

NATIONAL TECHNICAL
UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF
CIVIL ENGINEERING

LABORATORY OF
EARTHQUAKE
ENGINEERING



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

ΤΣΕΛΛΟΥ ΚΥΡΙΑΚΟΥ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

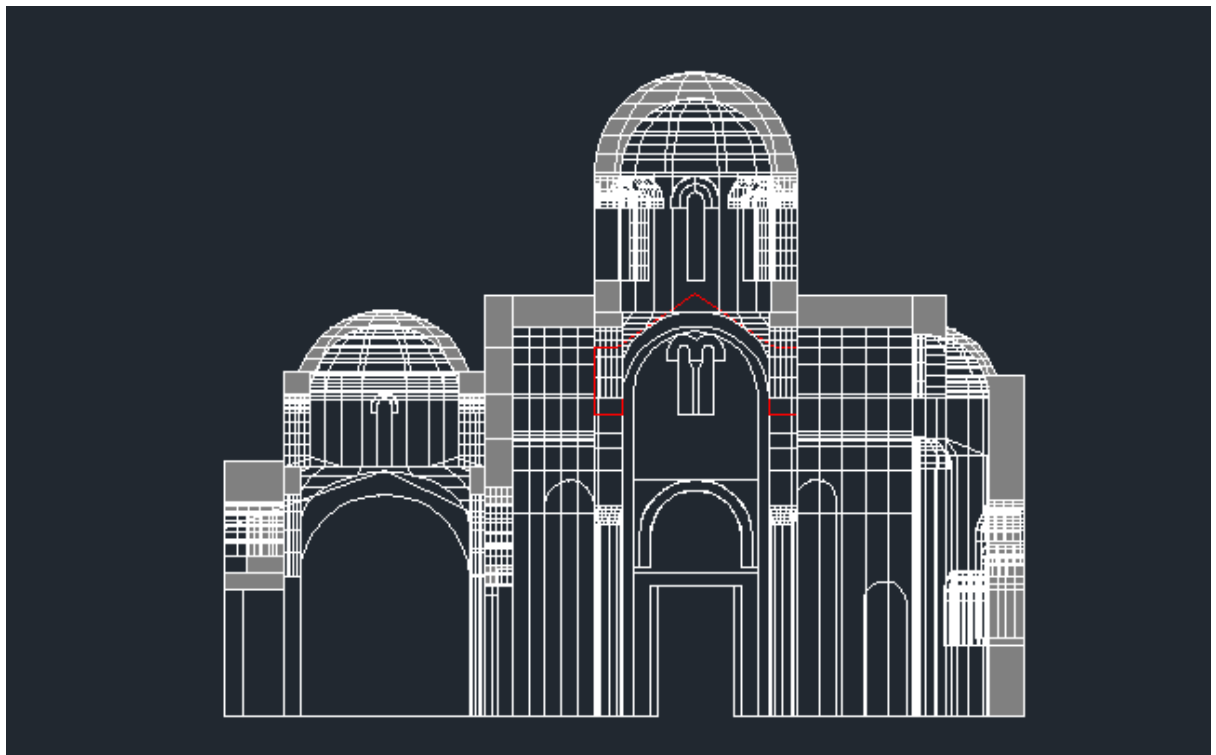
Επιβλέπων

Σπυράκος Κ., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων

Μανιατάκης Χ., Δρ Ε.Μ.Π.

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ
ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΙΕΡΑΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙΣΑΡΙΑΝΗΣ**



**EVALUATION OF THE DYNAMIC RESPONSE OF THE
KAISARIANI MONASTERY KATHOLIKON**

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σπυράκο Κωνσταντίνο, για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε από την πρώτη συνάντησή μας, αν και δεν είχα επιλέξει και δεν είχα παρακολουθήσει ποτέ δικό του μάθημα, ώστε να μου αναθέσει την συγκεκριμένη εργασία του πολύ σημαντικού μνημείου, καθώς και για την εν συνεχεία καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Επίσης, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον συνεπιβλέποντα διδάκτορα κ. Μανιατάκη Χαρίλαο για την επιστημονική του καθοδήγηση, τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε για μένα, καθώς και για το κλίμα αγαστής συνεργασίας που καλλιέργησε. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κυριακόπουλο Παναγιώτη, για τις λίγες αλλά καίριες συναντήσεις μας και την καταλυτική βοήθεια που απεκόμισα κατ' αυτές σχετικά με την εκμάθηση και την αξιοποίηση του προγράμματος Abaqus.

Ύστερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και τα μέλη της οικογένειάς μου για την ανακουφιστική βοήθεια που μου προσέφεραν όποτε προέκυψε ανάγκη.

Τέλος, αισθάνομαι ότι χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην ελληνική κοινωνία, καθώς η υψηλού επιπέδου δωρεάν παιδεία που απόλαυσα όλα αυτά τα χρόνια βασίζεται στους κόπους της και το υστέρημά της, και θρέφω την ελπίδα ότι με το εφόδιο αυτό θα ανταποδώσω.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του Καθολικού της Ι.Μ. Καισαριανής. Το μνημείο αυτό είναι ένας βυζαντινός, σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο ναός, αφιερωμένος στα "Εισόδια της Θεοτόκου" που ανάγεται στη Μεσοβυζαντινή εποχή (11^{ος}-12^{ος} αι.) ο οποίος κατά την εποχή της Τουρκοκρατίας (16^{ος}-17^{ος} αι.) επεκτάθηκε μέσω της προσθήκης Νάρθηκα και παρεκκλησίου αφιερωμένου στον Άγιο Αντώνιο. Στην εργασία αυτή, αποτιμάται η τωρινή κατάσταση του μνημείου, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση τριών εναλλακτικών ειδών προσομοίωσης:

1. Το μνημείο προσομοιώνεται ως ένα ενιαίο σώμα.
2. Τα 2 μέρη του μνημείου που ανάγονται σε διαφορετικές κατασκευαστικές φάσεις (μεσοβυζαντινός Κυρίως Ναός και μεταβυζαντινές προσθήκες) προσομοιώνονται ως ανεξάρτητα σώματα.
3. Τα 2 μέρη του μνημείου προσομοιώνονται ως σώματα σε επαφή.

Τα προσομοιώματα 1 και 2 είναι γραμμικά-ελαστικά και οι αναλύσεις που εφαρμόζονται σε αυτά είναι αρχικά η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης (Ι.Α.Φ.Α.) και στη συνέχεια για λόγους σύγκρισης γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας με 3 καταγραφές του σεισμού της Πάρνηθας, κλιμακωμένες κατά τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8. Απεναντίας, το προσομοίωμα 3 είναι από τη φύση του μη-γραμμικό και σε αυτό πραγματοποιούνται μόνο αναλύσεις χρονοϊστορίας (με τις ίδιες καταγραφές), οι οποίες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στην ανάλυση διαφοροποιεί δραστικά και επί το ευμενέστερο τα αποτελέσματά της, επιβεβαιώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο την αντοχή του μνημείου στο χρόνο.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to present the investigation of the seismic response of the central church (Catholicon) of the Monastery of Kaisariani. The Catholicon is a Byzantine crossed-dome church constructed during the Middle-Byzantine era (11th/12th centuries) and during the Ottoman era expanded via the addition of Narthex and a vaulted chapel of Aghios Antonios. In this work the structural integrity of the Katholikon is assessed at its current state with the aid of finite element method. Three different models of the structure are applied:

1. The first model considers the whole structure including phase I and phase II as a continuum.
2. The second model suggests that the main church responds independently to the narthex and the chapel due to the existence of a construction joint;
3. The third model considers the interaction between the two structural phases applying a suitable contact law between the main church and the additives of the second structural phase.

