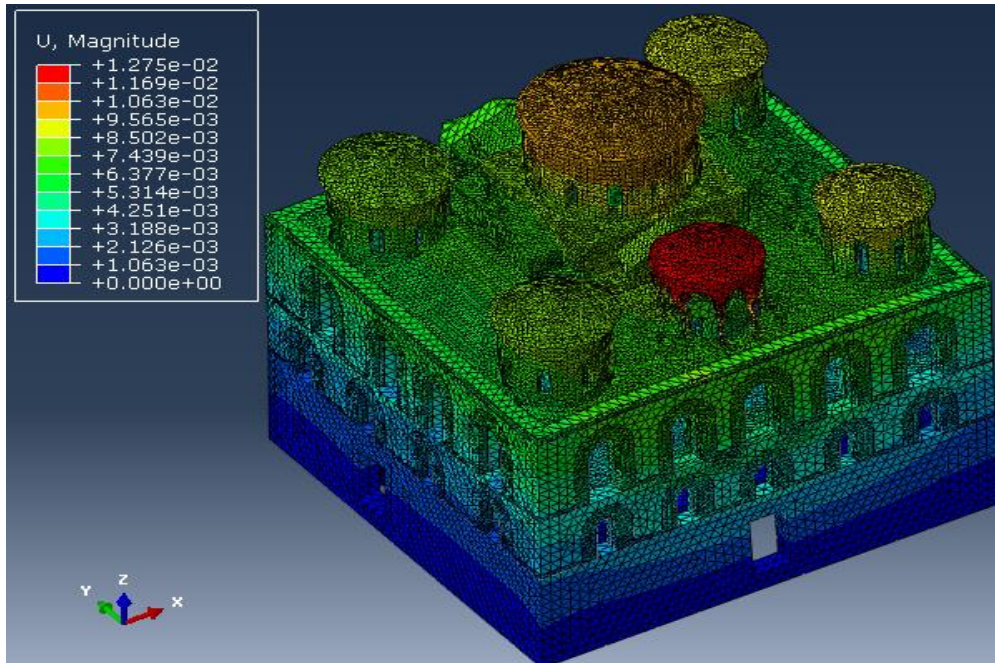
(β) Περίπτωση $X+0.3Y+0.3Z$.

Εικόνα 8.55: Κατανομή τάσεων Von Mises ζεύγους κίονων δυτικής πλευράς για τις δύο αναλύσεις όπου φαίνεται η διαφορά στην κατανομή των τάσεων, στο άνω μέρος του κορμού των κίονων παρατηρείται διαφορά 0.4 MPa.

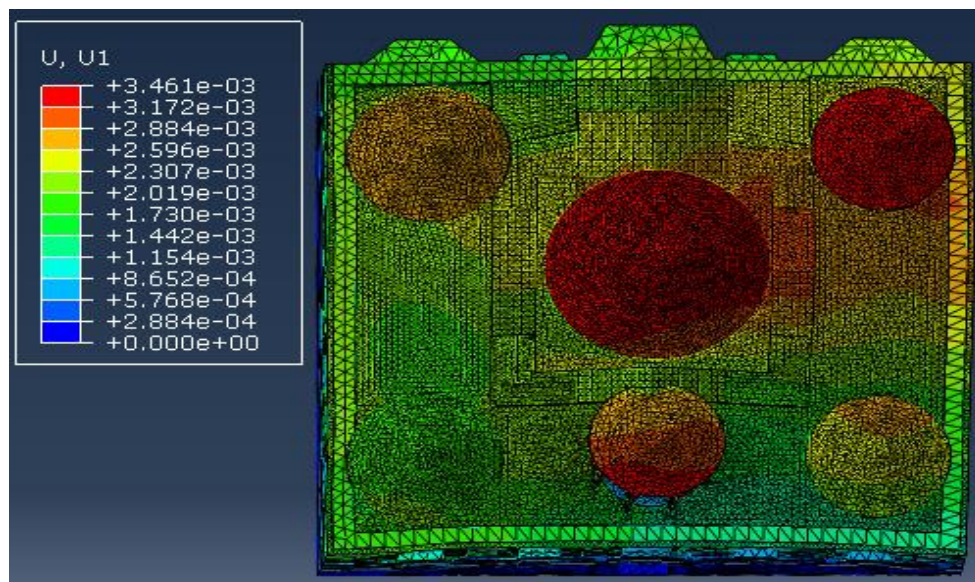
8.4.2 $Y+0.3X+0.3Z$

Διαφορές μετατοπίσεων

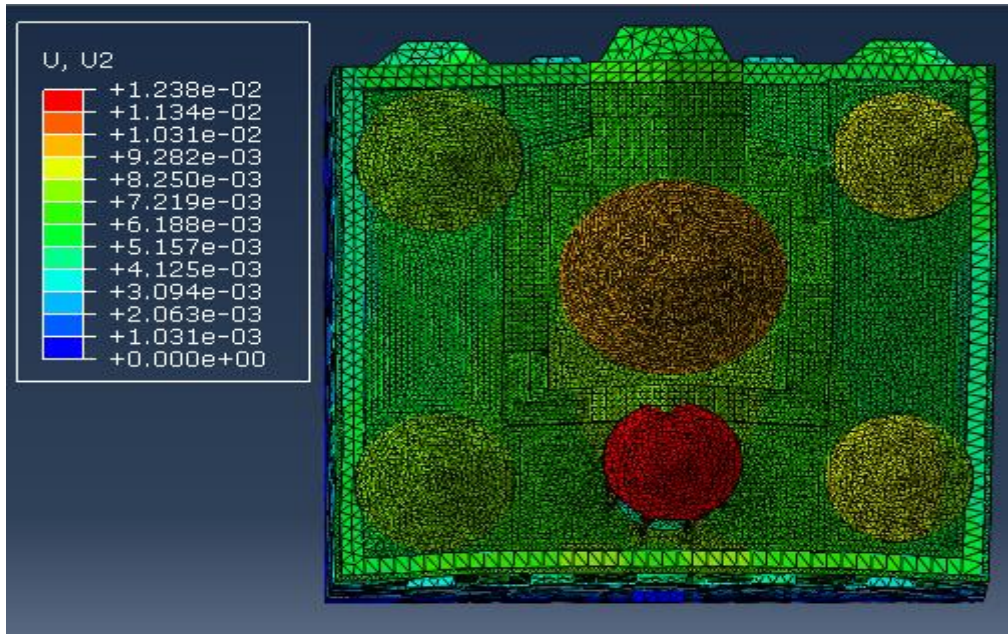
Στην συγκεκριμένη ανάλυση οι διαφορές στις τιμές είναι μικρότερες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.



Εικόνα 8.56: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα μεγαλύτερη η μέγιστη μετακίνηση κατά 3 χιλιοστά.



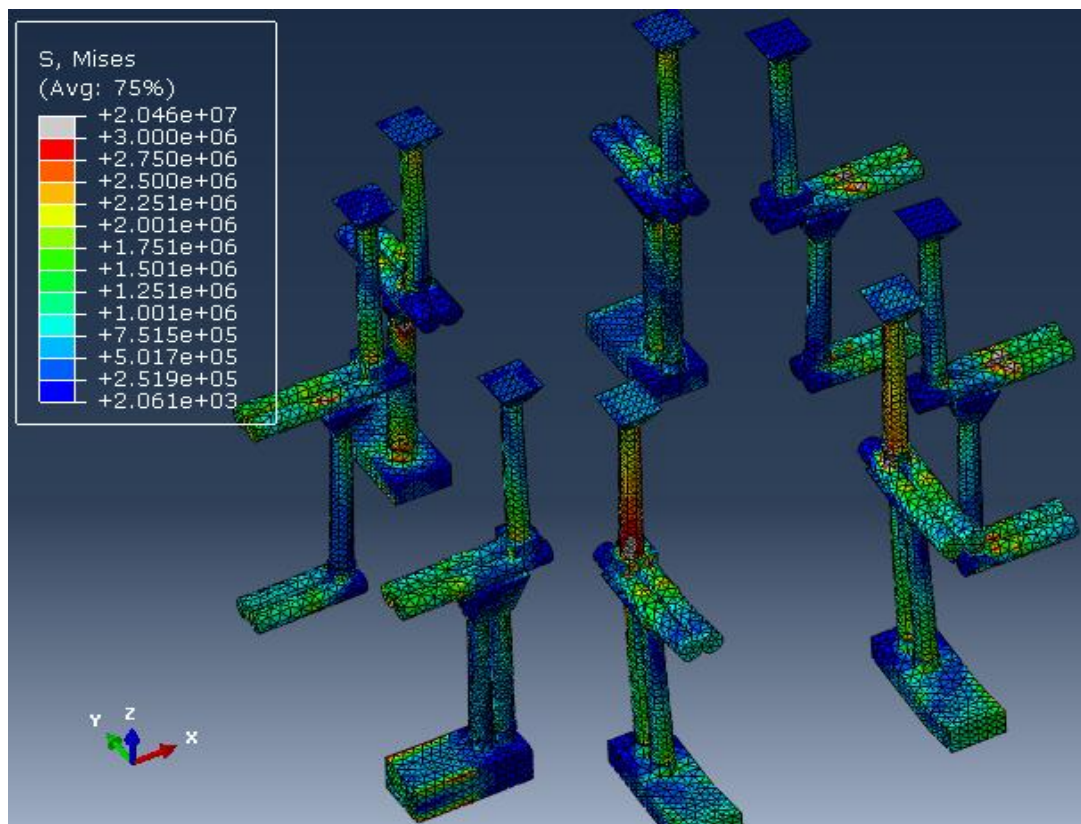
Εικόνα 8.57: Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση X στο επίπεδο XY, αυξημένη η μέγιστη τιμή κατά 3 χιλιοστά.



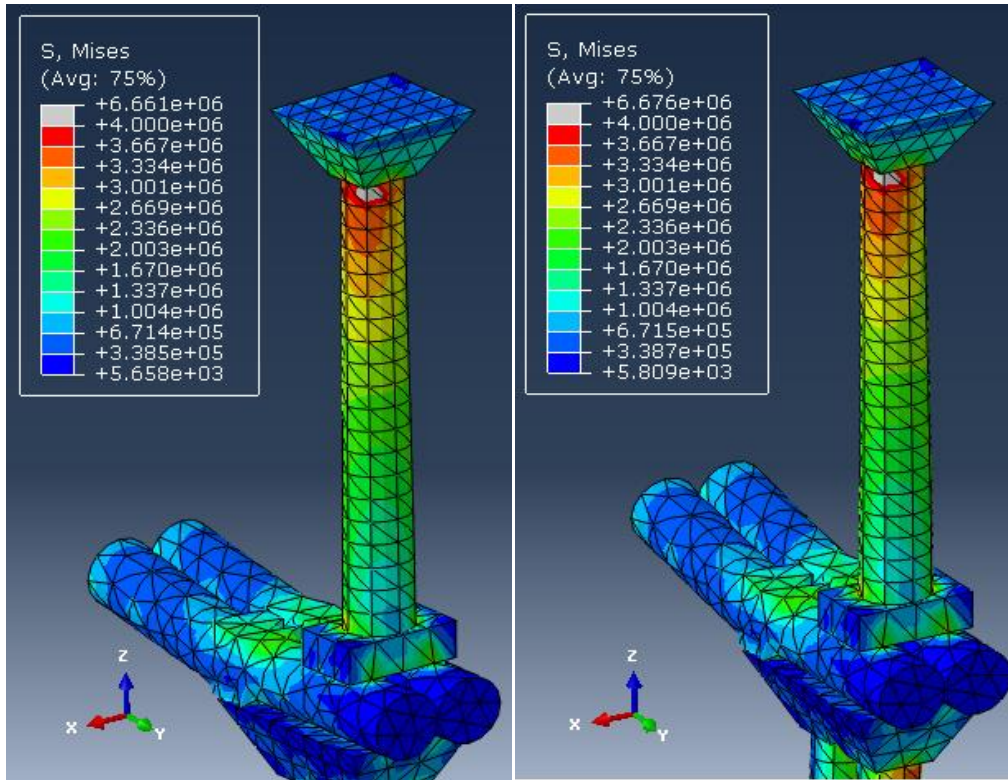
Εικόνα 8.58: Μετακινήσεις κατά την Y διεύθυνση στο επίπεδο XY, αυξημένη η μέγιστη τιμή κατά 3 χιλιοστά.

Διαφορές τάσεων

Οι διαφορές στις τιμές των τάσεων δεν φτάνουν ούτε το 0.1 MPa.



Εικόνα 8.59: Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.



(α) Περίπτωση $Y+0.3X$

(β) Περίπτωση $Y+0.3X+0.3Z$

Εικόνα 8.6ο: Άνω κίονας ανατολικής πλευράς για τις δύο περιπτώσεις σεισμού, όπου η κατανομή των τάσεων είναι σχεδόν πανομοιότυπη, διαφορές 0.02 MPa.

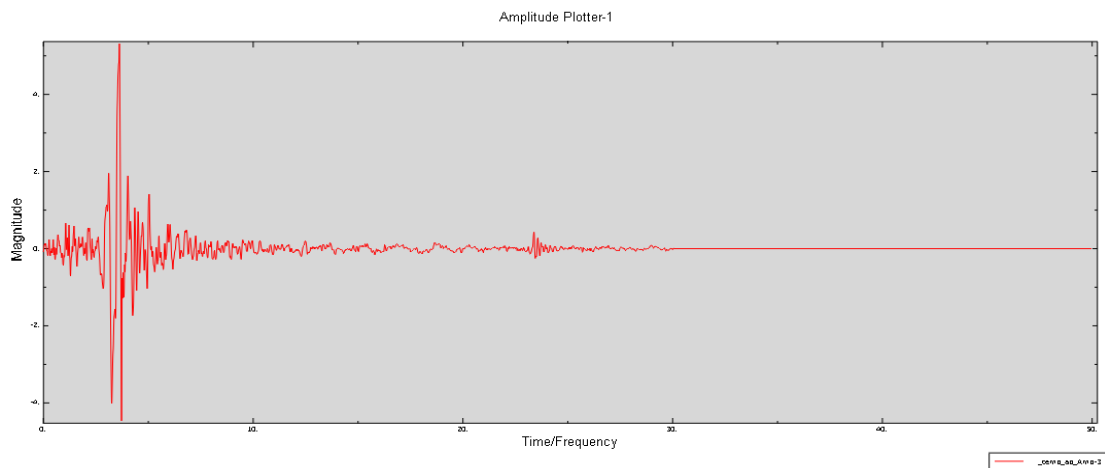
9. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ

Η σεισμική ανάλυση χρονοϊστορίας έγινε λαμβάνοντας υπόψη την ιδιομορφική επαλληλία και όχι δια της μεθόδου της απευθείας ολοκλήρωσης, κυρίως λόγω υπολογιστικού κόστους.

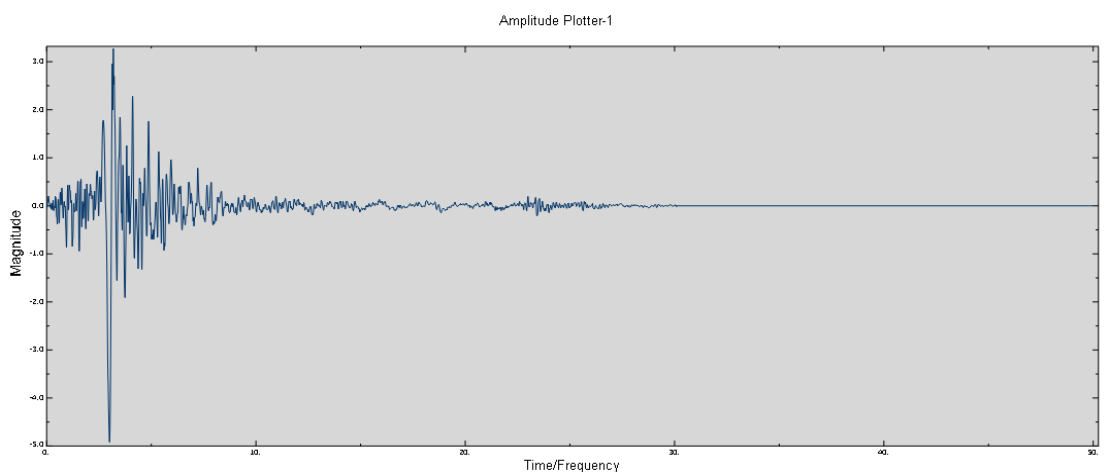
9.1 ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Ως σεισμικές διεγέρσεις επιλέχθηκαν οι χρονοϊστορίες των εδαφικών επιταχύνσεων του σεισμού του Αιγίου που συνέβη τον Ιούνιο του 1995 με σεισμικό μέγεθος $M_w=6,4$ και του σεισμού της Λευκάδας που συνέβη τον Αύγουστο του 2003 με σεισμικό μέγεθος $M_w=6,2$.

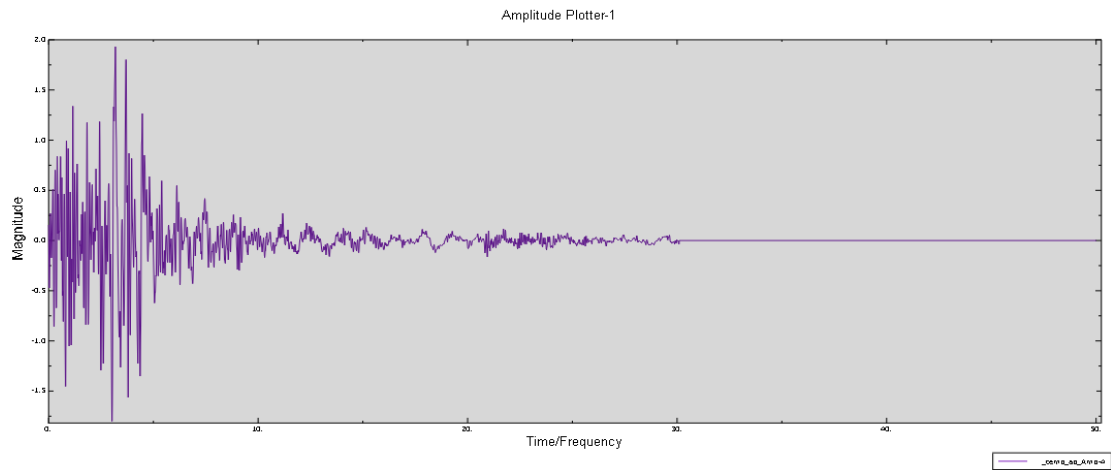
Σεισμός Αιγίου



Εικόνα 9.1: Χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων σεισμού του Αιγίου κατά την οριζόντια διεύθυνση X με μέγιστο 5.3m/s^2 .

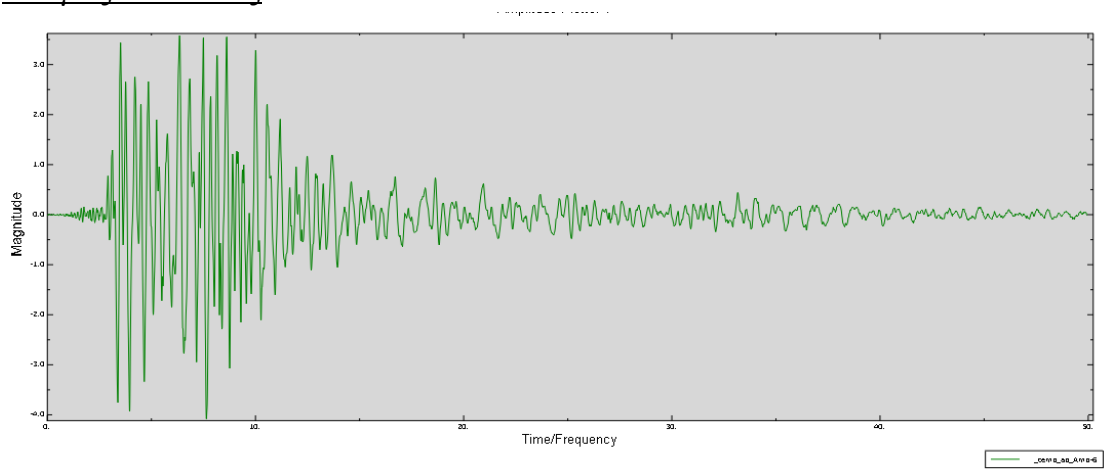


Εικόνα 9.2: Χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων σεισμού του Αιγίου κατά την εγκάρσια διεύθυνση Y με μέγιστο 4.9m/s^2 .