Models 1 and 2 are linear-elastic, so modal response spectrum analysis, MRSA, is performed for those models considering all significant modes. Time history analyses are also performed for model 1 and model 2 for reasons of comparison with the use of 3 seismic records of Parnitha's earthquake, scaled properly according to EC8. On the contrary, in model 3 non-linearity appears because of contact ; thus, time history analysis is the only that performed for this model, to come to the conclusion that the introduction of contact phenomena at the analysis leads to drastically more favorable output, and that way the durability of the monument during centuries is confirmed.

1. Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 6 -
1.1	Λίγα λογία για το μνημείο	- 6 -
1.2	Αρχιτεκτονικό πλαίσιο	- 7 -
2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ	- 12 -
2.1	Εισαγωγικά στοιχεία	- 12 -
2.2	Ο Κυρίως Ναός	- 14 -
2.3	Οι μεταβυζαντινές προσθήκες.....	- 25 -
3	ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	- 29 -
3.1	Λίγα λόγια για την τοιχοποιία	- 29 -
3.2	Στοιχεία μηχανικής της τοιχοποιίας.....	- 32 -
3.3	Προσομοίωση	- 37 -
3.4	Μέθοδοι Αντισεισμικής Ανάλυσης.....	- 40 -
3.5	Σύγχρονες προσεγγίσεις για την αντισεισμική προστασία κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομίας – Ανασκόπηση-Πρόταση	- 45 -
4	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 50 -
4.1	Σκοπός.....	- 50 -
4.2	Το λογισμικό Abaqus.....	- 51 -
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	- 52 -
5.1	Γενικές παραδοχές	- 52 -
5.2	Η γεωμετρία των προσομοιωμάτων.....	- 54 -
5.3	Ιδιότητες υλικών.....	- 56 -
5.4	Η διακριτοποίηση του φορέα	- 64 -
5.5	Το προσομοίωμα "3"	- 67 -
6	ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	- 70 -
6.1	Εύρεση ιδιομορφών με το λογισμικό ABAQUS.....	- 70 -
7	ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	- 102 -
7.1	Διαδικασία της ανάλυσης.....	- 102 -
7.2	Φάσμα απόκρισης.....	- 103 -
7.3	Αποτελέσματα για τον Κυρίως Ναό.....	- 108 -
7.4	Αποτελέσματα για τις μεταβυζαντινές προσθήκες.....	- 114 -
7.5	Συμπεράσματα	- 119 -
8	ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ	- 123 -
8.1	Διαδικασία της ανάλυσης.....	- 123 -

8.2	Αποτελέσματα για τον Κυρίως Ναό.....	- 126 -
8.3	Αποτελέσματα για τις μεταβυζαντινές προσθήκες.....	- 136 -
9	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ-	141 -
9.1	Η διαδικασία της ανάλυσης.....	- 141 -
9.2	Αποτελέσματα	- 142 -
9.3	Διεξοδικότερη εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς του μνημείου.....	- 157 -
9.4	Προβλήματα των διεπιφανειών επαφής	- 162 -
10	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	- 164 -
10.1	Συμπεράσματα	- 164 -
10.2	Προτάσεις	- 165 -

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Λίγα λόγια για το μνημείο

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση του μνημείου Καθολικόν της Ιεράς Μονής Καισαριανής ως προς την σεισμική απόκριση του δομήματος. Η Ι.Μ. Καισαριανής βρίσκεται στο Νομό Αττικής στον ομώνυμο Δήμο, περίπου 0,7 km Ανατολικά/Νοτιο-Ανατολικά από το ανατολικό οικιστικό όριο της Αθήνας και σε υψόμετρο 385 m, σε τοποθεσία η οποία απλώνεται σε μια κατάφυτη κοιλάτητα στο μέσο της δυτικής πλαγιάς του Υμηττού.

Ο χώρος αυτός έχει μεγαλύτερη ιστορία ως λατρευτικός χώρος: στην Αρχαιότητα, ήταν πιθανώς ένας χώρος αφιερωμένος στην Αφροδίτη, πρώτου καταληφθεί από τους Χριστιανούς κατά τον 5ο με 6ο αιώνα. Το πρώτο χριστιανικό κέντρο είχε ιδρυθεί νοτιοδυτικότερα, στο λόφο του «Κοιμητηρίου των Πατέρων» ή Φραγκομονάστηρο, όπου σώζονται ερείπια παλαιοχριστιανικής βασιλικής και ναού μεταβατικού τύπου του 10^{ου} αι.. Την περίοδο της φραγκοκρατίας κτίστηκε εκεί ο ναός του Αγ. Μάρκου ή Φραγκομονάστηρο και το 17^ο αι. ο ναός των Ταξιαρχών.

Η παρουσία της Ιεράς Μονής στο χώρο αυτό χρονολογείται από τον ύστερο 11^ο αιώνα. Το μοναστηριακό συγκρότημα περιβάλλεται από υψηλό περίβολο, με δύο πύλες, ανατολικά και δυτικά. Έξω από την ανατολική πύλη υπάρχει η πηγή του Κριού ή Κοτς Μπασί, ονομασία που οφείλεται στην αρχαϊκή υδρορροή, που αποδίδει κεφάλι κριού. Από τη *βυζαντινή περίοδο* διατηρούνται το Καθολικό, δηλαδή ο Κυρίως Ναός, και ο λουτρώνας που ανάγονται στα τέλη του 11^{ου} με αρχές του 12^{ου} αι..

Στους *μεταβυζαντινούς χρόνους*, ο λουτρώνας ενσωματώθηκε σε ένα κτιριακό σύμπλεγμα διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων και τμήμα του λειτούργησε ως ελαιοτριβείο. Δυτικά του καθολικού βρίσκεται το μεταβυζαντινό συγκρότημα της τράπεζας, ενώ στη θέση του, ακολουθώντας τον ίδιο άξονα, έχουν βρεθεί και ίχνη παλαιότερης τράπεζας. Τα μεταβυζαντινά κελιά, χώροι διαμονής των μοναχών, αναπτύσσονται στη νότια πλευρά του περιβόλου. Διαμορφώνεται μία κύρια, διώροφη σήμερα, πτέρυγα που διαχωρίζεται από τριώροφο κτίσμα, γνωστό ως Πύργος των Μπενιζέλων.

Αρκετά είναι τα διάφορα ονόματα που απαντώνται στις ιστορικές πηγές για την Ιερά Μονή κατά τη διάρκεια της μακραίωνης ύπαρξής της, όπως "Καισαριανή", ένα όνομα ακαθόριστης προέλευσης, "Κυριανή", "Αγία Συριανή" κατά τη Φραγκοκρατία, καθώς και "Μοναστήρι του Κοσ βασί" κατά την τουρκοκρατία. Η μονή Καισαριανής υπήρξε για πολλά χρόνια οικονομικά εύρωστη και διέθετε αξιόλογη βιβλιοθήκη. Το 1833 διαλύθηκε με διάταγμα της Αντιβασιλείας του Όθωνα.