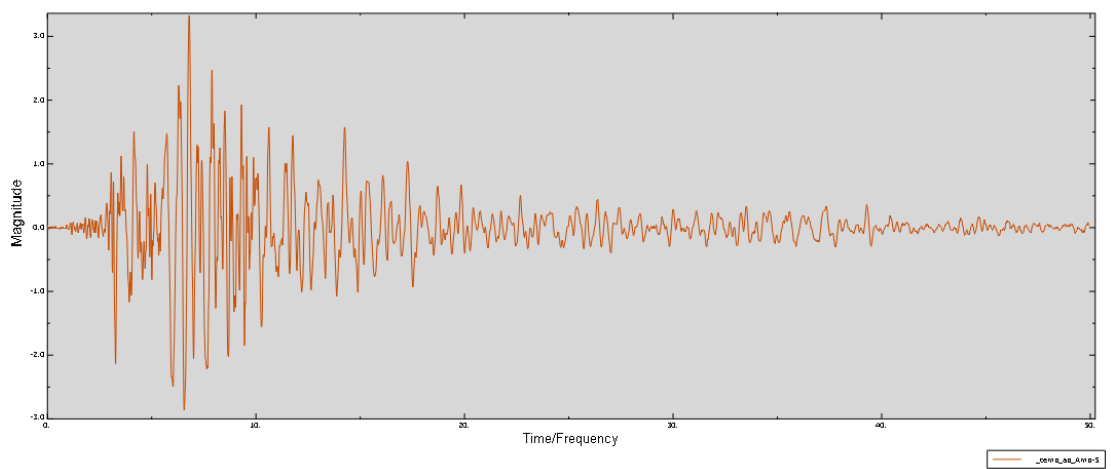


Εικόνα 9.3: Χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων σεισμού του Αιγίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση Z με μέγιστο 1.8 m/s^2 .

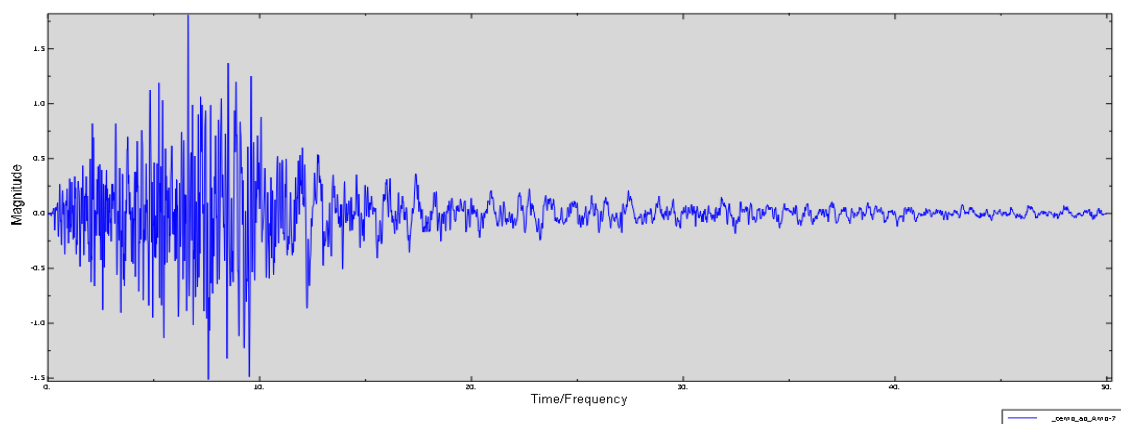
Σεισμός Λευκάδας



Εικόνα 9.4: Χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων σεισμού Λευκάδας κατά την οριζόντια διεύθυνση X με μέγιστο 4 m/s^2 .



Εικόνα 9.5: Χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων σεισμού Λευκάδας κατά την εγκάρσια διεύθυνση Y με μέγιστο 3.3 m/s^2 .

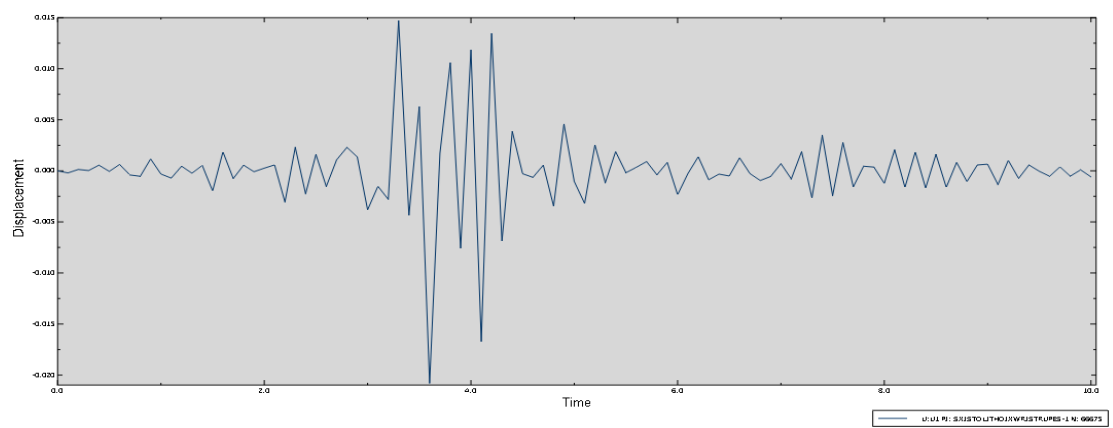


Εικόνα 9.6: Χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων σεισμού Λευκάδας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση Z με μέγιστο 1.8 m/s².

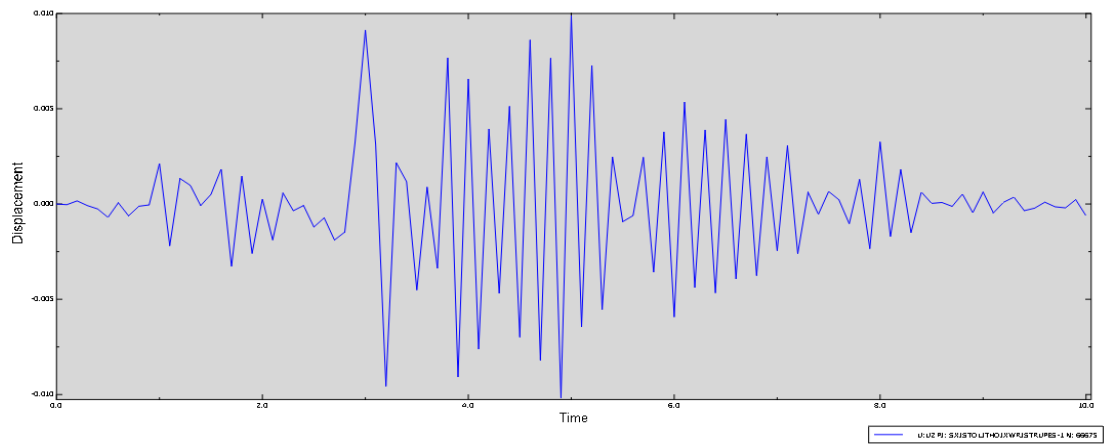
Στο πρόγραμμα ABAQUS για να γίνει η ανάλυση χρονοϊστορίας δημιουργήθηκε δεύτερο βήμα μετά την εύρεση των ιδιομορφών με την εντολή Create Step→Procedure type: Linear Perturbation→Modal Analysis. Οι αναλύσεις για το σεισμό του Αιγίου έγιναν για διάρκεια σεισμού 10s με βήμα επίλυσης 0,005s, ενώ για το σεισμό της Λευκάδας για διάρκεια 20s με βήμα επίλυσης 0,01s. Λήφθηκαν υπόψη και οι 30 ιδιομορφές που έχουν υπολογιστεί. Λόγω του μικρού ποσοστού ιδιομορφικής μάζας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση έχει ληφθεί η διπλάσια τιμή των επιταχύνσεων. Η απόσβεση κάθε ιδιομορφής θεωρείται, όπως και στη δυναμική φασματική ανάλυση 5%. Η διέγερση της βάσης εφαρμόστηκε ως εντολή στο αρχείο Input με το όνομα *Base Motion. Με τη συγκεκριμένη εντολή καθορίζεται ο βαθμός ελευθερίας που απελευθερώνεται στη στήριξη και του εφαρμόζεται η εδαφική επιτάχυνση.

9.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΙΓΙΟΥ

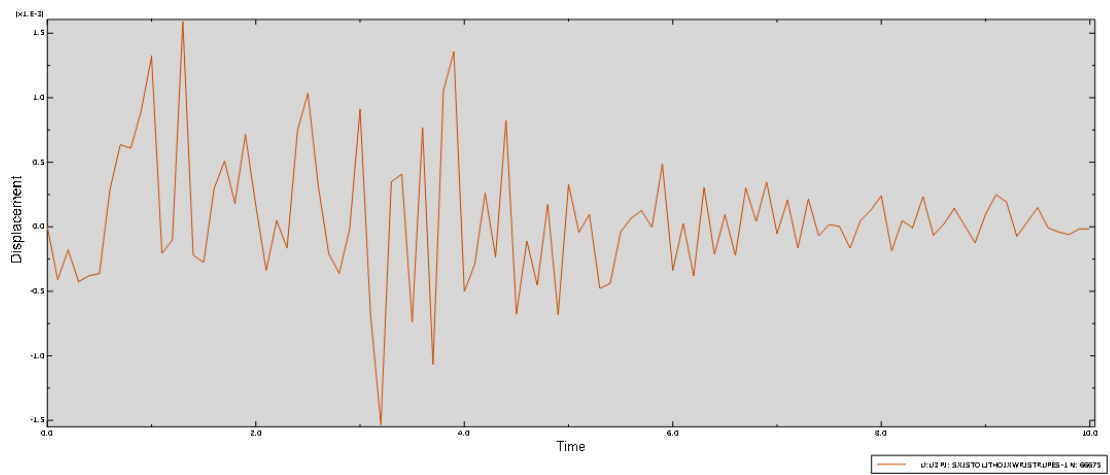
9.2.1 Διαγράμματα χρονοϊστορίας



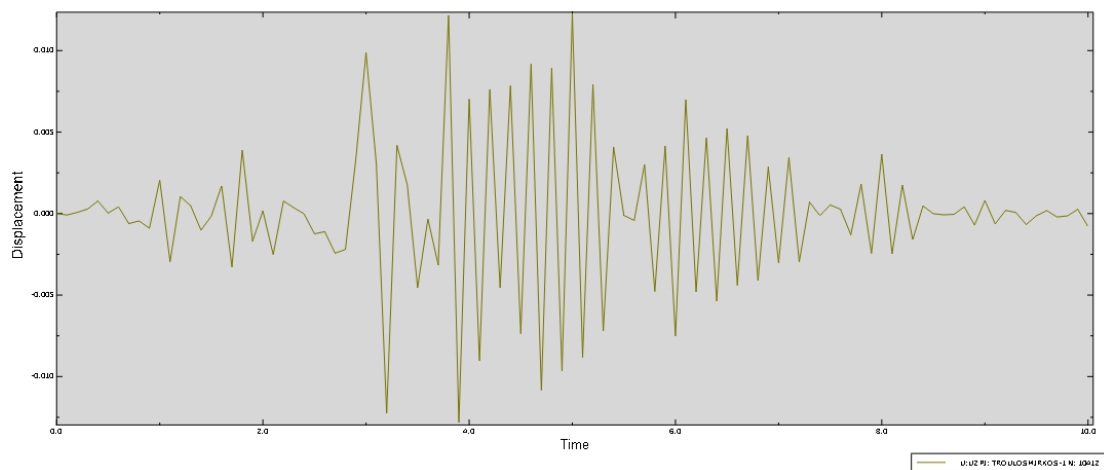
Εικόνα 9.7: Χρονοϊστορία μετατόπισης κατά τη διεύθυνση X στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο τα 2 εκατοστά τη χρονική στιγμή 3.6s.



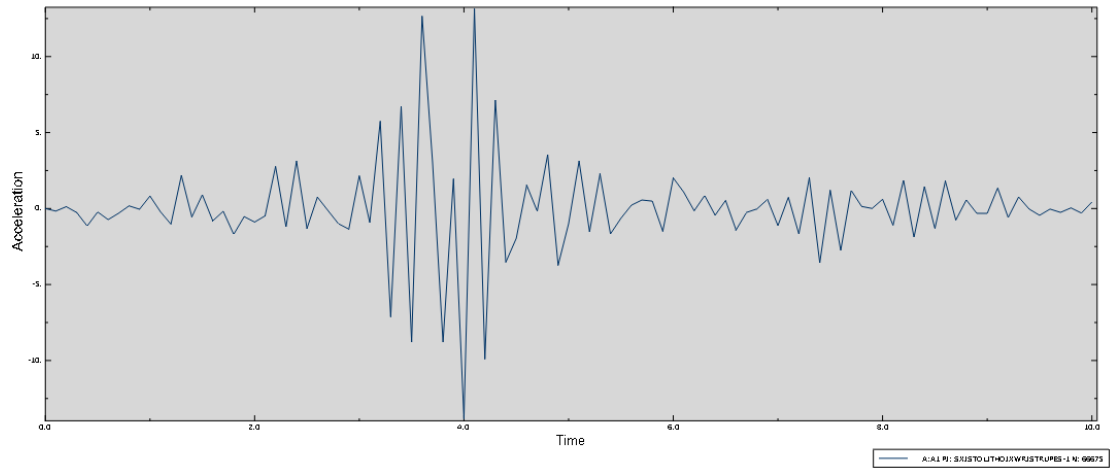
Εικόνα 9.8: Χρονοϊστορία μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Y στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο 1 εκατοστό τη χρονική στιγμή 4.9s.



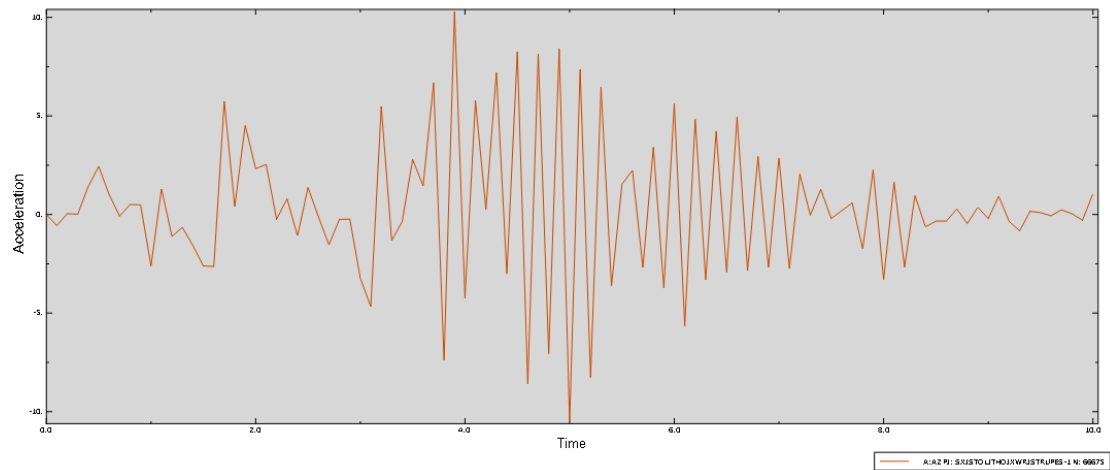
Εικόνα 9.9: Χρονοϊστορία μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Z στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο 1.6 χιλιοστά τη χρονική στιγμή 3.2s.



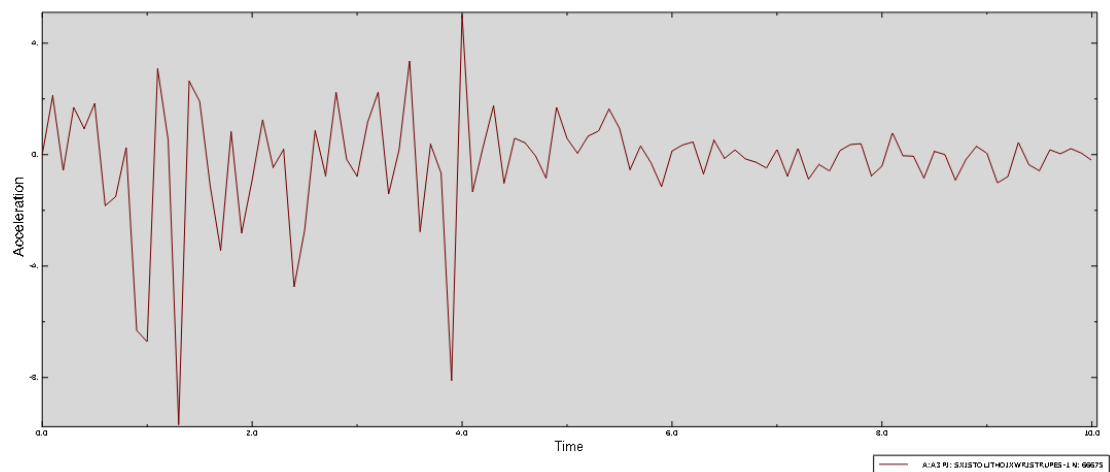
Εικόνα 9.10: Χρονοϊστορία μετατόπισης στην οροφή του ουρανίσκου κατά τη διεύθυνση Y με μέγιστο 1.2 εκατοστά τη χρονική στιγμή 5s.



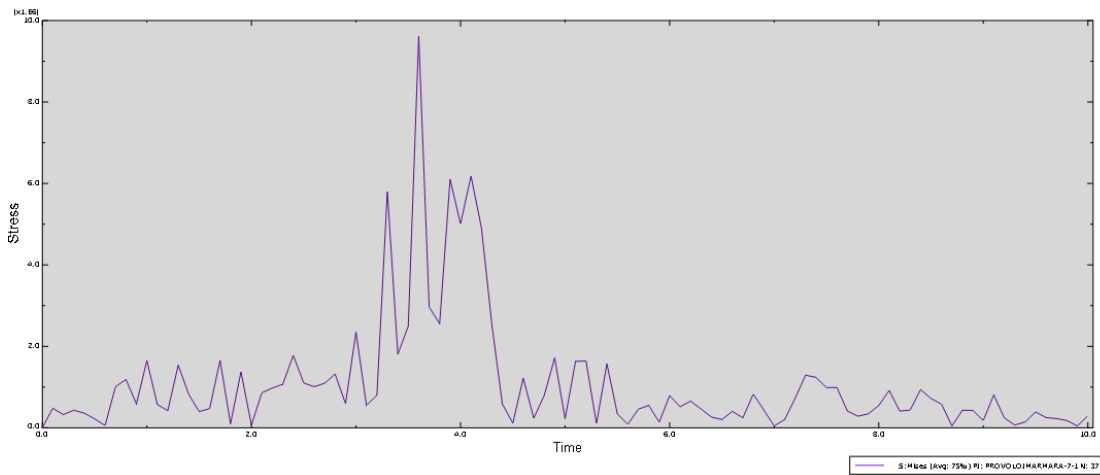
Εικόνα 9.11: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση X στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστη τιμή 13.5m/s^2 τη χρονική στιγμή 4s.



Εικόνα 9.12: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση Y στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστη τιμή 10m/s^2 τη χρονική στιγμή 5s.



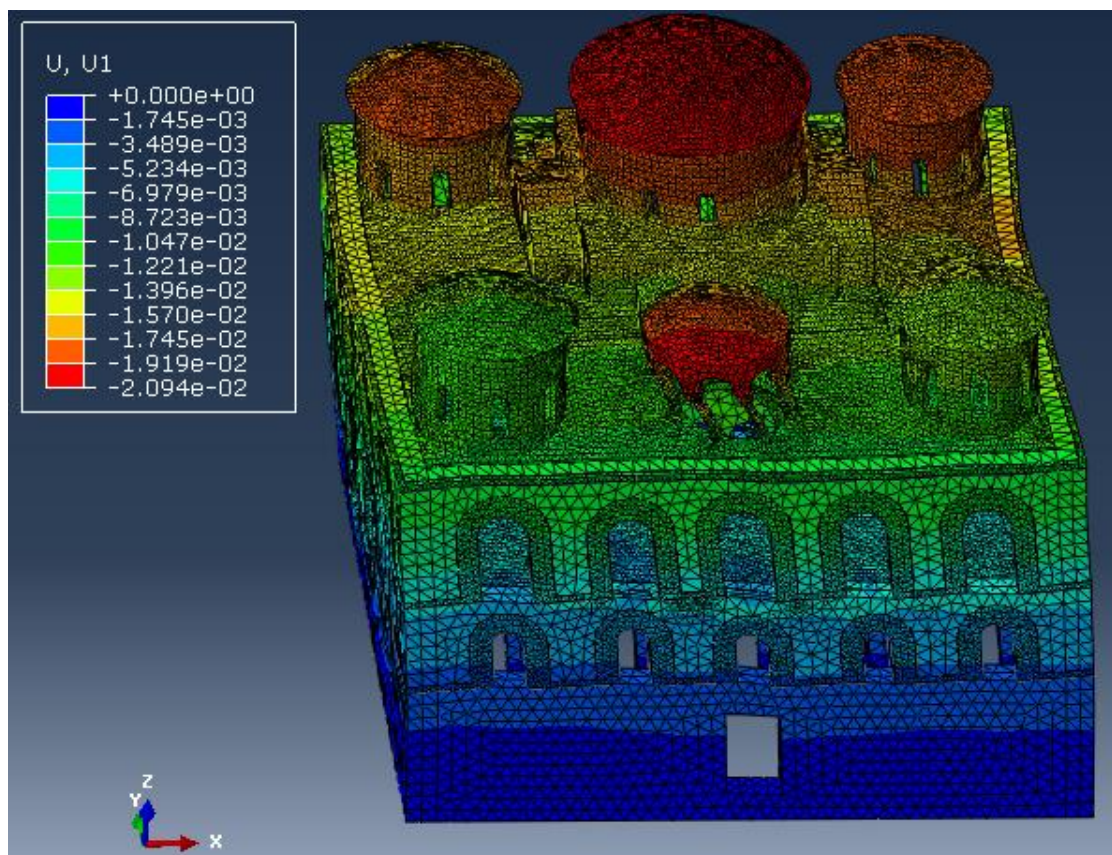
Εικόνα 9.13: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση Z στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο 9.5m/s^2 τη χρονική στιγμή 1.3s.