Εικόνα 1-1: Δυτική όψη του Καθολικού της Ι.Μ. Καισαριανής

Το **Καθολικό**, αφιερωμένο στα Εισόδια της Θεοτόκου, ανήκει στον αρχιτεκτονικό τύπο του σταυροειδούς, εγγεγραμμένου ναού με τρούλο και φέρει τοιχογραφίες του 18ου αι. Στα δυτικά του έχει προστεθεί ευρύχωρος τριμερής νάρθηκας με τρούλο, ο οποίος αποτελεί προσθήκη του 17ου αι. και οι σύγχρονες του τοιχογραφίες είναι έργο του πελοποννήσιου ζωγράφου Ιωάννη Ύπατου. Την ίδια εποχή προστέθηκε, στα νότια, το παρεκκλήσι του Αγίου Αντωνίου. Η παλαιότερη σωζόμενη τοιχογραφία με μορφή Θεοτόκου Δεομένης, 14ου αι., βρίσκεται εξωτερικά του καθολικού και είναι ορατή από το εσωτερικό του παρεκκλησίου. Το επίπεδο δώροφο κωδωνοστάσιο της πρόσοψης, αποτελεί προσθήκη νεότερων χρόνων και χρονολογείται στον 19^ο αι.

Το Καθολικόν της Ι.Μ. Καισαριανής αποτελεί ένα από τα κομψότερα μεσοβυζαντινά μνημεία της Αττικής και επιβιώνει ως τις μέρες μας σε άριστη κατάσταση. Ως εκ τούτου πέρα από την αρχαιολογική του αξία, *παρουσιάζει και ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον όσον αφορά την μηχανική του συμπεριφορά.*

1.2 Αρχιτεκτονικό πλαίσιο

Η Βυζαντινή (Ανατολική Ρωμαϊκή) Αυτοκρατορία ήταν μια από τις πρώτες και επί πολλούς αιώνες η πλέον ακτινοβόλα χριστιανική δύναμη. Φυσικό λοιπόν επακόλουθο είναι ότι η ναοδομία απετέλεσε τέχνη η οποία άνθησε στα εδάφη της. Η πλούσια εκκλησιαστική αρχιτεκτονική της παράδοση έχει να μας παρουσιάσει πλήθος αρχιτεκτονικών ρυθμών οι οποίοι κατά βάση είναι οι εξής:

- Βασιλική
- Περίκεντρο
- Βασιλική με τρούλο
- Σταυρεπίστεγος
- Σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο
- Οκταγωνικός

Ως πλέον αντιπροσωπευτικός ρυθμός της βυζαντινής ναοδομίας από τους προαναφερθέντες θεωρείται ο “σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο”, ο οποίος για το λόγο αυτό είναι γνωστός και ως “**βυζαντινός ρυθμός**”. Εμφανίστηκε στην Κωνσταντινούπολη και αργότερα σε ολόκληρο τον βυζαντινό κόσμο, ύστερα από μια περίοδο τριών περίπου αιώνων μεταβατικής ναοδομίας, συνδυασμού θολωτής τρίκλιτης βασιλικής με τη σταυρωτή τρουλαία βασιλική (χαρακτηριστικό παράδειγμα ο ναός της Σκριπούς Βοιωτίας). Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 880 στο περίφημο αυτοκρατορικό κτίσμα της "Νέας Εκκλησίας του Παλατίου" και εγκαινιάστηκε από τον Μ. Φώτιο στα χρόνια του Βασιλείου Α΄ (867-886). Ονομάστηκε Νέα Εκκλησία διότι παρουσίαζε έναν καινούριο αρχιτεκτονικό τύπο.

Στον ρυθμό αυτό συγκαταλέγεται και το *κύριο μέρος* του υπό εξέταση, σ’ αυτήν την διπλωματική εργασία, μνημείου οπότε σκόπιμη κρίνεται μια σύντομη περεταίρω ανάπτυξη του.

Ο “Βυζαντινός ρυθμός”

Το τυπικό γνώρισμα του “βυζαντινού ρυθμού” είναι ότι ο Κύριος Ναός έχει περίπου τετραγωνική κάτοψη, στην οποία εγγράφεται ισοσκελής σταυρός (**ελληνικός σταυρός**) ο οποίος διαγράφεται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά.

Λεπτομερέστερα:

- Ο Κύριος Ναός (σταυρικό τετράγωνο) διατρέχεται από 4 ημικυλινδρικές καμάρες, σταυροειδώς διαρθρωμένες και διατεταγμένες κατά την έννοια των διαμέσων του σταυρικού τετραγώνου.
- Οι καμάρες αυτές :
 - **Εσωτερικά** ορίζουν τα 2 κύρια κλίτη του Κυρίου Ναού:
 - α)** το κύριο διάμηκες κλίτος με διεύθυνση Α-Δ
 - β)** το εγκάρσιο κλίτος με διεύθυνση Β-Ν
 τα οποία τέμνονται καθέτως στο κέντρο του σταυρικού τετραγώνου και σχηματίζουν τον **εσωτερικό σταυρό**. [εικόνα 2]
 - **Εξωτερικά** καλύπτονται από κεκλιμένη δίρριχτη στέγη που υψώνεται πάνω από την στάθμη των γωνιαίων κελυφών διαγράφοντας έτσι τον **εξωτερικό σταυρό**. [εικόνα 1-2]
- Η διαπλοκή των 2 κυρίων κλιτών υποδιαιρεί το σταυρικό τετράγωνο σε **9 τετραγωνικά διαμερίσματα**.
- Στο **κεντρικό διαμέρισμα** εγγράφεται η κάτοψη του τρούλου και συνιστά το κέντρο του σταυρού.
- Ο **τρούλος**:
 - Αποτελείται από κυλινδρικό τύμπανο το οποίο ξεκινά από τις 4 κορυφές των *προς τα μέσα* ακραίων διατομών των 4 ημικυλινδρικών καμαρών και απολήγει σε ημισφαιρικό θόλο. [εικόνες 1-2. 11, 1-3]