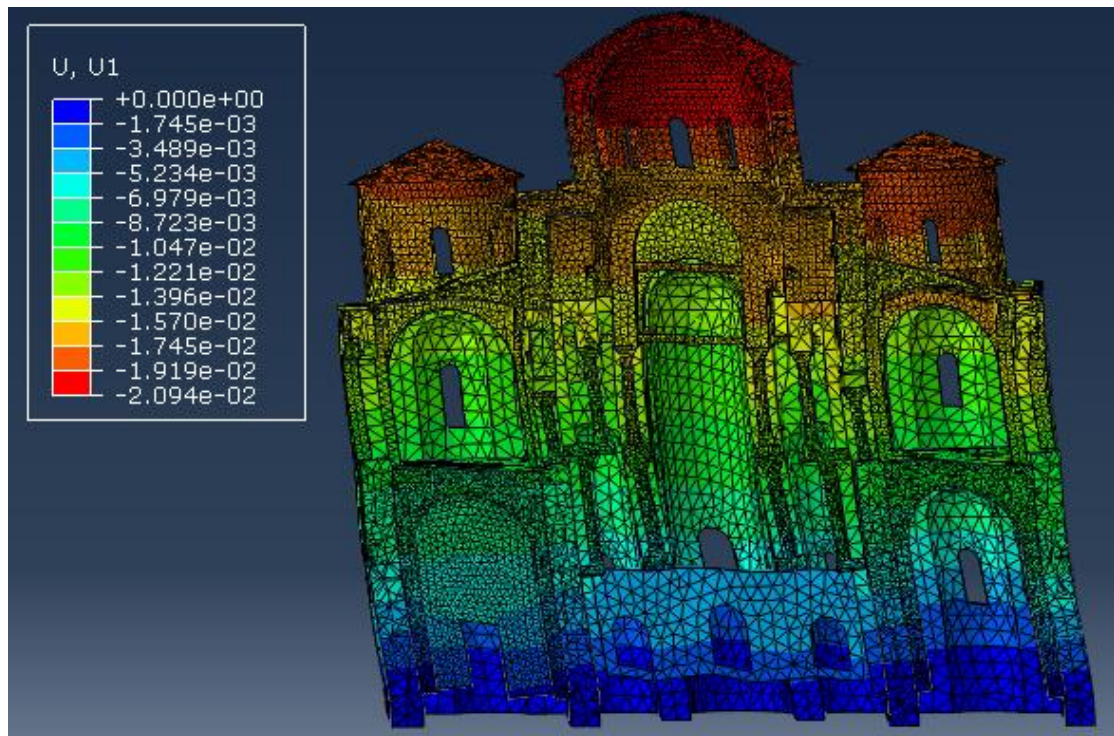
Εικόνα 9.14: Χρονοϊστορία τάσεων Von Mises δυσμενέστερου μαρμάρινου κίονα, που βρίσκεται στη νότια πλευρά, στο άνω μέρος του κορμού. Η μέγιστη τάση φτάνει το 40% της θλιπτικής αντοχής τη χρονική στιγμή 3.6s.

9.3.2 Μέγιστες μετατοπίσεις

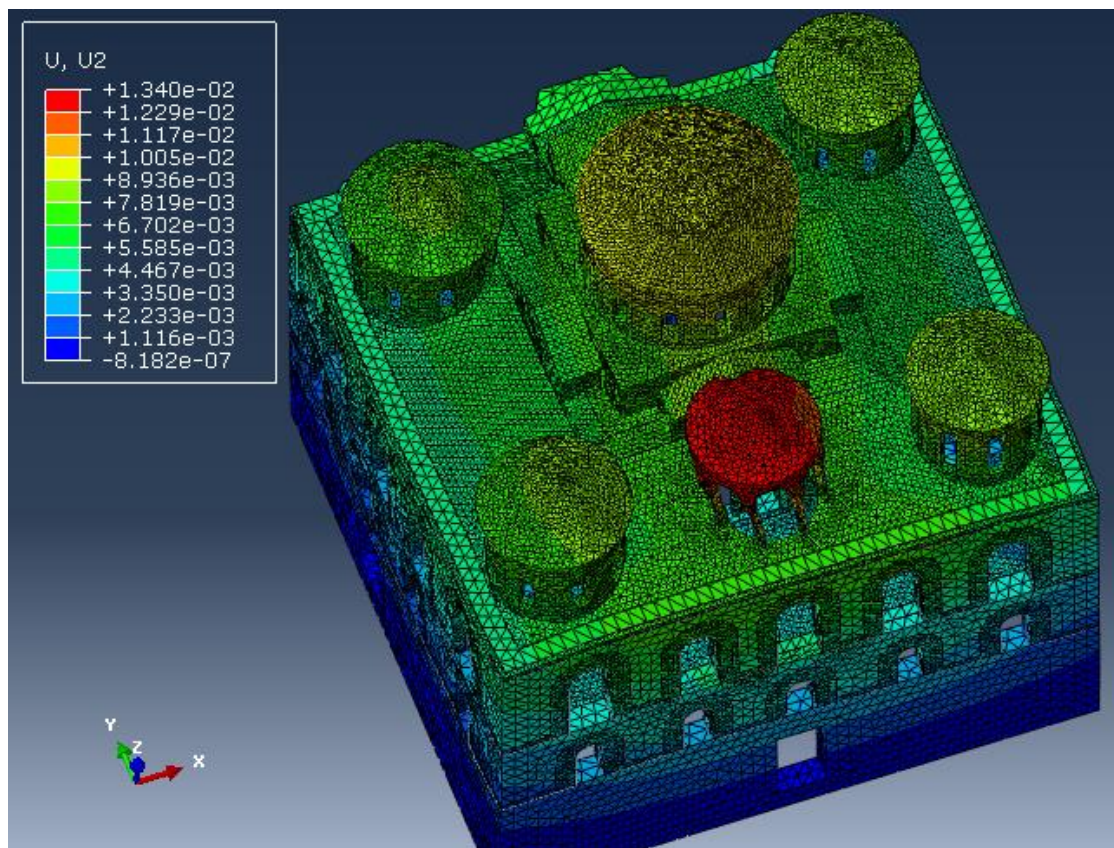
Μέγιστες κατά τη διεύθυνση X είναι οι μετατοπίσεις τη χρονική στιγμή 3.6s όπου ξεπερνούν τα 2 εκατοστά στην οροφή του κεντρικού τρούλου και του ουρανίσκου. Κατά τη διεύθυνση Y γίνονται μέγιστες τη χρονική στιγμή 5s στην οροφή του ανοιχτού ουρανίσκου, όπου φτάνουν τα 1.3 εκατοστά.



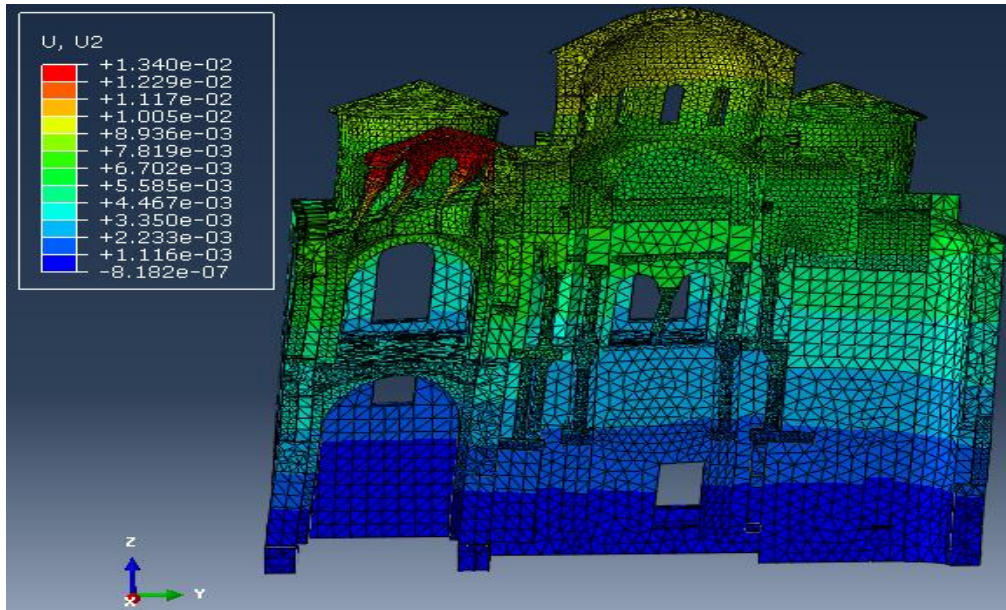
Εικόνα 9.15: Μετατοπίσεις συνολικού φορέα κατά X τη χρονική στιγμή 3.6s



Εικόνα 9.16: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση X στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο XZ τη χρονική στιγμή 3.6s.



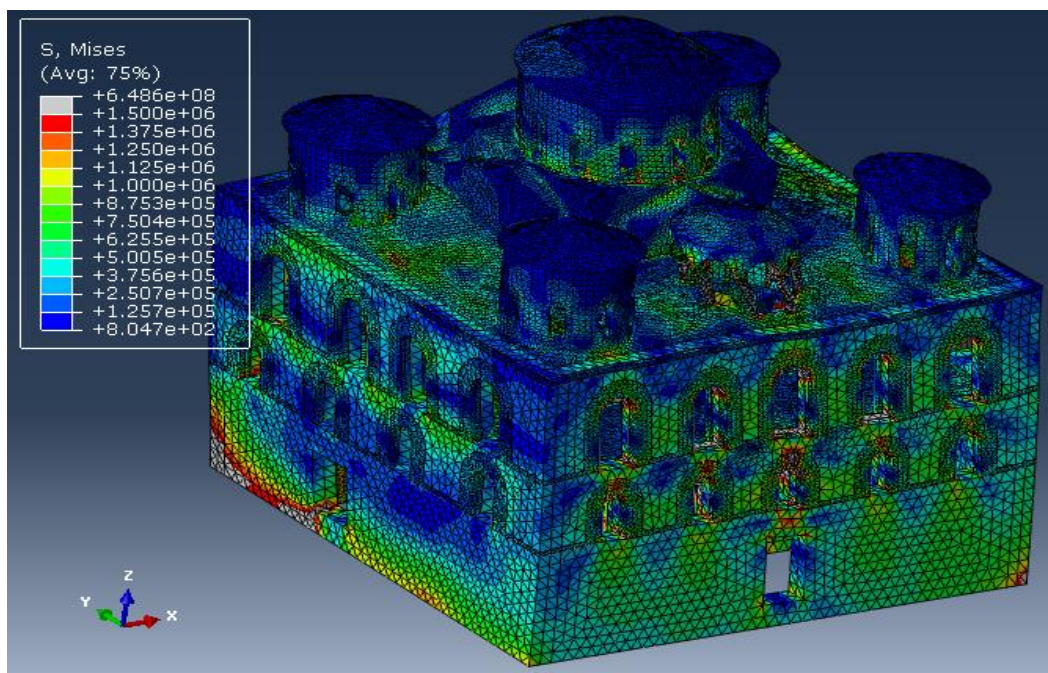
Εικόνα 9.17: Μετατοπίσεις συνολικού φορέα κατά Y τη χρονική στιγμή 5s, στην οροφή του ουρανόσκου παρατηρούνται οι μέγιστες μετακινήσεις κατά Y.



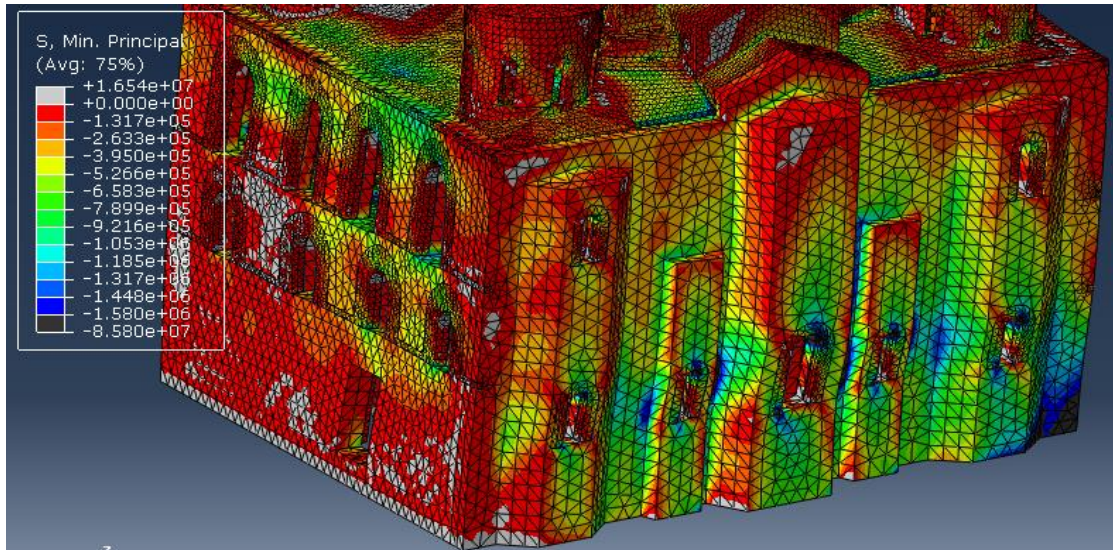
Εικόνα 9.18: Μετατοπίσεις κατά Y στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο YZ τη χρονική στιγμή 5s.

9.3.3 Μέγιστες τάσεις

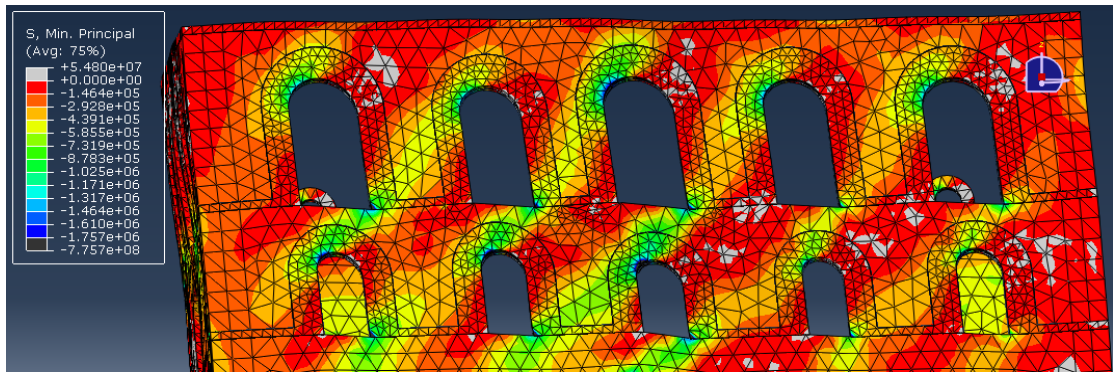
Οι μέγιστες τάσεις παρουσιάζονται στο κτίριο τη χρονική στιγμή 3.6s. Ιδιαίτερα καταπονούμενα στοιχεία είναι ο κεντρικός τρούλος, η δυτική καμάρα που τον στηρίζει, οι οροφές των διαμερισμάτων των παρεκκλησίων, η δυτική και ανατολική πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία, ο δυτικός εσωτερικός τοίχος του κυρίως ναού και ο ανοιχτός ουρανίσκος. Οι τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται στον κεντρικό τρούλο, στη δυτική καμάρα, στα διαμερίσματα των παρεκκλησίων και στον ανοιχτό ουρανίσκο ξεπερνούν τη θλιπτική αντοχή. Στους μαρμαρίνους κίονες οι θλιπτικές τάσεις φτάνουν το 40% της αντοχής και οι εφελκυστικές φτάνουν την εφελκυστική αντοχή.



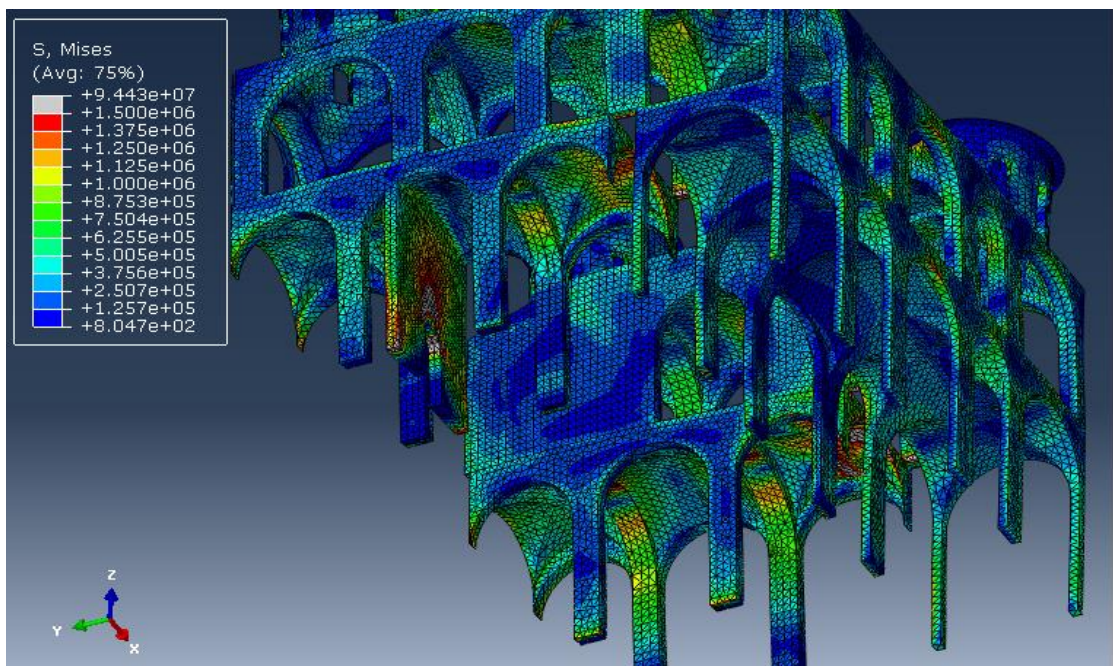
Εικόνα 9.19: Κατανομή τάσεων Von Mises στο συνολικό φορέα.



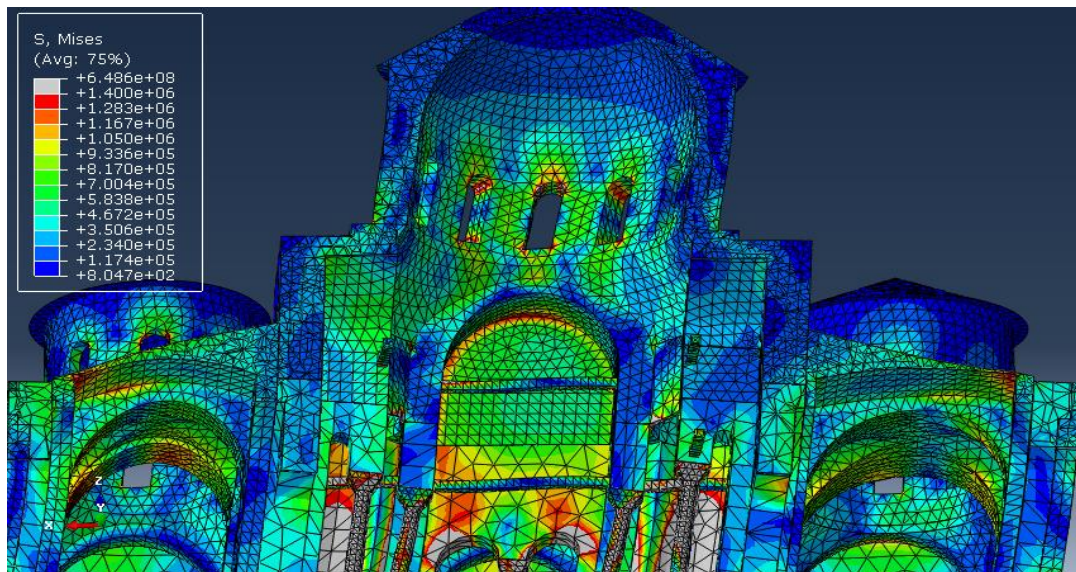
Εικόνα 9.20: Κατανομή θλιπτικών κύριων τάσεων στον ανατολικό και νότιο εξωτερικό τοίχο, φτάνουν 90% αντοχής.



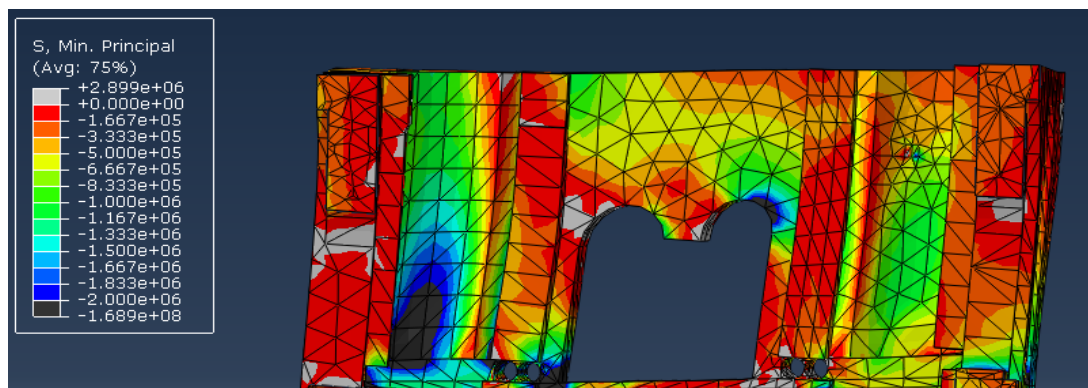
Εικόνα 9.21: Κατανομή θλιπτικών κύριων τάσεων στο δυτικό εξωτερικό τοίχο, φτάνουν 90% αντοχής.



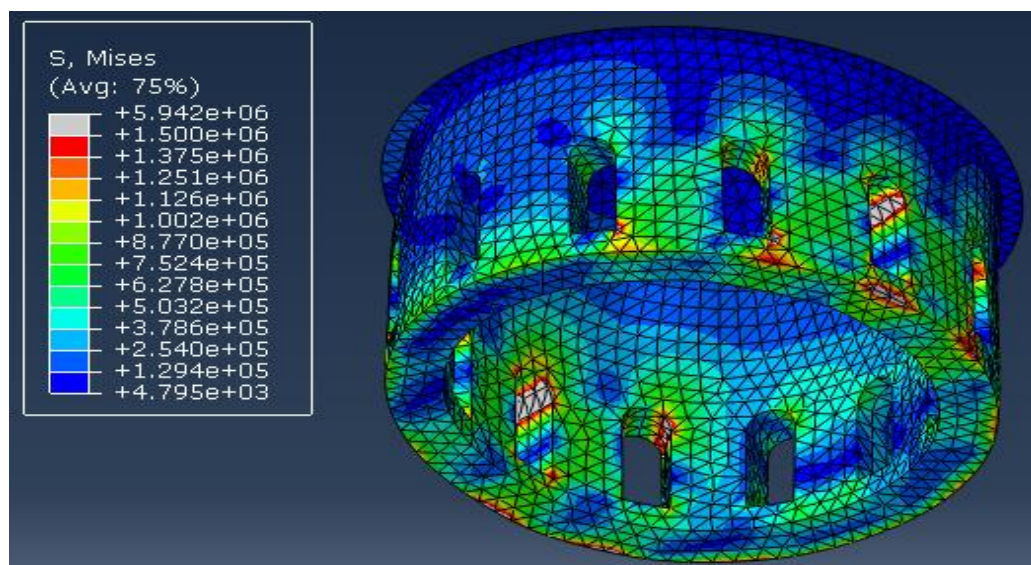
Εικόνα 9.22: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του περιστώου, φτάνουν θλιπτική αντοχή στα διαμερίσματα των παρεκκλησίων.



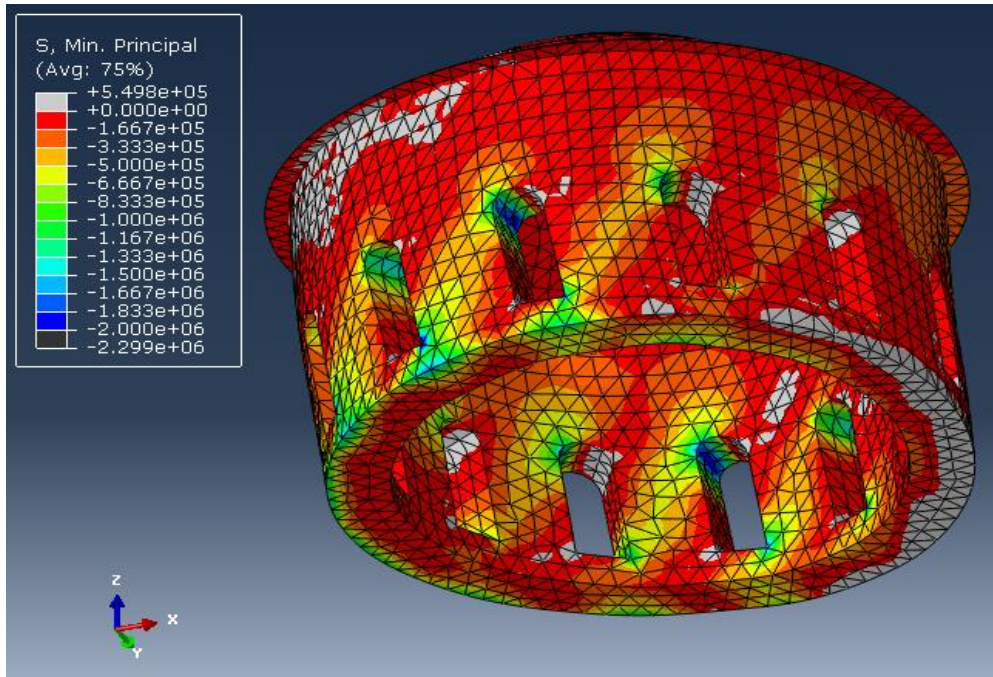
Εικόνα 9.23: Κατανομή τάσεων Von Mises στη δυτική πλευρά του εσωτερικού του κτιρίου. Στο άνω μέρος της δυτικής καμάρας του κυρίως ναού οι τάσεις φτάνουν σχεδόν την θλιπτική αντοχή.



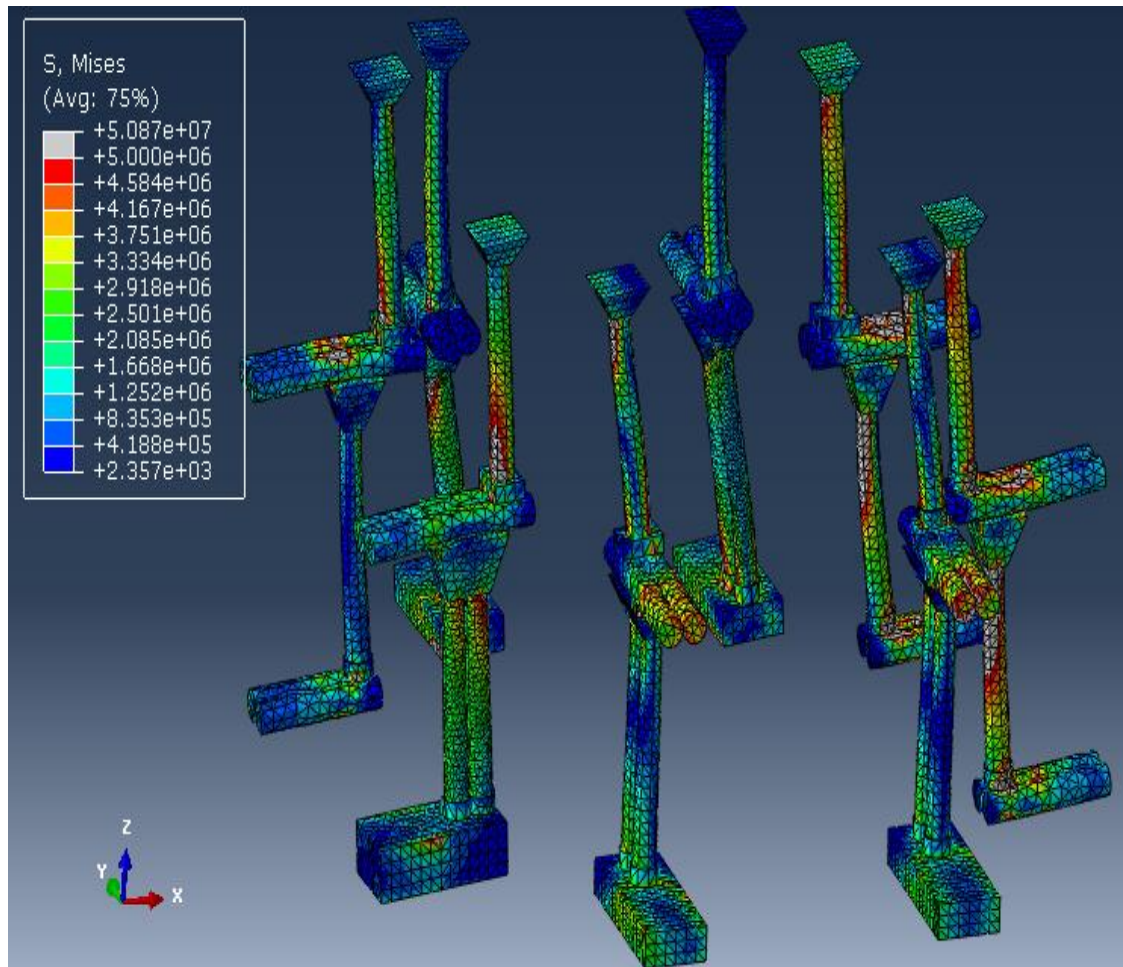
Εικόνα 9.24: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στο άνω μέρος της δυτικής τοιχοποιίας του κυρίως ναού, φτάνουν 80% αντοχής.



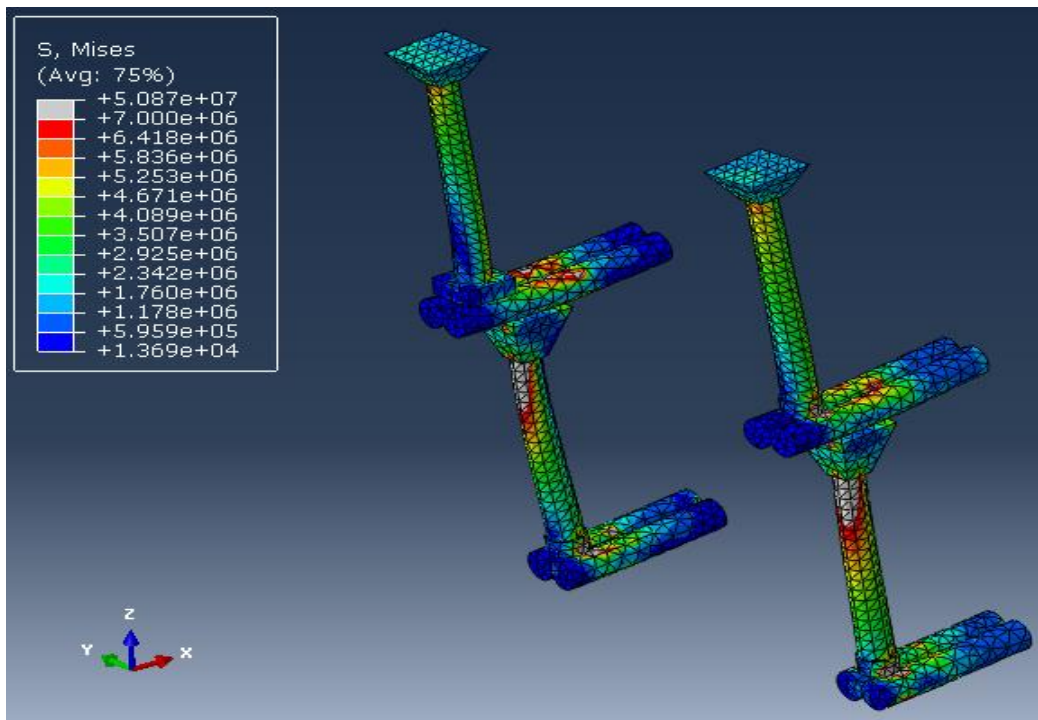
Εικόνα 9.25: Κατανομή τάσεων Von Mises στον κεντρικό τρούλο, ξεπερνούν θλιπτική αντοχή κατά 1.3 MPa.



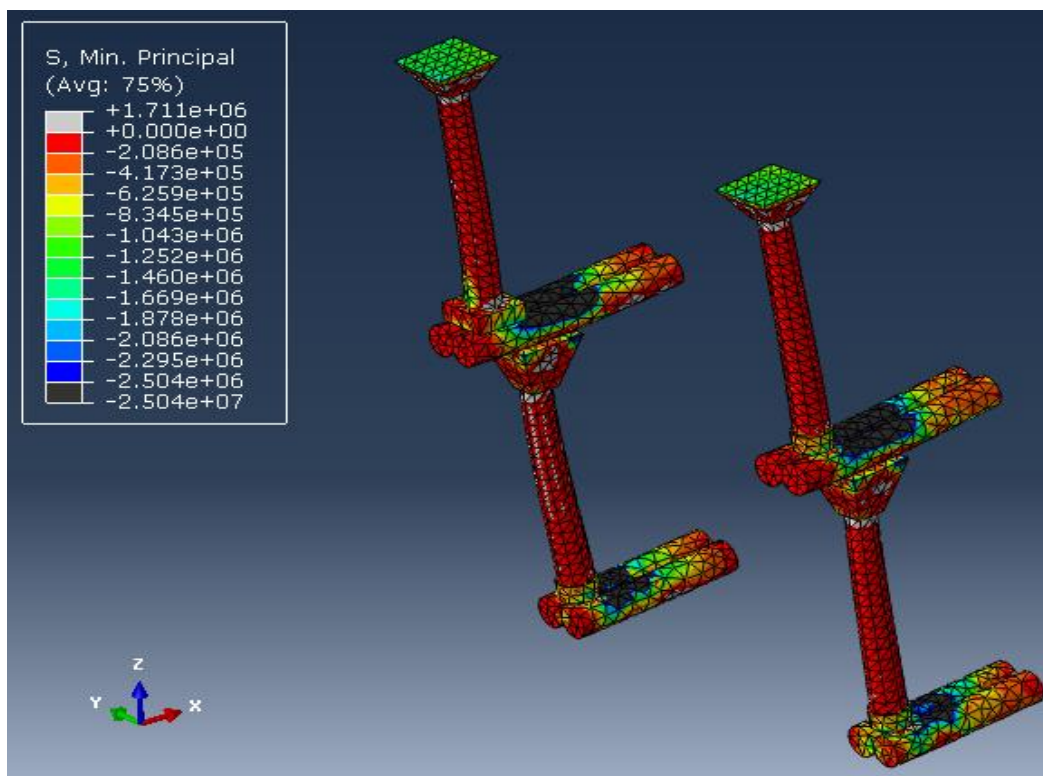
Εικόνα 9.26: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στον κεντρικό τρούλο, ξεπερνούν θλιπτική αντοχή κατά 0.8 MPa.



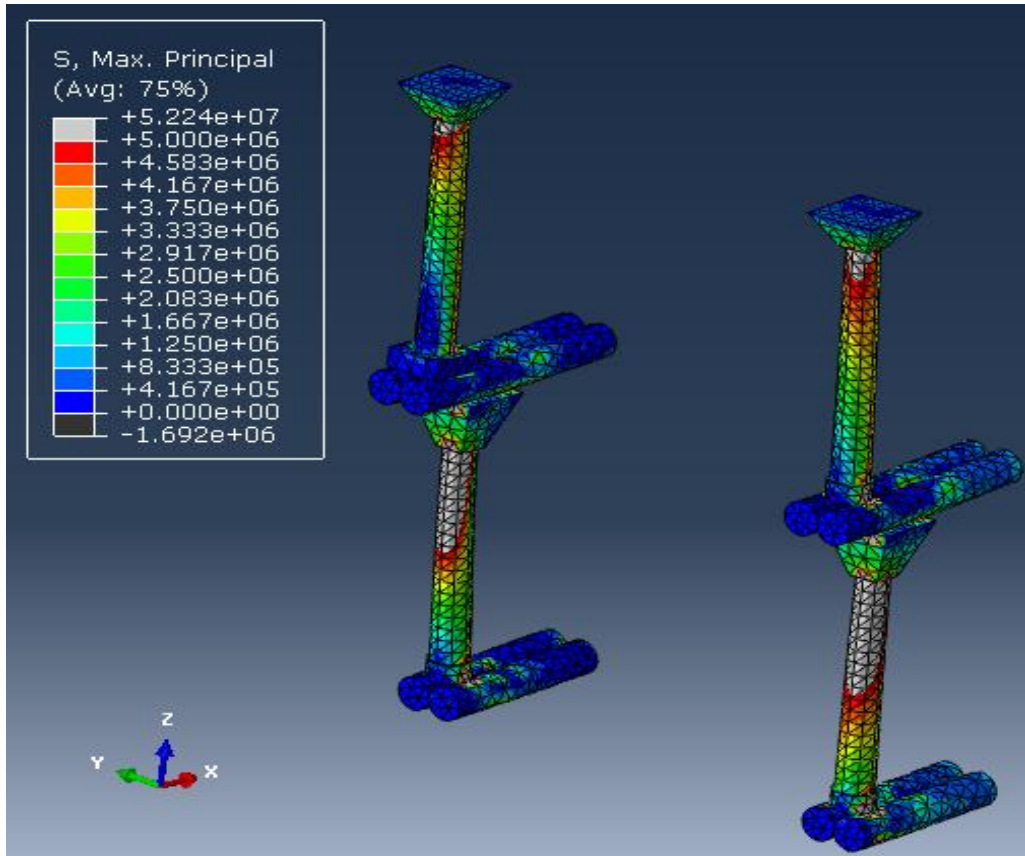
Εικόνα 9.27: Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμαρίνους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.



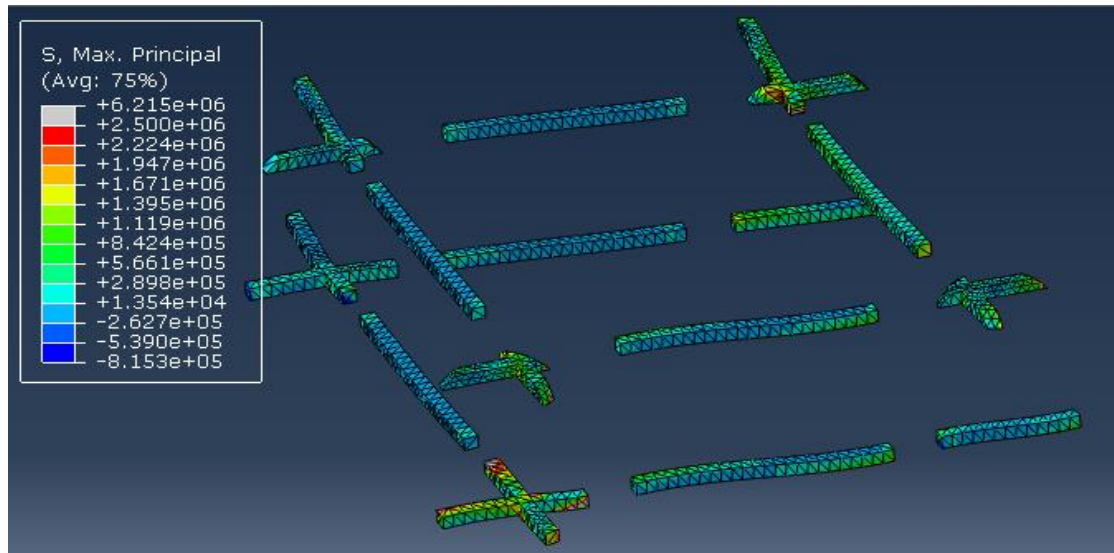
Εικόνα 9.28: Κατανομή τάσεων Von Mises στο ζεύγος των μαρμάρινων κίονων της νότιας πλευράς στο άνω μέρος των κάτω κίονων και στους πάνω οριζόντιους προβόλους φτάνουν 40% θλιπτικής αντοχής.