- Υποβαστάζεται από τους 4 κεντρικούς κίονες του Ναού με τους οποίους συνδέεται ομαλά χάρις στα **4 αντίστοιχα λοφία**. Αυτή η δομική διαμόρφωση **πρωτοεφαρμόστηκε στον ναό της Αγίας του Θεού Σοφίας στη Κωνσταντινούπολη**, στην κοινώς γνωστή *Αγιά Σοφιά* και αποτελεί ιδιοφυή επιινόηση των αρχιτεκτόνων της, **Ισιδώρου του Μιλησίου και Ανθεμίου του Τραλλιανού** με την οποία έδωσαν λύση στο μακράιωνο πρόβλημα της αποδοτικής παραλαβής των μεγάλων οριζοντίων ωθήσεων ενός ευμεγέθους θόλου, συνάμα με την κομψή προσαρμογή του στο ημικυλινδρικό κέλυφος οροφής που χαρακτηρίζει τον τυπικό για την εποχή ρυθμό της “*βασιλικής*” και που συνέβαλε τα μέγιστα στην πρωτοφανή ευρυχωρία και επιβλητικότητα του τελικού αποτελέσματος.
 - Πρόκειται για **σφαιρικά τρίγωνα**, το καθένα απ’ τα οποία σχηματίζεται με κορυφές τον αντίστοιχο κίονα και τα σημεία συνάντησης των εκατέρωθεν αυτού ημικυλινδρικών καμαρών με το τύμπανο του τρούλου. [εικόνα 1-3]
 - Το τύμπανο του τρούλου εξωτερικά έχει σχήμα οκτάπλευρου και, κατά κανόνα, σε κάθε πλευρά του ανοίγεται **μονόλοβο παράθυρο**.
- Τα 4 διαμερίσματα σε επαφή με το κεντρικό, τα οποία καλύπτονται από τις ημικυλινδρικές καμάρες συνιστούν τις **κεραίες του σταυρού**.
 - Στα 4 σημεία συνάντησης των ημικυλινδρικών καμαρών – που σε κάτοψη συνιστούν τις γωνίες του κεντρικού διαμερίσματος- τοποθετούνται συνήθως 4 κεντρικοί μαρμάρινοι κίονες (περίπτωση 4-κίονου εγγεγραμμένου σταυροειδούς Ναού με τρούλο).
 - Τα **απομένοντα 4 γωνιαία διαμερίσματα** διαμορφώνονται είτε ως σταυροθόλια είτε ως δευτερεύουσες διαμήκεις ημικυλινδρικές καμάρες.
 - Οι ημικυλινδρικές καμάρες της οροφής (των κεραιών και των γωνιαίων διαμερισμάτων), κατά μήκος των γενέσεών τους εδράζονται σε πεσσούς (πέραν των τεσσάρων κεντρικών κίωνων), ενώ οι τοιχοποιίες που πληρώνουν τις *ακραίες εξωτερικές “διατομές” των κλιτών αυτών* (στην περίμετρο του κτιρίου) καλούνται εύγλωττα και **τύμπανα** των αντιστοιχών κεραιών/διαμερισμάτων.
 - Τα ανοίγματα του Ναού διαμορφώνονται με ενισχυμένη περίμετρο ώστε να ανταπεξέρχεται στη δυσμενή εντατική κατάσταση που τείνει να αναπτυχθεί στο σύνορο. [εικόνα 1-2]
 - Τα παράθυρα είναι μονόλοβα, δίλοβα ή τρίλοβα. Τουλάχιστον από τη στάθμη της γένεσης των λοβών περιβάλλονται από ανακουφιστικό πλινθόκτιστο τόξο. Βαθμιαία αναπτύσσεται η τάση ώστε οι ποδιές να επενδύονται με μάρμαρο.
 - Στις πόρτες κυριαρχεί το πεταλόμορφο ανακουφιστικό τόξο ως ενίσχυση του ανωφλίου, ενώ δεν σπανίζει η θωράκιση και των λαμπάδων.
 - Το κτίριο διατρέχεται περιμετρικά από πλινθόκτιστα οδοντωτά γείσα και ταινίες, σε χαρακτηριστικές στάθμες, με σκοπό την αρχιτεκτονική του βελτίωση αλλά που συμβάλουν και στην περίδεση του δομήματος. [εικόνα 1-2]
 - Ο Ναός χαρακτηρίζεται από **αρμονική μηχανική συμπεριφορά**:
 - Τα κατακόρυφα φορτία του τρούλου οδηγούνται μέσω των σφαιρικών τριγώνων στους 4 κεντρικούς κίονες.
 - Οι οριζόντιες ωθήσεις του (και τα αδρανιακά του σεισμικά φορτία) παραλαμβάνονται κυρίως από τις ημικυλινδρικές καμάρες των κεραιών του σταυρού.

- Τα κατακόρυφα φορτία των ημικυλινδρικών καμαρών παραλαμβάνονται από τους κεντρικούς κίονες, από τους υπόλοιπους πεσσούς στους οποίους εδράζονται αλλά και από τα τύμπανά τους.
 - Οι οριζόντιες ωθήσεις παραλαμβάνονται από το κέλυφος των παρακείμενων γωνιαίων διαμερισμάτων και καταλήγουν στις εξωτερικές τοιχοποιίες. Οι αδρανειακές πάλι δυνάμεις απάγονται, σε βαθμό αντίστοιχο με την διεύθυνσή τους, από τα γωνιαία διαμερίσματα, από τους πεσσούς έδρασή τους ή από τα τύμπανά τους.
- Η **ιεράρχηση των τριών τύπων διαμερισμάτων** αντανακλάται στην **κλιμάκωσή τους**, με το κεντρικό διαμέρισμα να είναι το πιο ευρύ και ψηλό, τις κεραίες να έπονται και τα γωνιαία διαμερίσματα να υπολείπονται έναντι των άλλων. [εικόνα 1-3]
 - Συνηθίζεται να προστίθεται Νάρθηκας στα δυτικά.
 - Ανατολικά του Κυρίως Ναού τοποθετείται το Ιερό Βήμα, το οποίο συνήθως αποτελείται από 3 παράλληλα διαμερίσματα.
 - Βόρεια η **Πρόθεση**.
 - Νότια το **Διακονικό**.
 - Κεντρικά το **κυρίως Ιερό Βήμα**.
 - Το κυρίως Ιερό Βήμα απολήγει στην **κεντρική κόγχη του Ιερού**.
 - Τα 2 ακραία διαμερίσματα συνήθως απολήγουν σε αντίστοιχες μικρότερες κόγχες.
 - Οι Ναοί του “βυζαντινού ρυθμού” τυπικά είναι χτισμένοι από περίτεχνη τοιχοποιία κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα. [εικόνα 1-2]
 - Με βάση την αμοιβαία σχέση μεταξύ του Ιερού Βήματος και του Κυρίως Ναού, οι ναοί του “βυζαντινού ρυθμού” μπορούν να διακριθούν σε 4 τύπους:
 - **Α. Σύνθετος τετρακίονιος:** Τα 2 κύρια χαρακτηριστικά του Ναού, ο Κύριος Ναός και το Ιερό Βήμα παρατίθενται πλήρη, δηλαδή στην ανατολική πλευρά του σταυρικού τετραγώνου εφάπτεται η δυτική πλευρά του ορθογωνίου του Ιερού Βήματος.
 - **Β. Ημισύνθετος τετρακίονιος:** Το σταυρικό τετράγωνο επεκτείνεται προς Ανατολάς και καταλαμβάνει τμήμα των μπροστά από τις κόγχες ορθογωνίων χώρων του Ιερού, οι δε θόλοι του Ιερού είναι απλώς προεκτάσεις των θόλων των τριών ανατολικών διαμερισμάτων του σταυρικού τετραγώνου. Μερικές φορές δεν παρατηρείται αυτή η επιμήκυνση των ανατολικών διαμερισμάτων του σταυρικού τετραγώνου, οπότε έχουν τις ίδιες διαστάσεις με τα δυτικά αντίστοιχα, αλλά απλά το Ιερό Βήμα διεισδύει στο σταυρικό τετράγωνο καταλαμβάνοντας τμήμα του.
 - **Γ. Απλός τετρακίονιος:** Το Ιερό εισέρχεται στο σταυρικό τετράγωνο καταλαμβάνοντας ολόκληρο το ανατολικό τμήμα του.
 - **Δ. Δικίονιος:** Απλοποιημένη μορφή του απλού τετρακίονιου στην οποία οι 2 ανατολικοί κίονες αντικαθίστανται με πεσσούς.
 - Η ανάπτυξη του “βυζαντινού ρυθμού” στον ελλαδικό χώρο οδήγησε στην διαμόρφωση του λεγόμενου “**ελλαδικού τύπου**”, ο οποίος πήρε την οριστική του μορφή στις αρχές του 11^{ου} αιώνα. Τα κύρια γνωρίσματα του τύπου αυτού είναι:
 - Η στέγαση των γωνιαίων διαμερισμάτων με ημικυλινδρικές καμάρες παράλληλες στο κύριο διάμηκες κλίτος, καταλοιπο της θολωτής βασιλικής .
 - Η συγχώνευση του Ιερού Βήματος με τα ανατολικά διαμερίσματα του σταυρικού τετραγώνου. Μόνο στους *ημισύνθετους* που αριθμούν λίγα μνημεία (όπως και το υπό εξέταση), τα ανατολικά διαμερίσματα δεν καταλαμβάνονται εξ ολοκλήρου από το Ιερό.