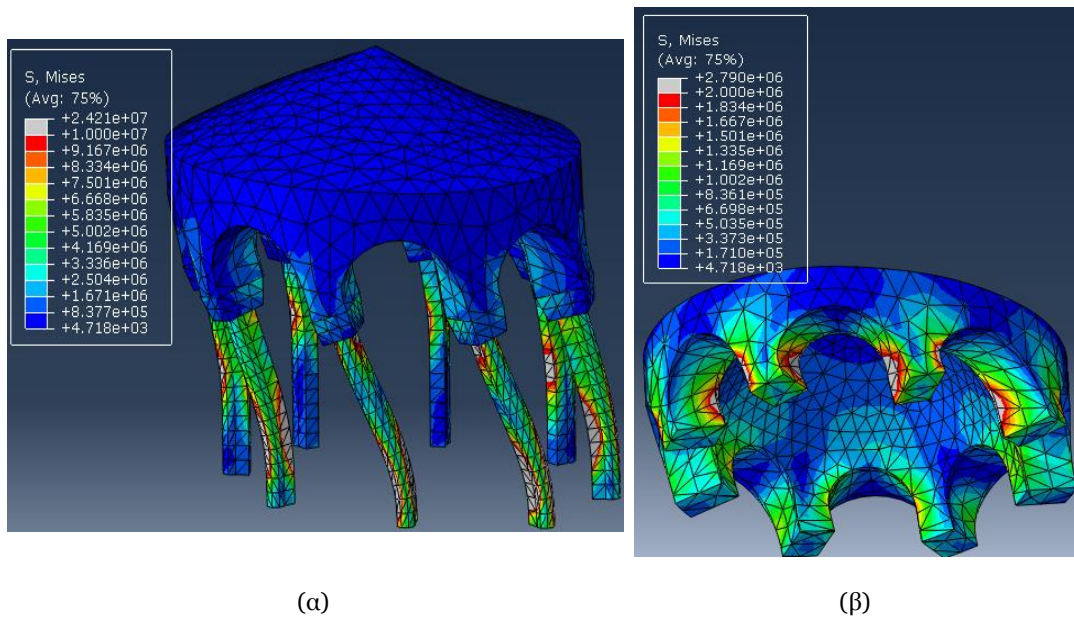
Εικόνα 9.29: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στους μαρμάρινους κίονες της νότιας πλευράς, φτάνουν 35% θλιπτικής αντοχής στους οριζόντιους προβόλους.



Εικόνα 9.30: Κατανομή κύριων εφελκυστικών τάσεων στους μαρμάρινους κίονες της νότιας πλευράς. Φτάνουν εφελκυστική αντοχή μαρμάρου.



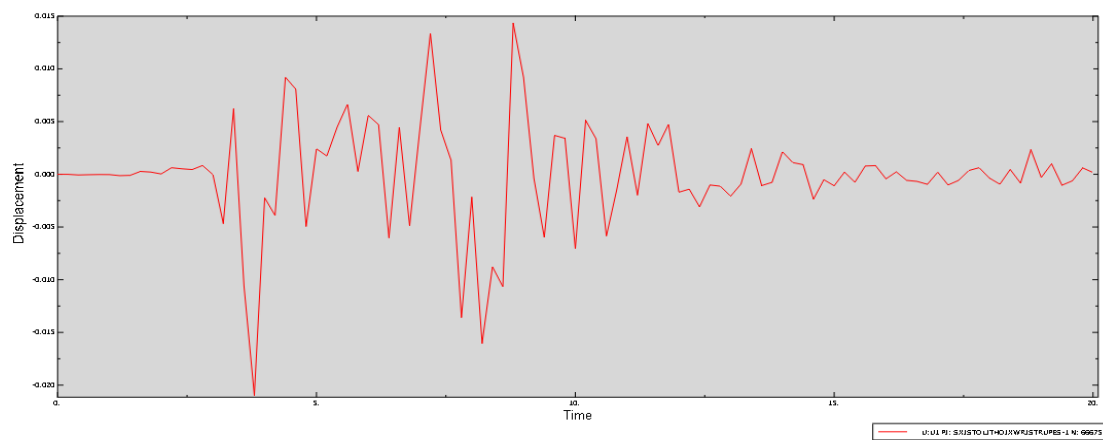
Εικόνα 9.31: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων στους ξύλινους ελκυστήρες, οι εφελκυστικές φτάνουν το 75% εφελκυστικής αντοχής.



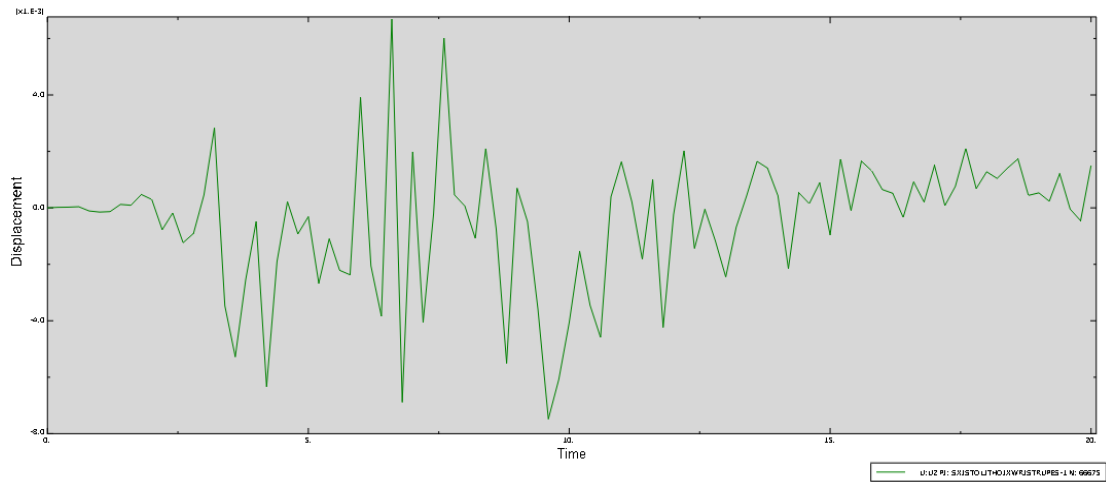
Εικόνα 9.32: (α) Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμαρίνους κίονες που στηρίζουν τον ανοιχτό ουρανίσκο, σχεδόν φτάνουν θλιπτική αντοχή μαρμάρου. (β) Κατανομή τάσεων Von Mises στο κέλυφος του ουρανίσκου, ξεπερνούν θλιπτική αντοχή κατά 1.8MPa.

9.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ

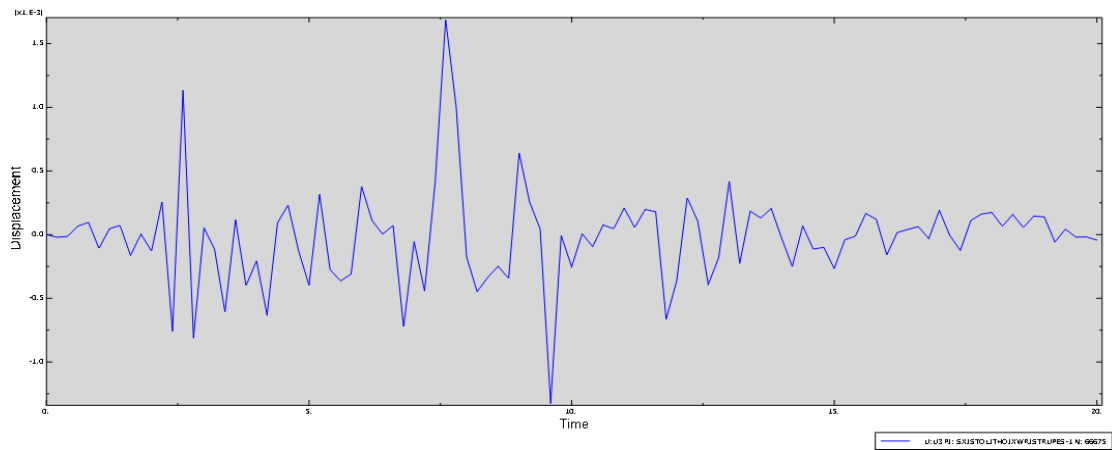
9.3.1 Διαγράμματα χρονοϊστορίας



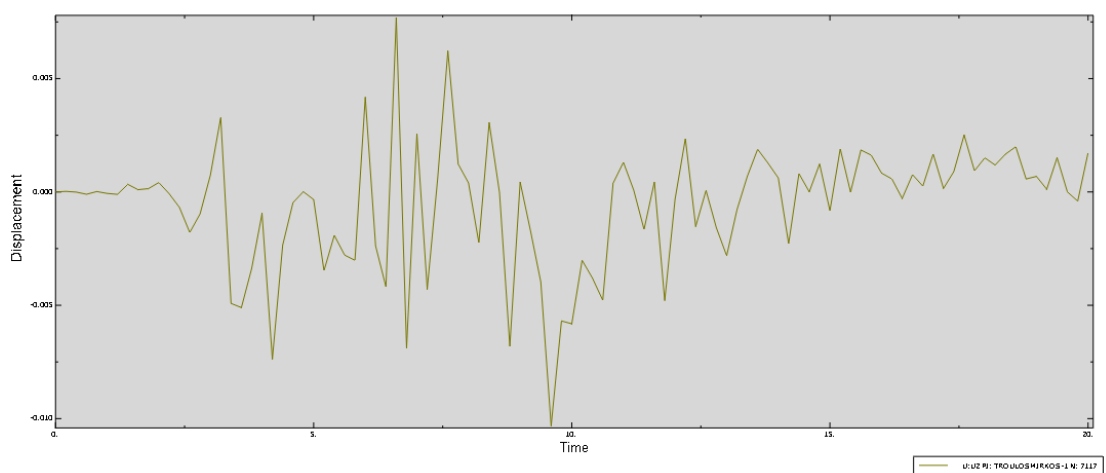
Εικόνα 9.33: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση X στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο που ξεπερνά τα 2 εκατοστά τη χρονική στιγμή 3.8s.



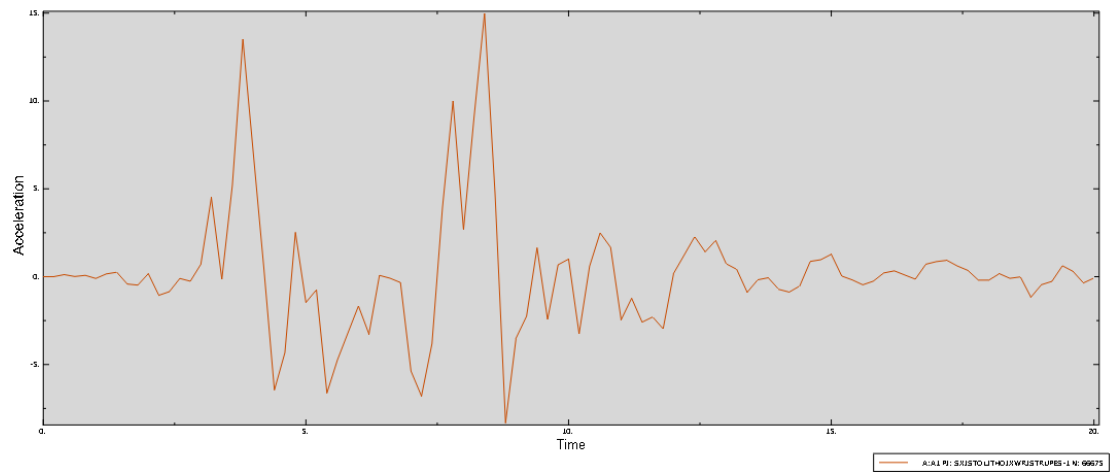
Εικόνα 9.34: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά την Y διεύθυνση στην οροφή του κεντρικού τρούλου που φτάνει τα 8 χιλιοστά τη χρονική στιγμή 9.6s.



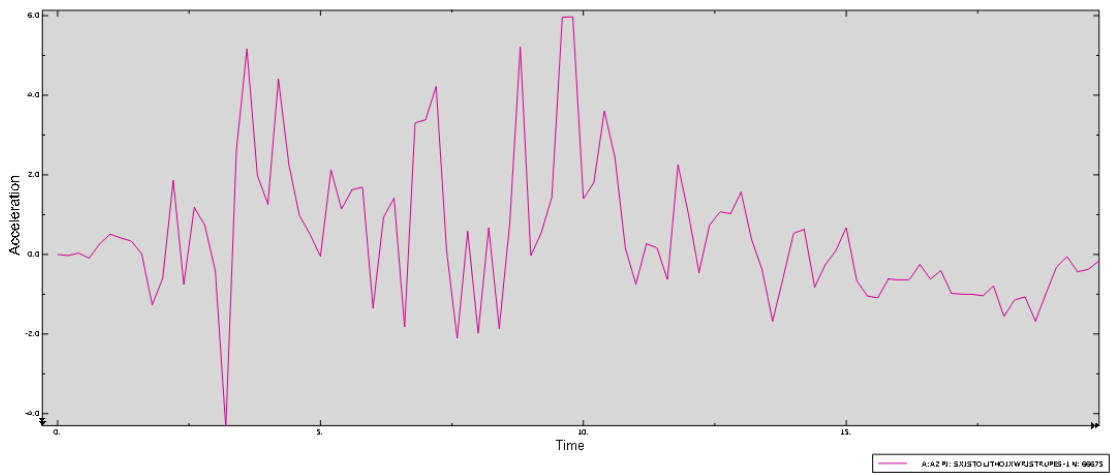
Εικόνα 9.35: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στην οροφή του κεντρικού τρούλου που ξεπερνά τα 1.5 χιλιοστά, τη χρονική στιγμή 7.5s.



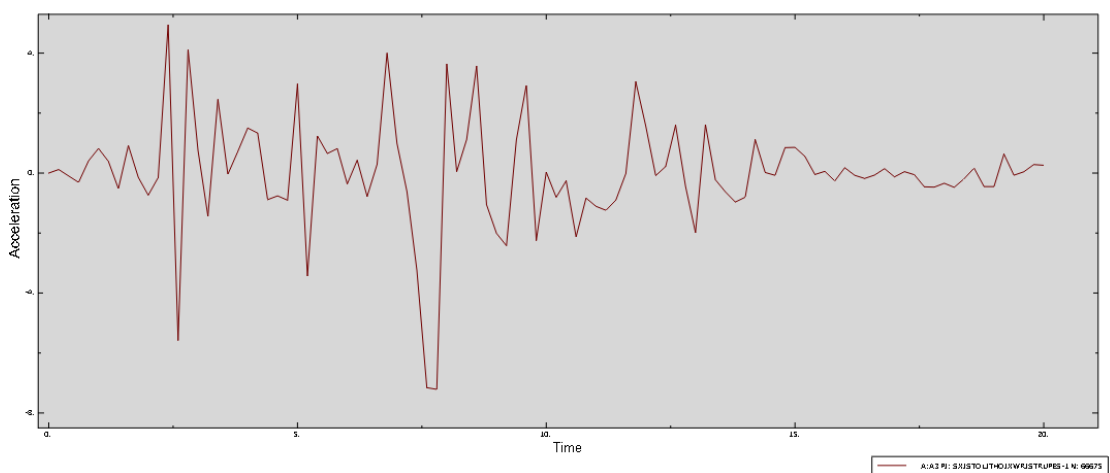
Εικόνα 9.36: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση Y στην οροφή του ουρανίσκου που ξεπερνά το 1 εκατοστό τη χρονική στιγμή 9.6s.



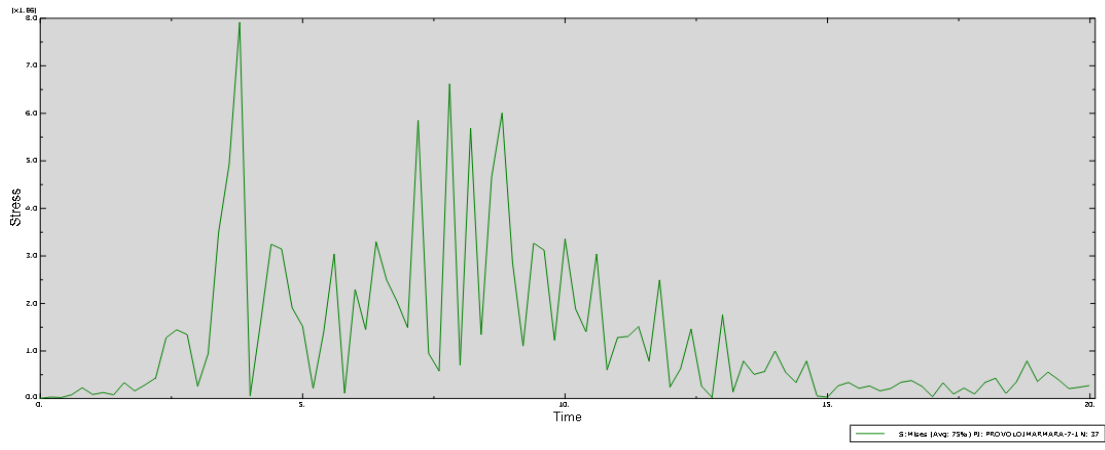
Εικόνα 9.37: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων κατά τη διεύθυνση X στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο 15m/s^2 τη χρονική στιγμή 8.4s.



Εικόνα 9.38: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων κατά τη διεύθυνση Y στην οροφή του κεντρικού τρούλου με μέγιστο 6m/s^2 τη χρονική στιγμή 9.6s.



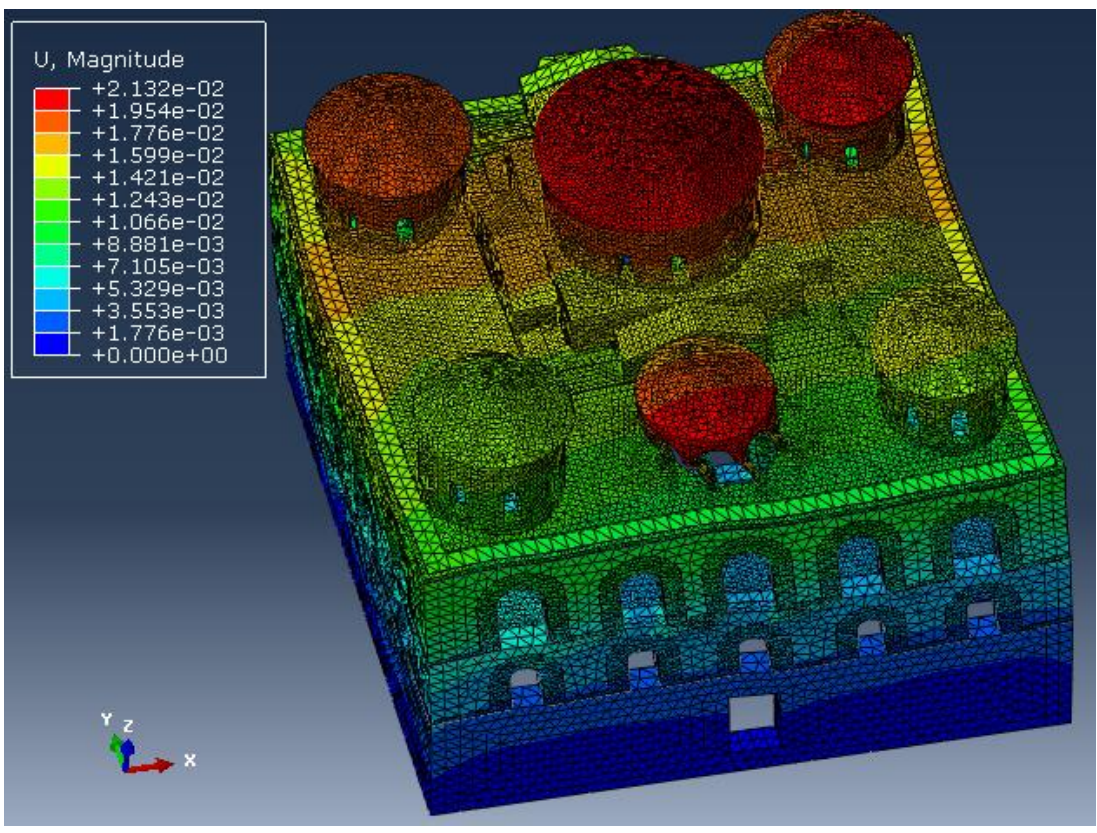
Εικόνα 9.39: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με μέγιστο 7m/s^2 τη χρονική στιγμή 7.6s.



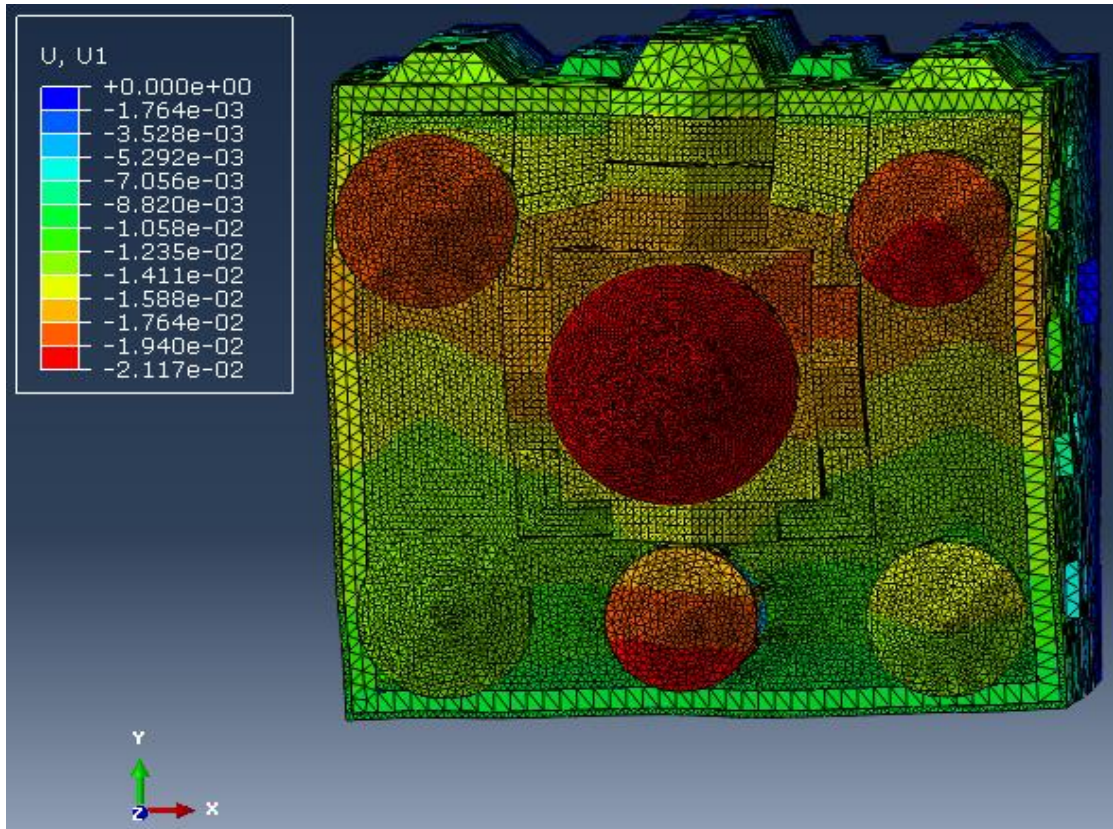
Εικόνα 9.40: Χρονοϊστορία τάσεων Von Mises δυσμενέστερου νότιου μαρμάρινου κίονα στο άνω μέρος του κορμού του. Η μέγιστη τιμή φτάνει το 35% της θλιπτικής αντοχής, τη χρονική στιγμή 3.8s.

9.3.2 Μέγιστες μετατοπίσεις

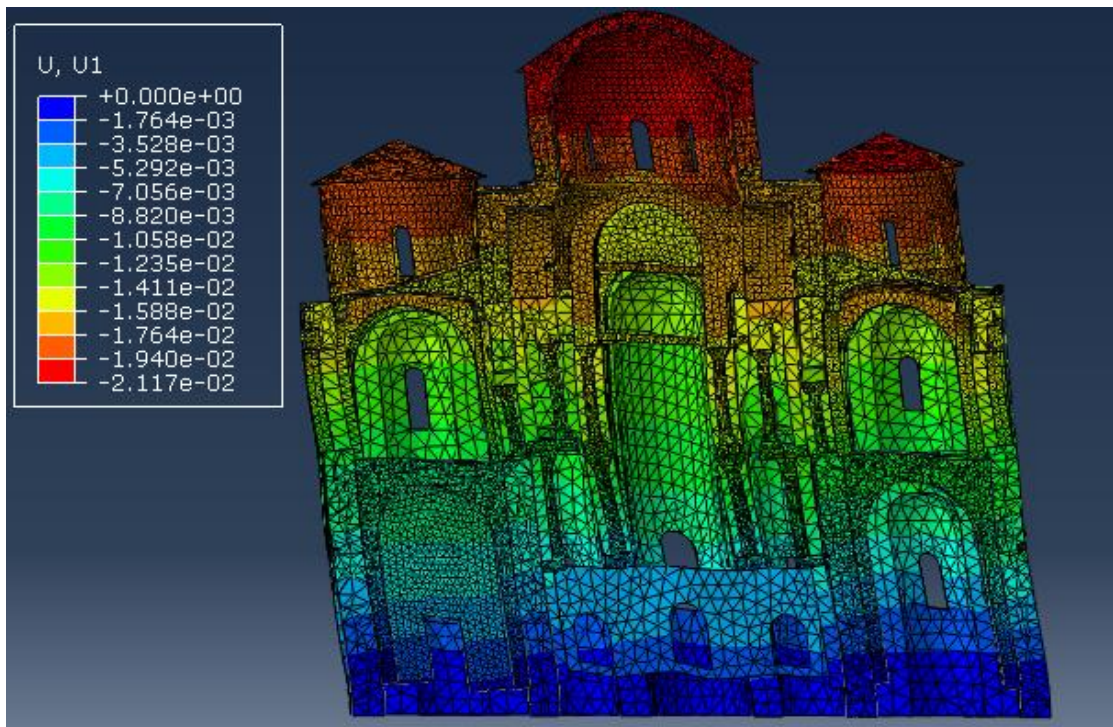
Οι μετατοπίσεις γίνονται μέγιστες κατά τη διαμήκη διεύθυνση τη χρονική στιγμή 3.8s και ξεπερνούν τα 2 εκατοστά στις οροφές του κεντρικού τρούλου και του ουρανίσκου, ενώ κατά την εγκάρσια τη χρονική στιγμή 9.6s, όπου στην οροφή του ουρανίσκου φτάνουν το ένα εκατοστό.



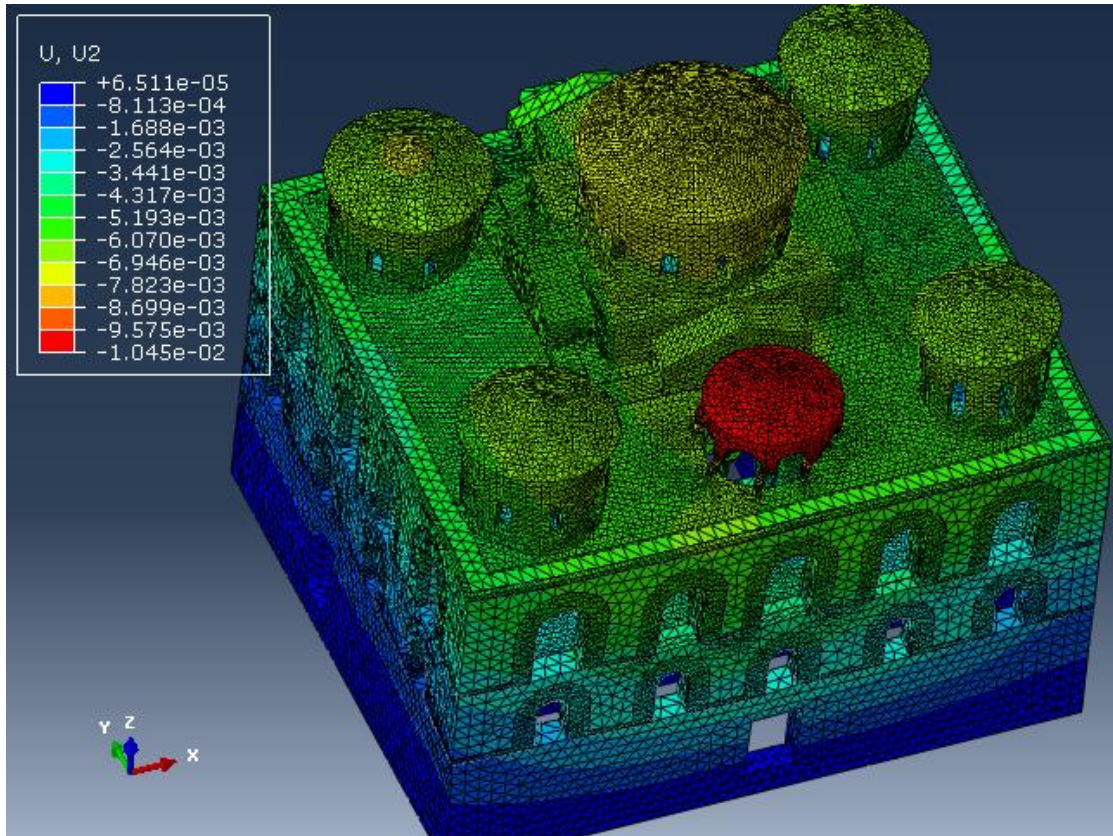
Εικόνα 9.41: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα τη χρονική στιγμή 3.8s.



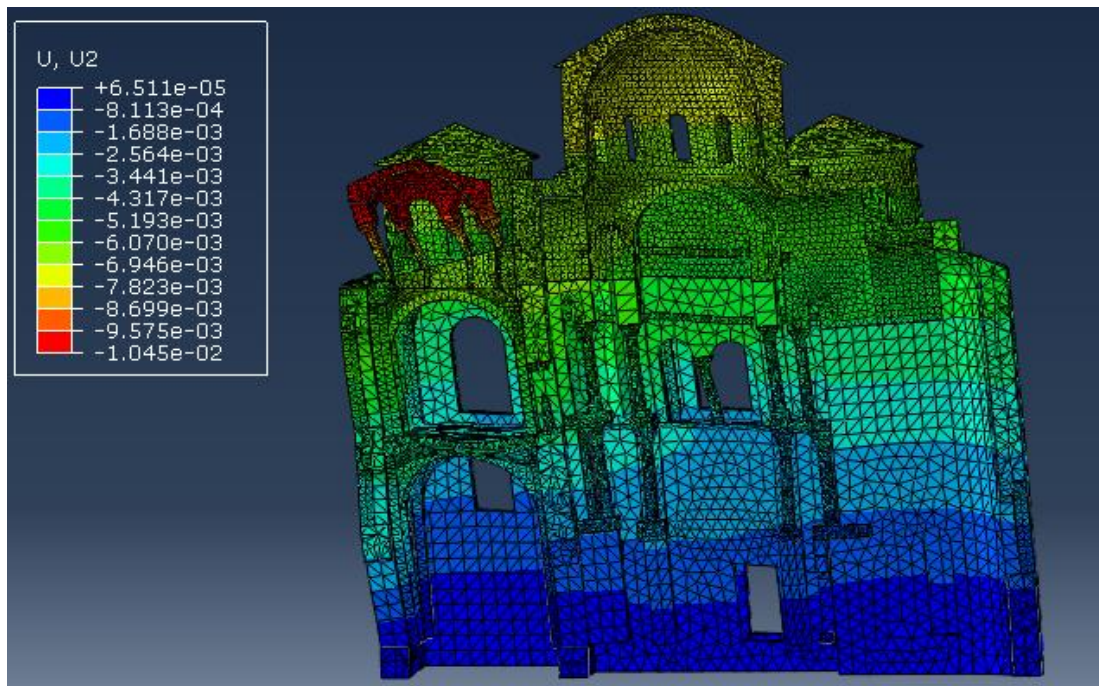
Εικόνα 9.42: Μετακίνηση κατά τη διεύθυνση X τη χρονική στιγμή 3.8s στο επίπεδο XY.



Εικόνα 9.43: Μετακίνηση κατά τη διεύθυνση X στο εσωτερικό του κτιρίου στο επίπεδο XZ τη χρονική στιγμή 3.8s.



Εικόνα 9.44: Μετακινήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση Y τη χρονική στιγμή 9.6s.

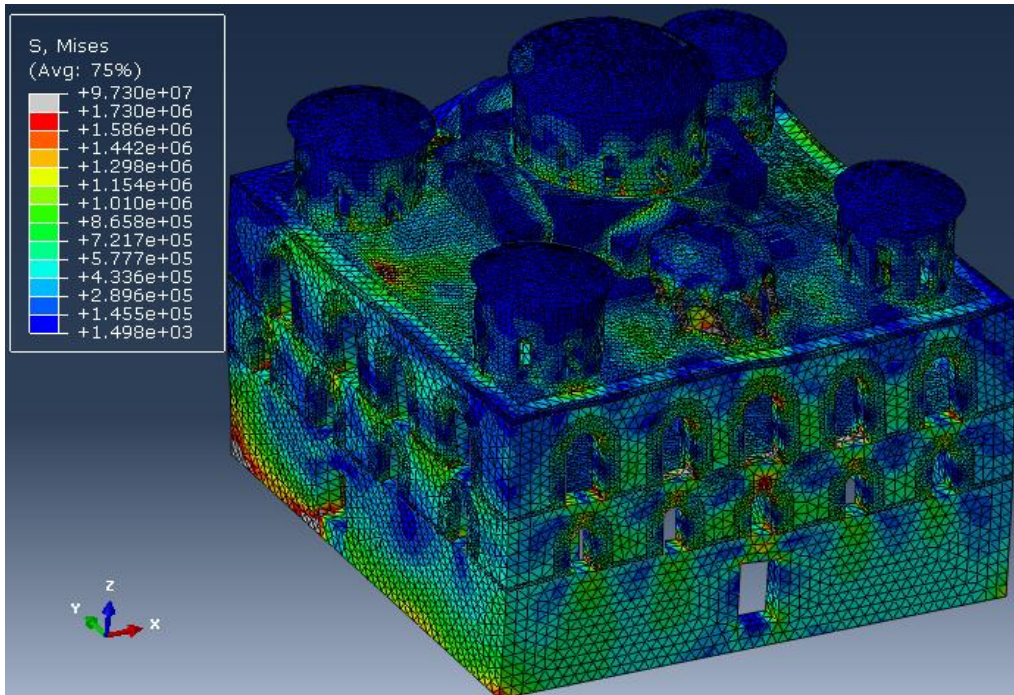


Εικόνα 9.45: Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση Y στο εσωτερικό του κτιρίου τη χρονική στιγμή 9.6s.

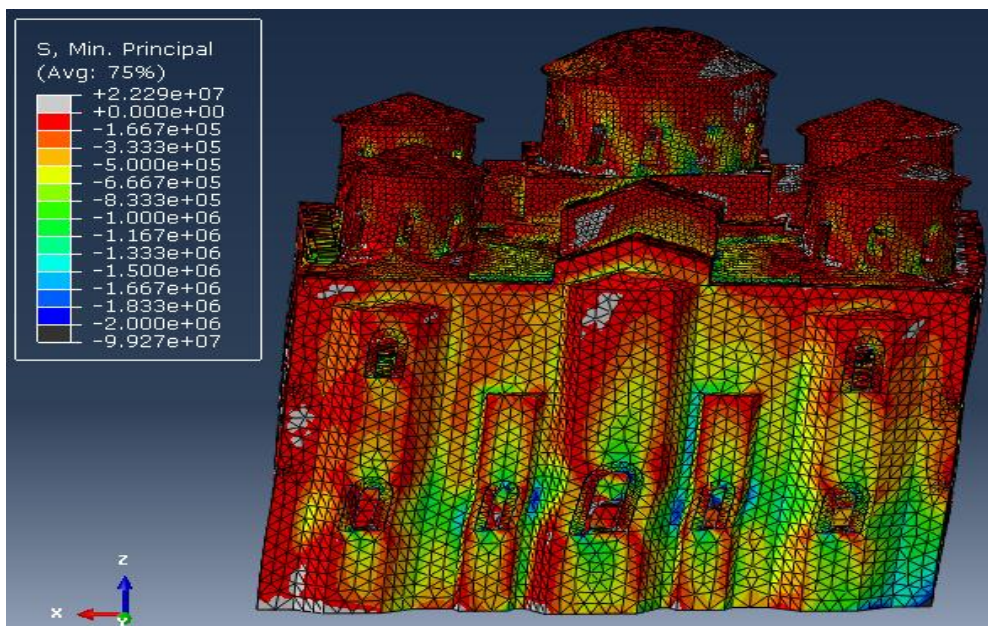
9.3.3 Μέγιστες τάσεις

Η περίπτωση του σεισμού της Λευκάδας είναι δυσμενέστερη. Μέγιστες τάσεις παρουσιάζονται τη χρονική στιγμή 3.8s. Ιδιαίτερα καταπονούμενα στοιχεία είναι ο κεντρικός τρούλος, η δυτική καμάρα που τον στηρίζει, η ανατολική

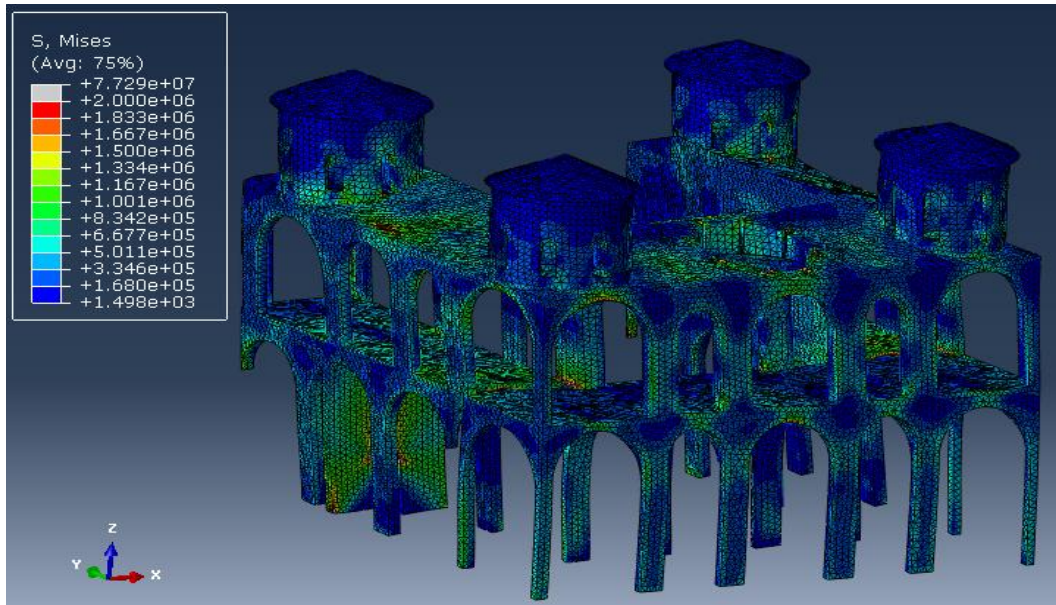
τοιχοποιία, τα διαμερίσματα των παρεκκλησίων και του γυναικωνίτη, η εσωτερική δυτική τοιχοποιία του κυρίως ναού και ο ουρανίσκος. Στον κεντρικό τρούλο, στη δυτική καμάρα, στην ανατολική τοιχοποιία, στα διαμερίσματα των παρεκκλησίων, καθώς και στο κέλυφος του ουρανίσκου και των μαρμάρινων κίωνων που τον στηρίζουν οι τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν τη θλιπτική αντοχή. Στους μαρμάρινους κίονες οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται δεν φτάνουν το 40% της θλιπτικής αντοχής, αλλά οι εφελκυστικές φτάνουν την εφελκυστική αντοχή.



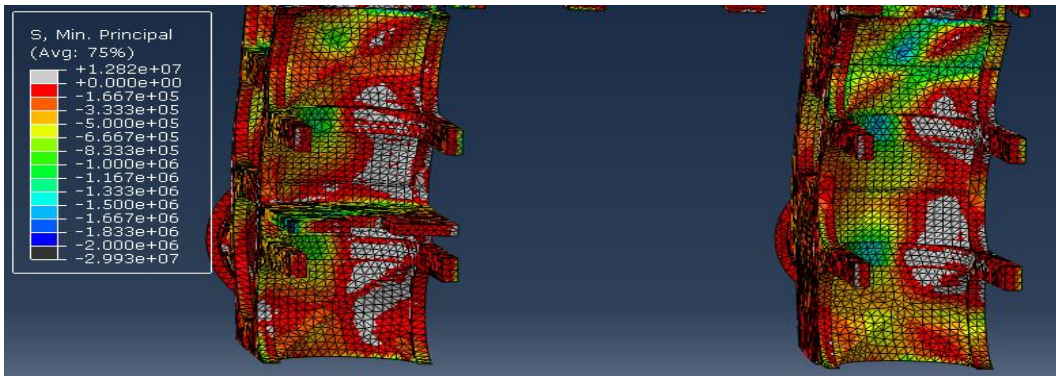
Εικόνα 9.46: Κατανομή τάσεων Von Mises στο συνολικό φορέα.