- Εξωτερικά περίτεχνη δόμηση κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα τοιχοποιίας. [εικόνα 1-2 κατωτέρω]
- **Αθηναϊκός τρούλος:** Το τύμπανο του τρούλου είναι συνήθως οκτάπλευρο και διακοσμημένο στις γωνίες με μαρμάρινους κιονίσκους. Οι πλευρές του τυμπάνου απολήγουν σε ημικύκλια τα οποία τονίζονται με απλά μαρμάρινα ή πώρινα λοξότμητα γείσα. Σε κάθε πλευρά ανοίγεται κατά κανόνα μονόλοβο παράθυρο. [εικόνα 1-2 κατωτέρω]
- Οι ημικυλινδρικές καμάρες των κεραιών του σταυρού καλύπτονται με δίρριχτες στέγες, ενώ τα γωνιαία διαμερίσματα καλύπτονται αντίστοιχα με μονόρριχτες. Όπως είναι φυσικό, στις απολήξεις των στεγών κυριαρχεί η ευθεία γραμμή και συγκεκριμένα για τις κεραιές του σταυρού, τα τριγωνικά αετώματα. [εικόνα 1-2]



Εικόνα 1-2: Βορειοανατολική άποψη τυπικού “σταυροειδούς εγγεγραμμένου με τρούλο”. Διακρίνονται η βόρεια και η ανατολική κεραιά οι οποίες καλύπτονται από δίρριχτη στέγη και τα εκατέρωθεν γωνιαία διαμερίσματα τα οποία καλύπτονται από μονόρριχτη στέγη, παράλληλη της στέγης του κυρίου διαμήκους κλίτους (της ανατολικής και δυτικής κεραιάς). Ο (εξωτερικός) σχηματισμός του σταυρού εξασφαλίζεται από την προεξοχή των κεραιών (του σε σχέση με τα γωνιαία διαμερίσματα. Ο τρούλος περιλαμβάνει όλα τα γωνίσματα του “αθηναϊκού τρούλου”, οπότε μαζί με την στέγαση των κεραιών και των γωνιαίων διαμερισμάτων, ακολουθεί το πρότυπο του “ελλαδικού τύπου”. Η τοιχοποιία είναι περίτεχνα δομημένη κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα και τα (μονόλοβα) παράθυρα περιβάλλονται εν μέρει ή εν όλω από μονό ή διπλό πλινθόκτιστο τόξο. Οι όψεις σε αρκετές περιοχές διατρέχονται από πλινθόκτιστες οδοντωτές ταινίες. Στην ανατολική όψη εμφανίζονται οι 3 κόγχες του Ιερού Βήματος.



Εικόνα 1-3: Εσωτερικό της Μεταμόρφωσης του Σωτήρος Πλάκας. Τα δυο κύρια κλίτη που ορίζονται από τις ημικυλινδρικές καμάρες και τους πεσσούς έδρασής τους, σχηματίζουν τον εσωτερικό σταυρό. Στη μέση δεσπόζει ο τρούλος και στη βάση του τα 4 λοφία (σφαιρικά τρίγωνα) με τα οποία επιτυγχάνεται η συναρμογή του στις ημικυλινδρικές καμάρες. Μπροστά διακρίνεται ο ένας απ'τους 4 μαρμαρίνους κεντρικούς κίονες.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η αποτύπωση του Ναού στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος υπό την αιγίδα του Ε.Μ.Π.

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος <<Θαλής>>, διενεργήθηκε έργο με την ακροθυμία "SEISMO", υπό την αιγίδα του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Σκοπός του φυσικού αντικειμένου της προτεινόμενης είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς μνημείων και ιστορικών κατασκευών. Η μεθοδολογία θα επιτρέπει την τεκμηρίωση μνημείων και ιστορικών κατασκευών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επιλογή κατάλληλων από άποψη συμβατότητας και αποτελεσματικότητας μεθόδων επέμβασης, ενώ παράλληλα θα οδηγήσει στη διατύπωση προδιαγραφών χρήσιμων τόσο για τους μελετητές, όσο και για τις αρμόδιες Αρχές.

Οι Στόχοι της πράξης είναι:

- Ο περιορισμός της υποκειμενικότητας που εισάγεται στη μελέτη ιστορικών κατασκευών και συνεπώς των εσφαλμένων συμπερασμάτων, λόγω έλλειψη σαφών προδιαγραφών.

- Η συλλογή δεδομένων από δοαφορετικά γνωστικά αντικείμενα σχετικά με παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατασκευών.
- Ο συστηματικός έλεγχος των μέχρι σήμερα υιοθετούμενων πρακτικών.
- Η παραγωγή αξιόπιστων πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία δυστυχώς σπανίζουν στη βιβλιογραφία.

Ειδικότερα στο πλαίσιο της πράξης θα εκτελεστούν οι ακόλουθες Δράσεις:

1. Συντονισμός Πρότασης.
2. Ανάπτυξη και Εφαρμογή Μεθοδολογίας.
3. Γεωμετρική Αποτύπωση.
4. Εκτίμηση Σεισμικού Κινδύνου.
5. Αποτίμηση της επιρροής του εδάφους στην απόκριση του κτιρίου υπό σεισμική καταπόνηση.
6. Επιλογή και Εφαρμογή Συστήματος Παρακολούθησης.
7. Διαγνωστική επί τόπου έρευνα των υλικών και χαρακτηρισμός των δομικών υλικών στο εργαστήριο.
8. Πειραματική Αποτίμηση Χαρακτηριστικών Τοιχοποιίας.
9. Πειράματα στη Σεισμική Τράπεζα.
10. Ανάπτυξη πιθανοτικών προσομοιωμάτων.
11. Εφαρμογή πιθανοτικής Μεθοδολογίας.
12. Αναλυτική Προσομοίωση και Εφαρμογή Μεθοδολογιών Υπολογισμού Σεισμικής Συμπεριφοράς.
13. Μελέτη Εφαρμογής Αντισεισμικής Βάσης Μόνωσης.
14. Αξιολόγηση της Πράξης.

▪ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΕΡΓΟΥ

Ακρωνύμιο:

SEISMO

Θεματική: [Επιστήμες Μηχανικών, Επιστήμες Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών](#)

Συντονιστής: [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο \(ΕΜΠ\)](#)

Επιστημονικός Υπεύθυνος: [Σπυράκος Κωνσταντίνος](#)

Επιστημ. Υπεύθυνος 2ης Ερευνητικής Ομάδας: [Βιντζηλαίου Ελισάβετ](#)

Επιστημ. Υπεύθυνος 3ης Ερευνητικής Ομάδας: [Μοροπούλου Αντωνία](#)

Επιστημ. Υπεύθυνος 4ης Ερευνητικής Ομάδας: [Ψυχάρης Ιωάννης](#)

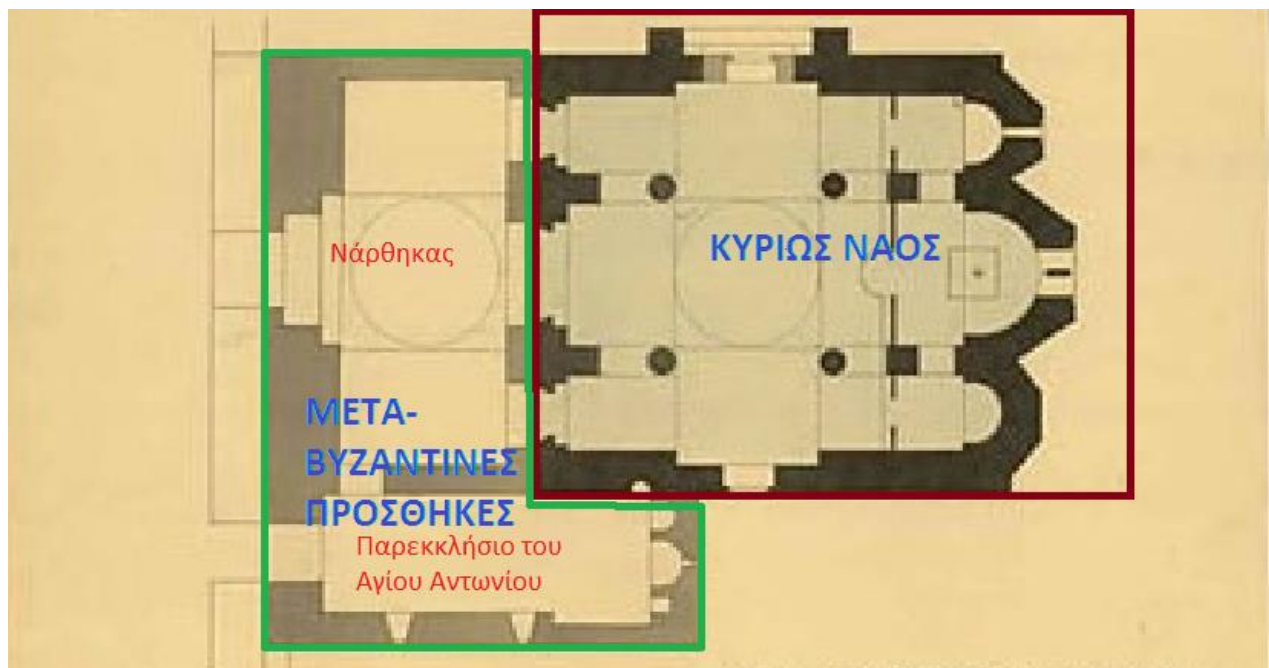
Ένα από τα μνημεία τα οποία απετέλεσαν αντικείμενο έρευνας αυτού του έργου, είναι και το Καθολικόν της Ι.Μ.Καισαριανής και οι σχετικές εργασίες που διενεργήθηκαν, όσον αφορά την γεωμετρική του αποτύπωση και τη διαγνωστική έρευνα επί των δομικών υλικών, [απετετέλεσαν την κύρια πηγή δεδομένων της παρούσας εργασίας.](#)

Τα επιμέρους τμήματα

Το Καθολικόν της Ι.Μ. Καισαριανής ανεγέρθη κατά την πρώτη φάση διαμόρφωσης του μοναστηριακού συγκροτήματος, δηλαδή γύρω στο 1100 μ.Χ.. Ο αρχιτεκτονικός του ρυθμός είναι ο τυπικός για την εποχή, **“Σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο”**, ο επονομαζόμενος και **“βυζαντινός ρυθμός”**. Ως προς τη σχέση μεταξύ του Ιερού Βήματος με τον Κυρίως Ναό, εντάσσεται στον **“Ημισύνθετο τετρακίονιο”** τύπο, ενώ στα χαρακτηριστικά του απαντώνται και αρκετά απ’ τα γνωρίσματα του ενδημικού **“ελλαδικού τύπου”**.

Μεταγενέστερα, κατά τη μεταβυζαντινή εποχή (γύρω στο 1700 μ.Χ.), στη δυτική πλευρά του ναού προστέθηκε ευρύχωρος τριμερής **νάρθηκας** που στο κεντρικό του τμήμα στεγάζεται με

τρούλο και περίπου την ίδια εποχή (πιθανόν παράλληλα), ξεκινώντας από τη νότια πλευρά του Κυρίως Ναού και καλύπτοντας εξ ολοκλήρου τη νότια πλευρά του Νάρθηκα έγινε η προσθήκη του μονόχωρου δρομικού (μονόκλιτου) καμαροσκεπάστου **παρεκκλησίου**. Με τις μεταβυζαντινές προσθήκες, το αρχικό Καθολικόν της βυζαντινής εποχής φτάνει να αποτελεί τον χώρο του Κυρίως Ναού και του Ιερού Βήματος, του επεκταθέντος πλέον Καθολικού, και στο εξής θα αναφέρεται ως *Κυρίως Ναός*. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του κάθε τμήματος ξεχωριστά.



Εικόνα 2-1: Κάτοψη Καθολικού Ι.Μ. Καισαριανής

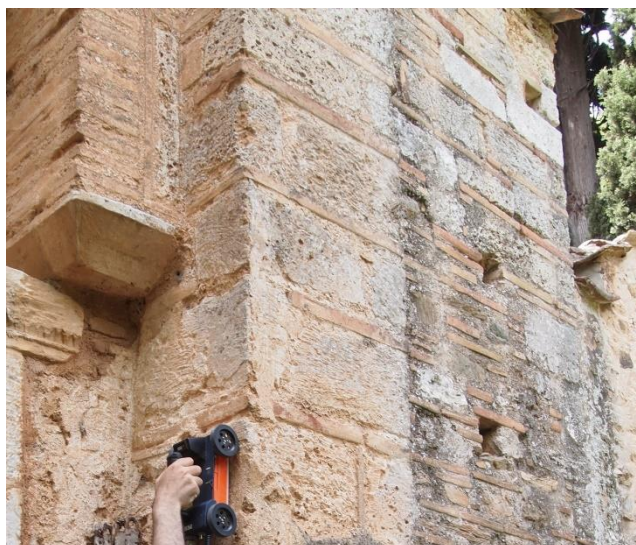
2.2 Ο Κυρίως Ναός

Γενικά γνωρίσματα

Η κάτοψη του Κυρίως Ναού είναι σε αδρές γραμμές τετραγωνική (σταυρικό τετράγωνο) με διαστάσεις 8,12 m x 8,60 m (βλέπε κάτοψη) και έχει συνολικό ύψος 12,00 m (τομές 1,2). Ενώ ως προς τη διεύθυνση Βορρά-Νότου είναι ουσιαστικά συμμετρικός, με το κύριο διάμηκες κλίτος να αναπτύσσεται με κεντρικό άξονα την αντίστοιχη διάμεσο του σταυρικού τετραγώνου, ως ναός "ημισύνθετου τετρακιόνιου" τύπου που είναι, εξεταζόμενος κατά τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης παρουσιάζει ανισομέρεια, καθώς τα ανατολικά διαμερίσματα επεκτείνονται περειαίρω ώστε να στεγάσουν και το μεγαλύτερο μέρος του Ιερού Βήματος.