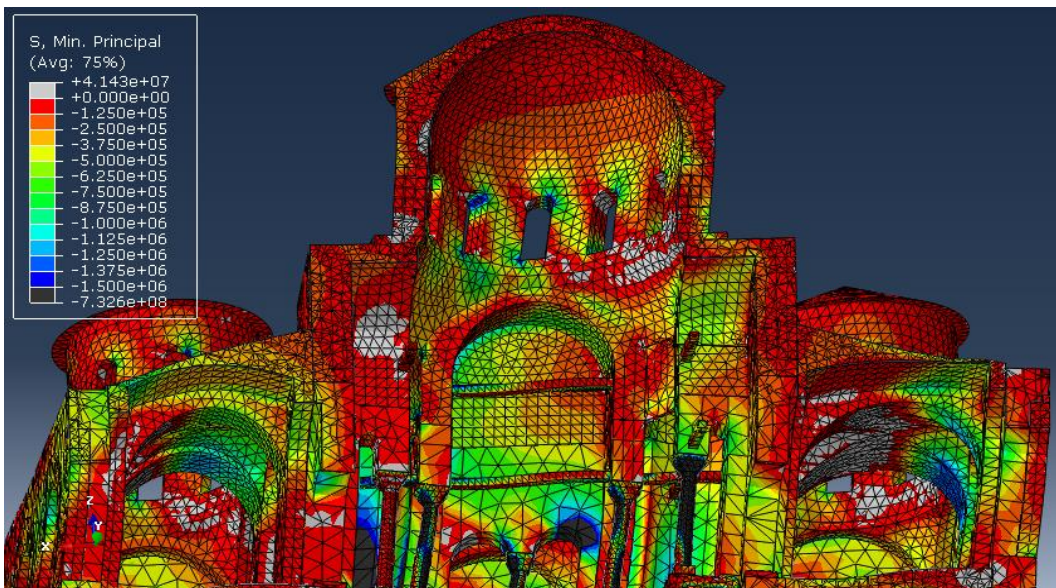
Εικόνα 9.47: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στην ανατολική τοιχοποιία που φτάνουν την θλιπτική αντοχή.



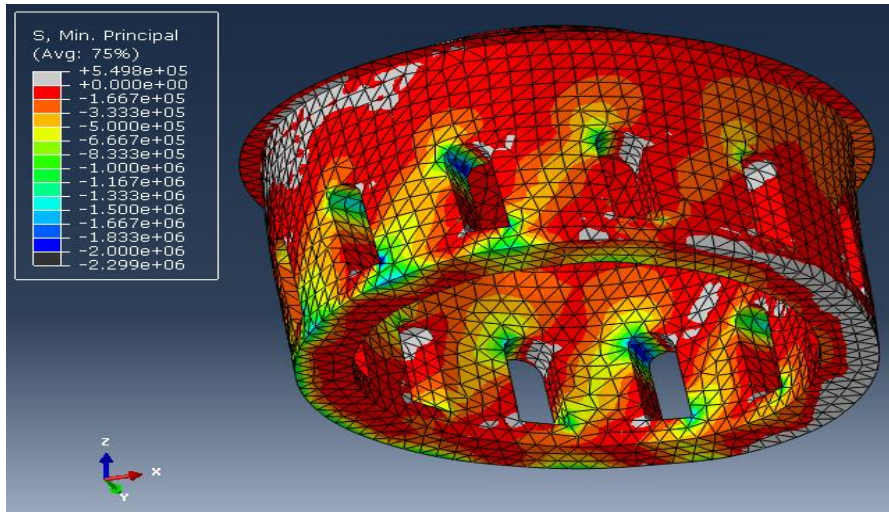
Εικόνα 9.48: Κατανομή τάσεων Von Mises στα διαμερίσματα του περιστώου.



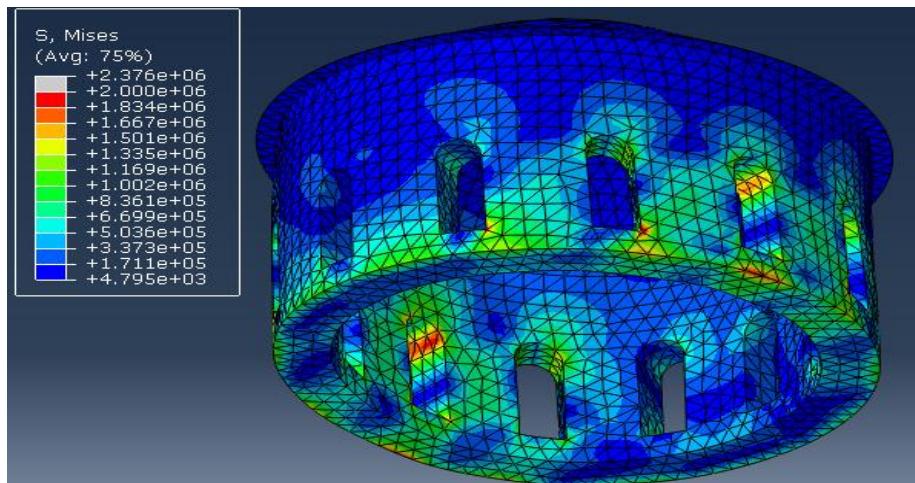
Εικόνα 9.49: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στα διαμερίσματα των παρεκκλησίων, ξεπερνούν την θλιπτική αντοχή.



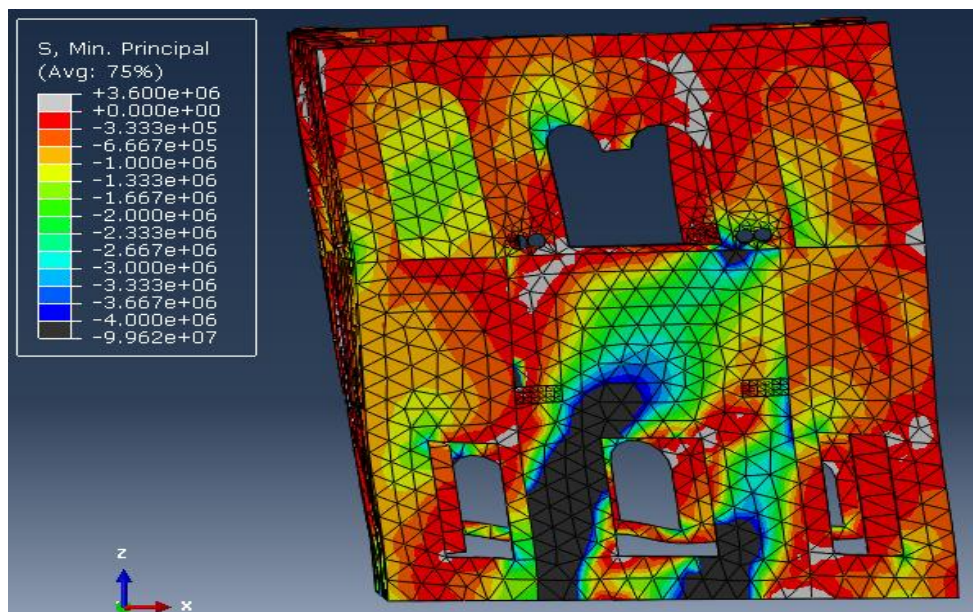
Εικόνα 9.50: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στη δυτική πλευρά του εσωτερικού του κτιρίου. Στη δυτική καμάρα του κυρίως ναού και σε κάποια από τα σφενδόνια των διαμερισμάτων του γυναικωνίτη ξεπερνούν την θλιπτική αντοχή.



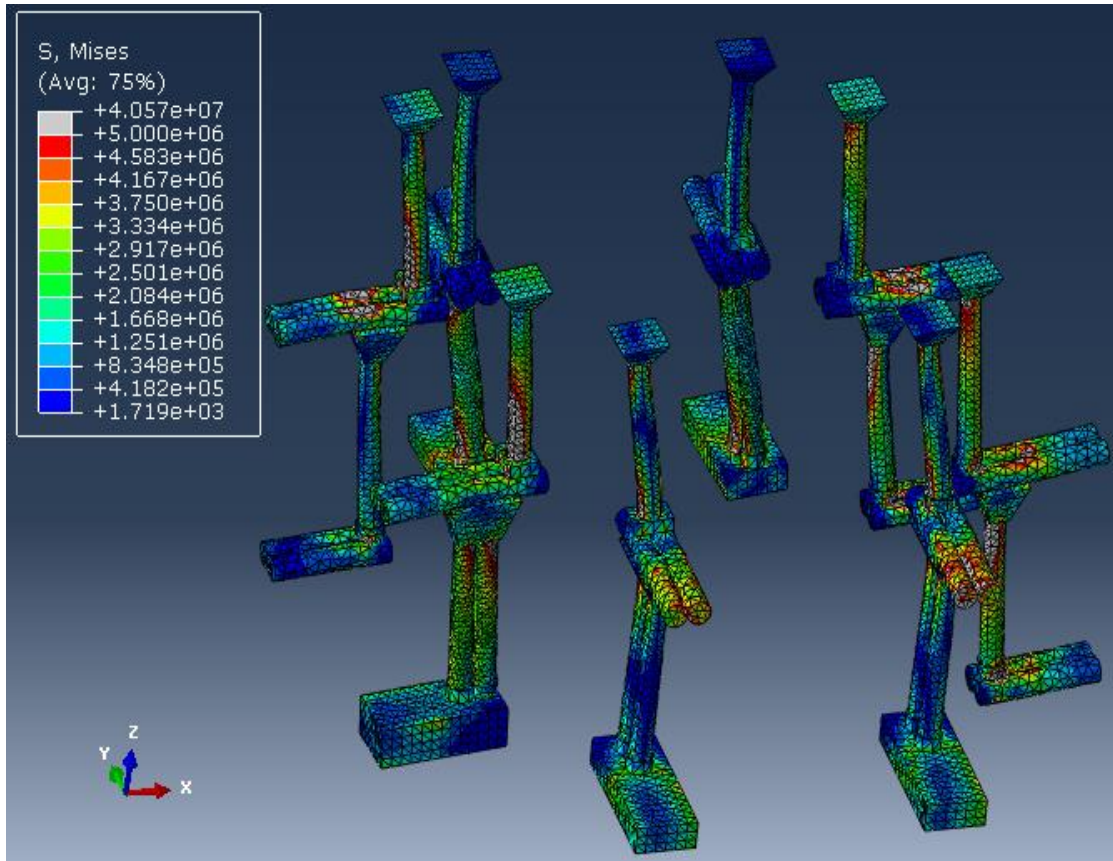
Εικόνα 9.51: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στον κεντρικό τρούλο, ξεπερνούν θλιπτική αντοχή.



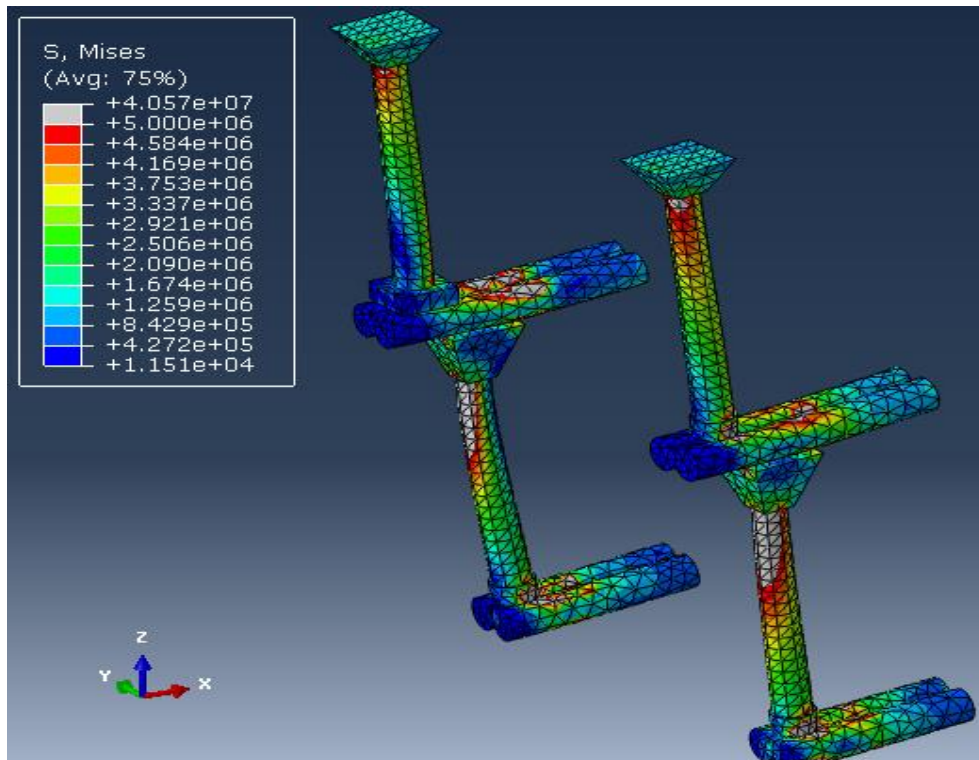
Εικόνα 9.52: Κατανομή τάσεων Von Mises στον κεντρικό τρούλο, ξεπερνούν κατά 1/3 θλιπτική αντοχή.



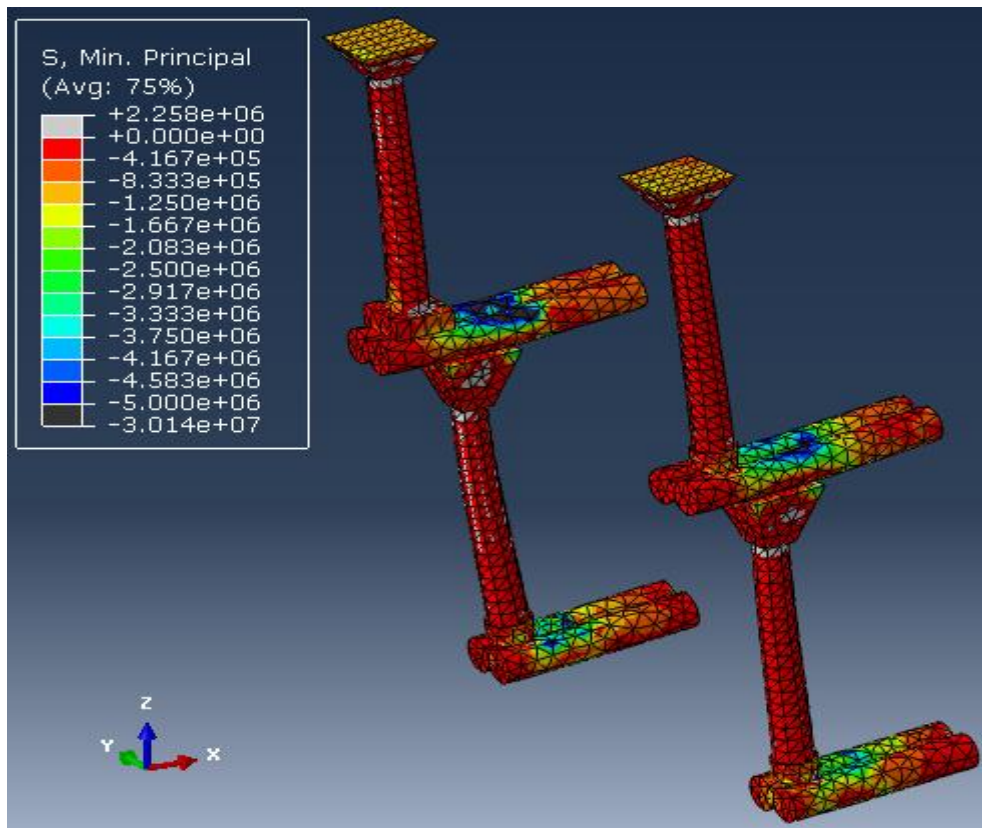
Εικόνα 9.53: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στην εσωτερική δυτική τοιχοποιία, φτάνουν 90% θλιπτικής αντοχής.



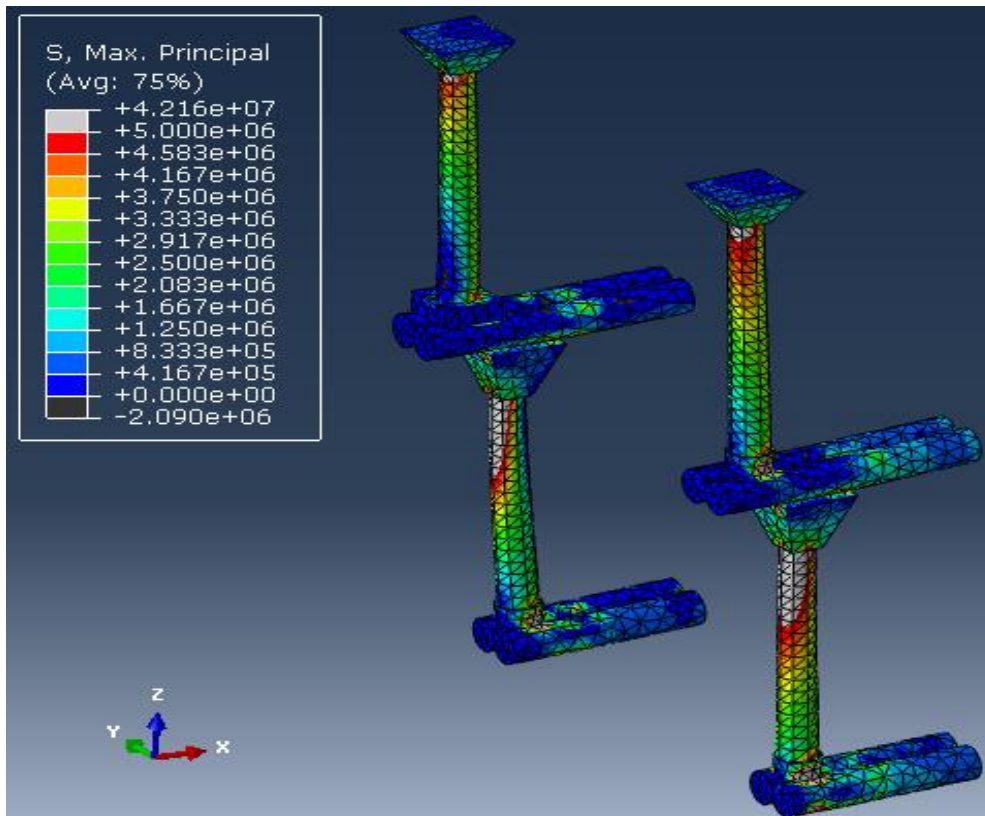
Εικόνα 9.54: Κατανομή τάσεις Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.



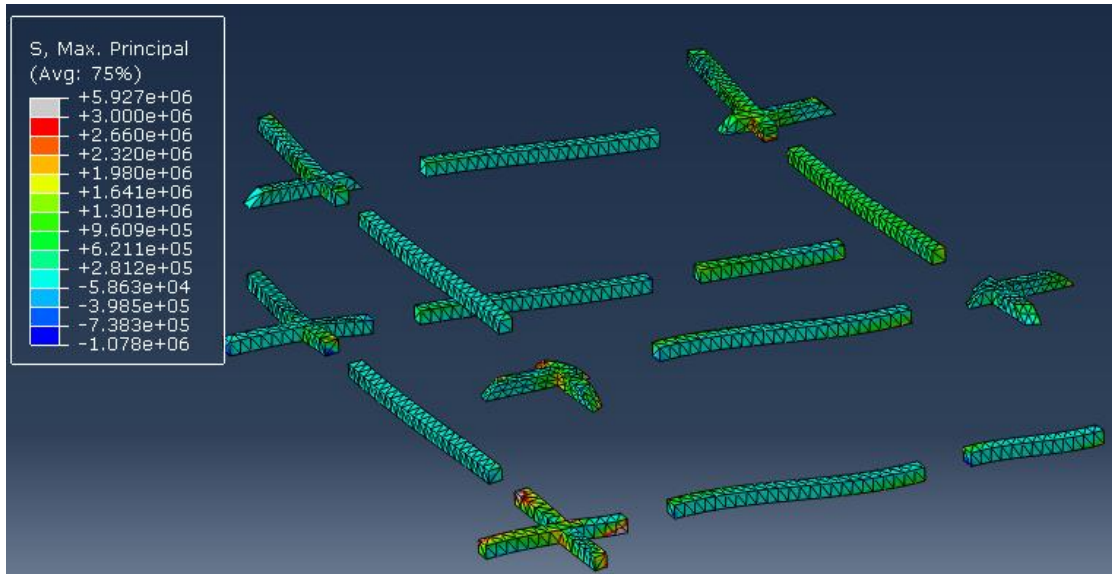
Εικόνα 9.55: Κατανομή τάσεων Von Mises στο ζεύγος των μαρμάρινων κίωνων της νότιας πλευράς, φτάνουν 35% αντοχής στον κορμό των κάτω κίωνων και στους πάνω οριζόντιους προβόλους.