Το κέλυφος του ναού στην (εμφανή) περιφέρειά του είναι κτισμένο από λαξευμένη ή ημιλαξευτή τρίστρωτη τοιχοποιία, κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα, με λιτό κεραμοπλαστικό διάκοσμο, όμως στο εσωτερικό του αυτό πιθανόν αλλάζει. Στους μεν εσωτερικούς πεσσούς δικαιολογείται περισσότερο η χρήση λαξευτής ή έστω ημιλαξευτής τοιχοποιίας μιας ή δυο αλληλοδιαπλεκόμενων στρώσεων (όπως π.χ. στις παραστάδες της βόρειας όψης -εικόνα 2-2), ενώ το κέλυφος της οροφής συνήθως αποτελείται από μια καλά δομημένη φέρουσα στρώση τοιχοποιίας, συμπληρωμένη με ασθενέστερο υλικό για την

επιθυμητή εξωτερική του διαμόρφωση. Επίσης σε κρίσιμες περιοχές γίνεται η χρήση στοιχείων από μάρμαρο ή υψηλής ποιότητας βυζαντινή οπτοπλινθοδομή, ενώ δεν λείπουν και οι ξύλινοι ελκυστήρες στις γενέσεις κρίσιμων τόξων.



Εικόνα 2-2: Δυτική παραστάδα της βόρειας όψης δομημένη με λαξευμένη πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία 2 αλληλοδιαπλεκόμενων στρώσεων.

Η τρίστρωτη πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία των εξωτερικών τοίχων μέσα στην ποικιλομορφία της μπορεί σε αδρές γραμμές να καταγεί σε 2 κατηγορίες.

- Η **πρώτη κατηγορία** ακολουθεί το **ιδανικό σύστημα πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας**, το οποίο χαρακτηρίζεται από **ισοϋψείς δόμους**, **ισομεγέθη ορθογωνισμένα λίθωσώματα** από **πωρόλιθο** ή **κογχυλιάτες λίθους**, **οπτόπλινθους** πάχους 3-5 cm σε **αδιάσπαστες οριζόντιες στρώσεις** και **ισοπαχείς αρμούς** σε όλη την επιφάνεια του τοίχου μικρότερου πάχους από τα τούβλα, με **αρμολόγημα ίσου βάθους παντού** και με **χρώμα ανάλογο** αυτού των λίθων. Αυτό το είδος τοιχοποιίας απαντάται κυρίως στα **επιφανέστερα** και **υψηλότερα** τμήματα των όψεων του Κυρίως Ναού.
- Η **δεύτερη κατηγορία** αποτελεί **απλούστερη μορφή πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας**, με **πολλά οριζόντια**, **διαφορετικού μήκους τούβλα** στα **κενά** μεταξύ **μη ορθογωνισμένων λιθοσωμάτων** από **πωρόλιθο**, **ασβεστόλιθο**, ή **σχιστόλιθο**.

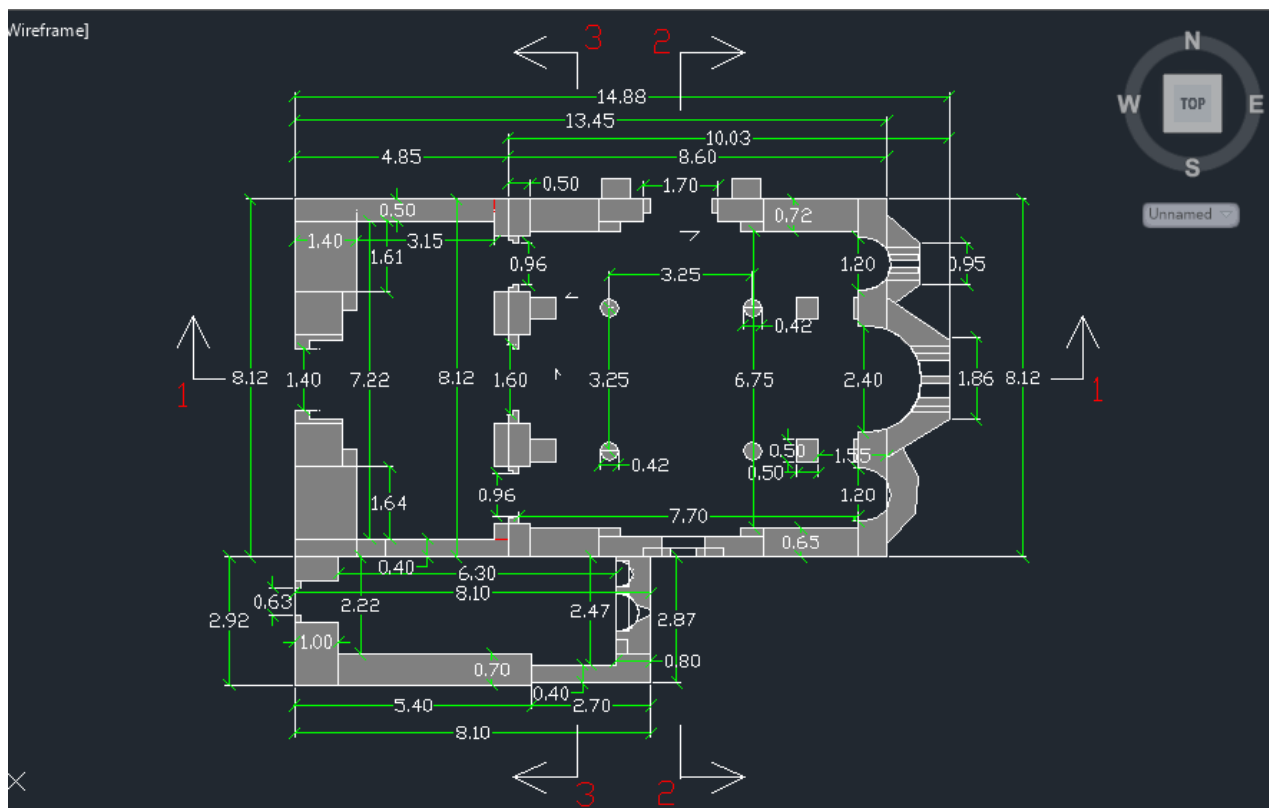
Τέλος αξίζει να σημειωθούν και οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Σύμφωνα με την αποτύπωση που διενεργήθηκε διαπιστώθηκε ότι το κτίριο σε αρκετές περιοχές του έρχεται αντιμέτωπο με **προβλήματα ανερχόμενης και κατερχόμενης υγρασίας**, τα οποία έχουν αφήσει **εμφανή αποτυπώματα** στην τοιχοποιία του ναού και ίσως να έχουν **υπονομεύσει** σε κάποιο βαθμό την **αντοχή** της.
- Η τοιχοποιία του Κυρίως Ναού είναι σε όλη της την έκταση (με εξαίρεση το κέλυφος της οροφής) **διάσπαρτη** με **ορθογωνικές σπές** των **μερικών εκατοστών**, ανά **αποστάσεις ~2,00 m**. Αν και **ορισμένες** που **βρίσκονται** σε **χαρακτηριστικές θέσεις** (π.χ. **γενέσεις τόξων/καμαρών**) θα μπορούσαν να **προορίζονται** για **δοκοθήκες**, η **σκοπιμότητά** τους εν γένει είναι **απροσδιόριστη**.