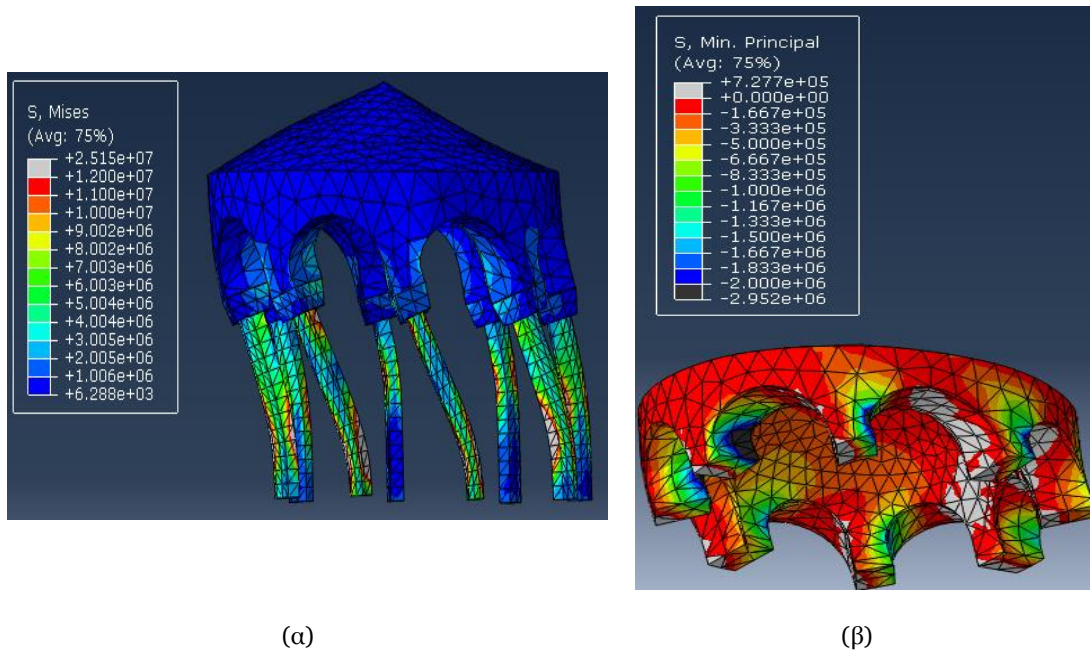
Εικόνα 9.56: Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στο ζεύγος των κίονων της νότιας πλευράς, φτάνουν 35% θλιπτικής αντοχής στους οριζόντιους προβόλους.



Εικόνα 9.57: Κατανομή κύριων εφελκυστικών τάσεων στο ζεύγος των κίονων της νότιας πλευράς, φτάνουν εφελκυστική αντοχή.



Εικόνα 9.58: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων στους ξύλινους ελκυστήρες, οι εφελκυστικές φτάνουν 75% εφελκυστικής αντοχής.



Εικόνα 9.59: (α) Κατανομή τάσεων Von Mises στους μαρμάρινους κίονες που στηρίζουν τον ουρανίσκο, φτάνουν οριακά θλιπτική αντοχή. (β) Κατανομή κύριων θλιπτικών τάσεων στο κέλυφος του ουρανίσκου, ξεπερνούν θλιπτική αντοχή κατά 1.5 MPa.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά συμπεράσματα για το συνολικό φορέα

Από όλες τις αναλύσεις που έχουν γίνει είναι σαφές ότι πρόκειται για πολύ δύσκαμπτο φορέα, αφού αποτελείται από στιβαρή φέρουσα τοιχοποιία. Μόνο από την επιβολή των στατικών φορτίων ο φορέας δεν επιβαρύνεται σημαντικά, καθώς δεν εμφανίζει ούτε μεγάλες μετακινήσεις, ούτε μεγάλες τάσεις.

Οι ιδιομορφές και τα ποσοστά δρώσας ιδιομορφικής μάζας που υπολογίστηκαν υποδεικνύουν την μοναδικότητα και πολυπλοκότητα του ναού της Παναγίας Παρηγορήτισσας. Από την ιδιομορφική ανάλυση, ακόμη, συμπεραίνεται ότι ο φορέας είναι πιο εύκαμπτος και συνεπώς ευπαθής κατά τη διεύθυνση X, όπως κι ότι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι πάρα πολύ δύσκαμπτος. Επίσης, στις πρώτες τρεις ιδιομορφές δε διεγείρεται ο στροφικός βαθμός ελευθερίας του κεντρικού τρούλου, που είναι συνηθισμένο φαινόμενο στις βυζαντινές εκκλησίες. Από αυτό το γεγονός συμπεραίνουμε ότι αν και φαίνεται τολμηρό το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου τελικά έχει καλή σεισμική συμπεριφορά εφόσον δεν είναι τόσο εύκαμπτο όπως συμβαίνει σε άλλες βυζαντινές εκκλησίες.

Στη δυναμική φασματική ανάλυση είναι δυσμενέστερη η περίπτωση σεισμού $X+0.3Y$, που είναι αναμενόμενο εφόσον είναι πιο εύκαμπτη κατά X η κατασκευή. Από τις δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας προκύπτει ότι ο σεισμός της Λευκάδας είναι πιο επικίνδυνος για την κατασκευή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας είναι δυσμενέστερα από των δυναμικών φασματικών αναλύσεων και πολλά από τα μέλη του φορέα αστοχούν κατά τις αναλύσεις αυτές.

Μέλη του φορέα που κινδυνεύουν σε αστοχία

Για σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση X τα πιο ευάλωτα μέλη είναι το κέλυφος του κεντρικού τρούλου, η δυτική καμάρα που τον στηρίζει, ο εξωτερικός ανατολικός τοίχος, τα τόξα των διαμερισμάτων των παρεκκλησιών και το άνω δυτικό μέρος της τοιχοποιίας του κυρίως ναού.

Για σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση Y σημαντικές τάσεις παρατηρούνται στο κέλυφος του κεντρικού τρούλου, στα διαμερίσματα του νάρθηκα και στον εσωτερικό νότιο τοίχο.

Ο ανοιχτός ουρανίσκος και οι μαρμάρινοι κίονες που τον στηρίζουν καταπονούνται και από τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις του σεισμού σημαντικά. Να σημειωθεί ότι το κέλυφος του ουρανίσκου είναι το μόνο στοιχείο όπου αναπτύσσονται τάσεις που ξεπερνούν την αντοχή του υλικού στις δυναμικές φασματικές αναλύσεις.

Στην περίπτωση του σεισμού του Αιγίου αστοχούν τα τόξα των διαμερισμάτων των παρεκκλησίων, η δυτική καμάρα του κυρίως ναού, το κέλυφος του κεντρικού τρούλου και του ουρανίσκου, όπως και οι μαρμάρيني κίονες που στηρίζουν τον τελευταίο. Στην περίπτωση του σεισμού της Λευκάδας αστοχούν όλα τα παραπάνω μέλη, αλλά και ο εξωτερικός ανατολικός τοίχος και κάποια από τα σφενδόνια των διαμερισμάτων του γυναικωνίτη.

Είναι εμφανές ότι εάν ένας τόσο μεγάλου εύρους σεισμός όπως της Λευκάδας ή και του Αιγίου συμβεί στην Άρτα, ο ναός της Παναγίας Παρηγορήτισσας είναι ευάλωτος σε σημαντικές φθορές. Είναι συνεπώς αναγκαίο να γίνει τεκμηριωμένη μελέτη, μέσα από την οποία να προταθούν επεμβάσεις και στη συνέχεια να ελεγχθεί η απόκριση της κατασκευής μετά από τις επεμβάσεις αυτές.

Σύστημα στήριξης κεντρικού τρούλου

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των τάσεων Von Mises που αναπτύσσονται στους μαρμάρινους κίονες ως ποσοστό της αντοχής είναι μικρές σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις που αναπτύσσονται στα στοιχεία της τοιχοποιίας. Ακόμη, κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση οι τάσεις έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές της στατικής ανάλυσης, οπότε συμπεραίνεται ότι δεν αναλαμβάνουν σημαντικό σεισμικό φορτίο οι μαρμάρيني κίονες. Βεβαίως, κινδυνεύουν στην εμφάνιση ρωγμών σε περίπτωση μιας σεισμικής φόρτισης όπως αυτές της Λευκάδας και του Αιγίου.

Στην περίπτωση στατικού φορτίου μεγαλύτερη καταπόνηση εμφανίζει το δυτικό ζεύγος των κιόνων. Από όλες τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν, αλλά και από τις ιδιομορφικές αναλύσεις που έγιναν χωρίς τα μάρμαρα προκύπτει ότι σε περίπτωση σεισμού κατά τη διεύθυνση X διεγείρεται το βόρειο και νότιο ζεύγος των κιόνων, ενώ κατά τη διεύθυνση Y διεγείρεται το δυτικό και ανατολικό ζεύγος. Επιπλέον, από την ιδιομορφική ανάλυση χωρίς τους ξύλινους ελκυστήρες συμπεραίνουμε ότι συμμετέχουν σημαντικά στη συγκράτηση των καμάρων που στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο.

Από τις δυναμικές φασματικές αναλύσεις που έγιναν για τη διερεύνηση της επιρροής της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού προκύπτει ότι δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα το σύστημα στήριξης του κεντρικού τρούλου από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Από τα ζεύγη των μαρμάρινων κιόνων το πιο ευάλωτο σε περίπτωση κατακόρυφης σεισμικής διέγερσης είναι το ανατολικό.

Από όλα τα παραπάνω καταλήγουμε ότι αν και η πρώτη εντύπωση είναι ότι οι μαρμάρيني κίονες στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο, στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου του παραλαμβάνεται από την περιμετρική τοιχοποιία, τις καμάρες και τις κόγχες του κυρίως ναού.

Κάποιοι αρχιτέκτονες, όπως ο Άρης Κωνσταντινίδης, ήταν της άποψης ότι η φέρουσα δομή πρέπει να είναι αντιληπτή στον επισκέπτη και χρησιμοποιούσαν απλή και καθαρή γεωμετρία στις κατασκευές τους. Ο πρωτομάστορας της Παρηγορήτισσας την έχει σχεδιάσει με το ακριβώς αντίθετο σκεπτικό, εφόσον η αρχιτεκτονική μορφολογικά έρχεται σε αντίθεση με την στατική λειτουργία του φορέα. Αρχικά, προκαλείται δέος στον επισκέπτη βλέποντας τους μαρμάρινους κίονες να στηρίζουν τον κεντρικό τρούλο, αλλά όπως αποδεικνύεται η τοιχοποιία παραλαμβάνει το μεγαλύτερο φορτίο του βάρους του κεντρικού τρούλου.

Σχολιασμός των αναλύσεων

Οι αναλύσεις που έχουν γίνει είναι όλες ελαστικές και άρα δε λαμβάνεται υπόψη η ρηγμάτωση του φορέα. Επίσης, τα υλικά έχουν επιλεγεί βάσει παραδοχών και όχι βάσει πειραματικών δοκιμών, οπότε δεν είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για τις ακριβείς επεμβάσεις που πρέπει να γίνουν. Όμως, από τη συγκεκριμένη μελέτη μπορούμε να προσδιορίσουμε τα μέλη του φορέα που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη καταπόνηση και άρα κινδυνεύουν σε αστοχία. Ακόμη, είναι εφικτό να προσδιορίσουμε τη σεισμική συμπεριφορά τόσο του συνολικού φορέα όσο και του συστήματος στήριξης του κεντρικού τρούλου.

Να σημειωθεί ότι θα πρέπει να εξεταστεί η θεμελίωση του κτιρίου σε περίπτωση σεισμού για την οποία δεν είχαμε αρκετές πληροφορίες. Επίσης, μελλοντικά θα πρέπει να προσδιοριστούν και οι δυνάμεις των τριβών που αναπτύσσονται στα σημεία που εδράζονται οι κίονες πάνω στους οριζόντιους προβόλους.

Παράρτημα

```

TOTAL MASS OF MODEL
4690161.

LOCATION OF THE CENTER OF MASS OF THE MODEL
11.23755      10.69106      7.303811

MOMENTS OF INERTIA ABOUT THE ORIGIN
I (XX)      I (YY)      I (ZZ)
1.1020492E+09  1.1725268E+09  1.5491069E+09

PRODUCTS OF INERTIA ABOUT THE ORIGIN
I (XY)      I (XZ)      I (YZ)
-5.6268601E+08  -3.8490845E+08  -3.6570766E+08

MOMENTS OF INERTIA ABOUT THE CENTER OF MASS
I (XX)      I (YY)      I (ZZ)
3.1577022E+08  3.3004200E+08  4.2074257E+08

PRODUCTS OF INERTIA ABOUT THE CENTER OF MASS
I (XY)      I (XZ)      I (YZ)
795778.0      45549.86      525711.0
    
```

Εικόνα 1: Μάζα και ροπές αδρανείας συνολικού φορέα.

MODE NO	EIGENVALUE	E I G E N V A L U E O U T P U T		GENERALIZED MASS	COMPOSIT
		FREQUENCY (RAD/TIME)	(CYCLES/TIME)		
1	827.34	28.764	4.5779	9.66393E+05	0.0000
2	997.08	31.577	5.0256	6.43209E+05	0.0000
3	1663.4	40.785	6.4912	63715.	0.0000
4	2112.1	45.957	7.3143	10642.	0.0000
5	2373.9	48.723	7.7544	1.42352E+05	0.0000
6	2490.3	49.903	7.9423	30466.	0.0000
7	2766.7	52.600	8.3715	53802.	0.0000
8	3091.0	55.597	8.8485	31432.	0.0000
9	3251.5	57.022	9.0753	63475.	0.0000
10	3481.9	59.007	9.3913	54604.	0.0000
11	3618.8	60.157	9.5742	63508.	0.0000
12	3961.7	62.942	10.018	57782.	0.0000
13	4247.0	65.169	10.372	9994.0	0.0000
14	4443.9	66.663	10.610	59418.	0.0000
15	4595.1	67.787	10.789	23671.	0.0000
16	4769.7	69.063	10.992	48556.	0.0000
17	5129.8	71.622	11.399	1.39045E+05	0.0000
18	5203.3	72.134	11.480	75289.	0.0000
19	5381.4	73.358	11.675	3.30259E+05	0.0000
20	5674.8	75.332	11.989	1.37471E+05	0.0000
21	5888.8	76.739	12.213	1.17473E+05	0.0000
22	6318.3	79.488	12.651	2.38869E+05	0.0000
23	6373.7	79.835	12.706	1.06114E+05	0.0000
24	7074.2	84.108	13.386	5.41462E+05	0.0000
25	7205.5	84.885	13.510	1.30466E+05	0.0000
26	7357.9	85.778	13.652	1.50891E+05	0.0000
27	8074.0	89.855	14.301	3.16268E+05	0.0000
28	8114.7	90.082	14.337	2.54159E+05	0.0000
29	8342.3	91.336	14.537	1.76767E+05	0.0000
30	8985.9	94.794	15.087	3.52406E+05	0.0000

Εικόνα 2: Οι 30 ιδιομορφές της κατασκευής που υπολογίστηκαν.


```

** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet155, 1, 1
_PickedSet155, 2, 2
_PickedSet155, 3, 3
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, perturbation
*Frequency, eigensolver=Lanczos, acoustic coupling=on,
normalization=displacement
30, , , ,
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=1
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
*End Step

```

Εικόνα 5: Αρχείο Input για την ιδιομορφική ανάλυση.

```

** STEP: Step-2
**
*Step, name=Step-2, perturbation
*Response Spectrum, comp=ALGEBRAIC, sum=CQC
Amp-1,1., 0., 0., 1.2
Amp-1,0., 1., 0., 0.375
Amp-1,0., 0., 1., 0.441
*Modal Damping
1, 30, 0.05
**

```

Εικόνα 6: Αρχείο Input για τη δυναμική φασματική ανάλυση $X+0.3Y+0.3Z$.

```

** STEP: Step-2
**
*Step, name=Step-2, perturbation
*Modal Dynamic, continue=NO
0.005, 10.
*Base motion, Dof=3, Amplitude=Amp-4, type=acceleration, scale=2
*Base motion, Dof=2, Amplitude=Amp-2, type=acceleration, scale=1
*Base motion, Dof=1, Amplitude=Amp-3, type=acceleration, scale=1
*Select eigenmodes, Generate
1,30,1
*Modal Damping
1, 30, 0.05
**
** OUTPUT REQUESTS
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-2
**
*Output, field, variable=PRESELECT, Frequency=20
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

```

Εικόνα 7: Αρχείο Input για τη δυναμική ανάλυση χρονιόστορίας για το σεισμό του Αιγίου.

Βιβλιογραφία

1. Θέμις Χατζηγεωργίου: «Το Δεσποτάτον της Ηπείρου», Αθήνα 1962.
2. Εκδοτική Αθηνών: «Ιστορία του Ελληνικού Έθνους».
3. Ορλάνδος Α., Η Παρηγορήτισσα της Άρτης, εκδ. Αρχαιολογική Εταιρεία, Αθήνα 1963.
4. Τρυπιανή-Ομήρου Σ., Υλικά και τρόποι δομής στα βυζαντινά μνημεία της Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2012.
5. Σημειώσεις μαθήματος Βυζαντινής Αρχαιολογίας Β' του τομέα Αρχαιολογίας και Ιστορίας της Τέχνης του ΕΚΠΑ.
(http://archaeology.arch.uoa.gr/diagramma_IA14.htm)
6. Μπούρας Χ., Βυζαντινή και Μεταβυζαντινή αρχιτεκτονική στην Ελλάδα, Αθήνα 2001.
7. Ελισάβετ Βιντζηλαίου, Σημειώσεις μαθήματος Μηχανικής της Τοιχοποιίας, Σεπτέμβριος 2005.
8. Καραντώνη Φ., Κατασκευές από τοιχοποιία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου 2004.
9. Stephen J. Kelley, Veronika Šendova, and Predrag Gavrilovič, Seismic Protection Of Byzantine Churches.
10. Καλώνης Ν., Η Ναοδομική Αρχιτεκτονική του Δεσποτάτου της Ηπείρου, Αγρίνιο 2005.
11. Vocotopoulos, Church Architecture in the Despotate of Epirus: The Problem of Influences, Zograf 27 (1998–1999).
12. Robert Ousterhout, Master Builders of Byzantium, 2008.
13. Moropoulou A. Cakmak A. S., Lohvyn N., Earthquake resistant construction techniques and materials on Byzantine monuments in Kiev, December 2000.
14. Πανουτσοπούλου Α., Μηχανικά Χαρακτηριστικά Τοιχοποιίας Βυζαντινού Τύπου Από Οπτοπλινθούς Και Ισοπαχή Κονιάματα Διαφόρων Συνθέσεων, Οκτώβριος 2014.
15. Κοντοπούλου Ε., Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς προσομοιώματος κατασκευής από περικλειστη τοιχοποιία και σταυροθόλιο από οπτοπλινθοδομή, Αθήνα Δεκέμβριος 2013.
16. Luigia Binda, C. Tedeschi and G. Baronio, Mechanical Behaviour at Different Ages, of Masonry Prisms With Thick Mortar Joints Reproducing a Byzantine Masonry, 1999.
17. Κορόζης Η., Σεισμική συμπεριφορά αρχαίων κίωνων με αριθμητικές μεθόδους, Αθήνα, Μάρτιος 2013.
18. Παπαδρακάκης Μ., Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Αθήνα 2001.
19. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ2000).
20. Ευρωκώδικας 1.
21. Ευρωκώδικας 5.
22. Ευρωκώδικας 6.

23. Κουμούσης Β., Σημειώσεις για το μάθημα Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία, Αθήνα 2008.
24. Abaqus documentation.
25. Autocad 3D tutorial.
26. Zehra Cagnan, Computer Modelling And Seismic Performance Assessment of a Byzantine Basilica, Greece, May 2011.
27. Συρμακέζης Κ., Αντισεισμικός Σχεδιασμός Ιστορικών Κατασκευών και Μνημείων, Νοέμβριος 2008.
28. Manos G. C., Soulis V. J., Karamitsios N., The Performance of Post-Byzantine churches during the Kozani-1995 Earthquake – Numerical Investigation of their Dynamic and Earthquake Behavior, Lisboa 2012.
29. Σαπουντζάκης Ε., Σημειώσεις για το μάθημα Δυναμική των Κατασκευών για το Ελληνικό Ανοιχτό Πανεπιστήμιο.
30. Almac U., Schweizerhof K., Structural Behavior of Hagia Sophia under Dynamic Loads, September 2013.
31. Κοκκάλα Ν., Η στατική σύλληψη ως συνθετική ιδέα, Ιανουάριος 2014.
32. Brandonisio G., Lucibello G., Mele E., De Luca A., Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila earthquake, February 2014.
33. Μοροπούλου Α., Cakmak A.S., Lohvyn N., Earthquake resistant construction techniques and materials on Byzantine monuments in Kiev, May 2000.
34. Παπαδόπουλος Κ., Βιντζηλαίου Ελισάβετ, Η σεισμική απόκριση των κίωνων της περίπτωσης του ναού του επικούριου Απόλλωνα, Νοέμβριος 2008.
35. Riva P., Perotti F., Guidoboni E., Boschi E., Seismic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna, February 1998.
36. Mele E., De Luca A., Giordano A., Modelling and analysis of a basilica under earthquake loading, March 2003.
37. Chitrarekha K., Baikouss D., Modern architects of Greece, February 2009.