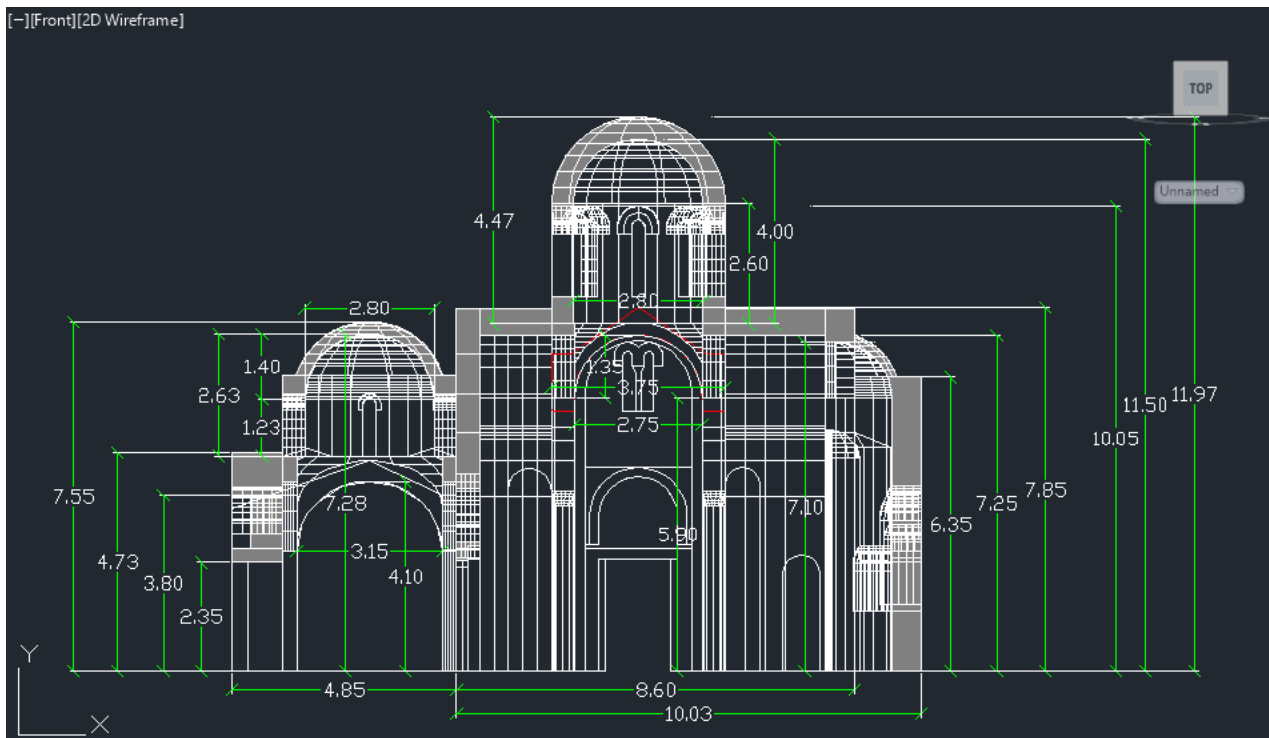
Οι **ημικυλινδρικές καμάρες** που **ορίζουν** τα **2 κύρια κλίτη** του Ναού, οι οποίες **προσδιορίζουν** και τον **αρχιτεκτονικό τύπο** του Ναού, έχουν **περίπου ημιελλειπτική διατομή** και οι **γενέσεις** τους **βρίσκονται** σε **εννιαία στάθμη**, **+5,90 m** πάνω από το **επίπεδο του δαπέδου**, η οποία **εσωτερικά** του ναού **σηματοδοτείται** από **μαρμάρινο γείσο** καθ' **όλην** την **περίμετρο** της τοιχοποιίας. Η **οριζόντια διάμετρος**, που **ορίζει** και το **πλάτος** του **αντίστοιχου κλίτους**, είναι **2,75**

m και για τα 2 κύρια κλίτη, ενώ η κατακόρυφη ακτίνα είναι για αμφότερα τα κλίτη 1,35 m και προστιθέμενη στη στάθμη της γένεσης των καμαρών που είναι +5,90 m, δίνει ένα συνολικό ύψος 7,25 m. Εξωτερικά οι ημικυλινδρικές καμάρες έχουν πλάτη 3,75 m και στεγάζονται από δίρριχτες στέγες, των οποίων η βάση βρίσκεται σε στάθμη +6,85 m και η κορυφαία ακμή σε στάθμη +7,85 m και για τα δυο κλίτη (τομή 3-3).

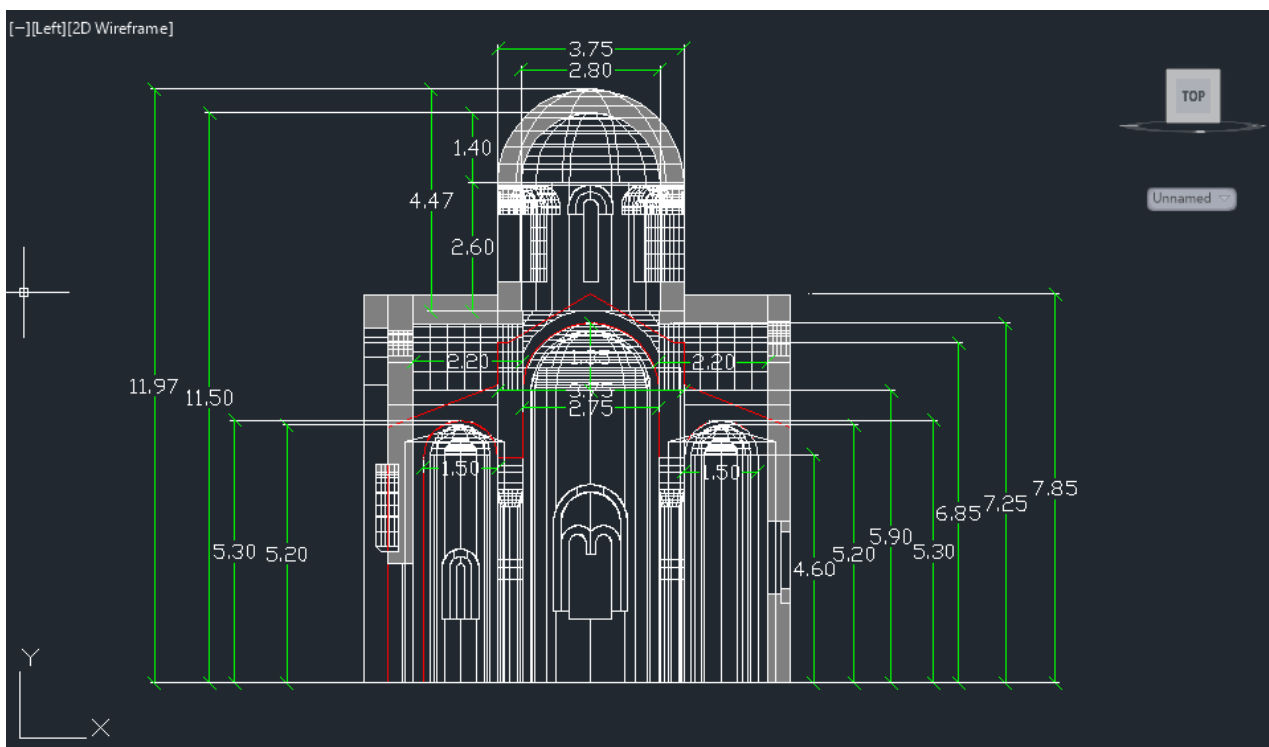
Τα γωνιαία διαμερίσματα έχουν εσωτερικά ύψος 5,30 m και πλάτος 1,50 m, και είναι διαμορφωμένα ως ήθισται στον “ελλαδικό τύπο” του “βυζαντινού ρυθμού”, δηλαδή έχουν τη μορφή δευτερευουσών κλιτών μέσω της στέγασής τους με χαμηλές ημικυλινδρικές καμάρες, ενώ εξωτερικά ακολουθούν την τυπική στον “βυζαντινό ρυθμό” μόρφωση, ήτοι στεγάζονται με μονόριχτη στέγη (τομή 3-3).



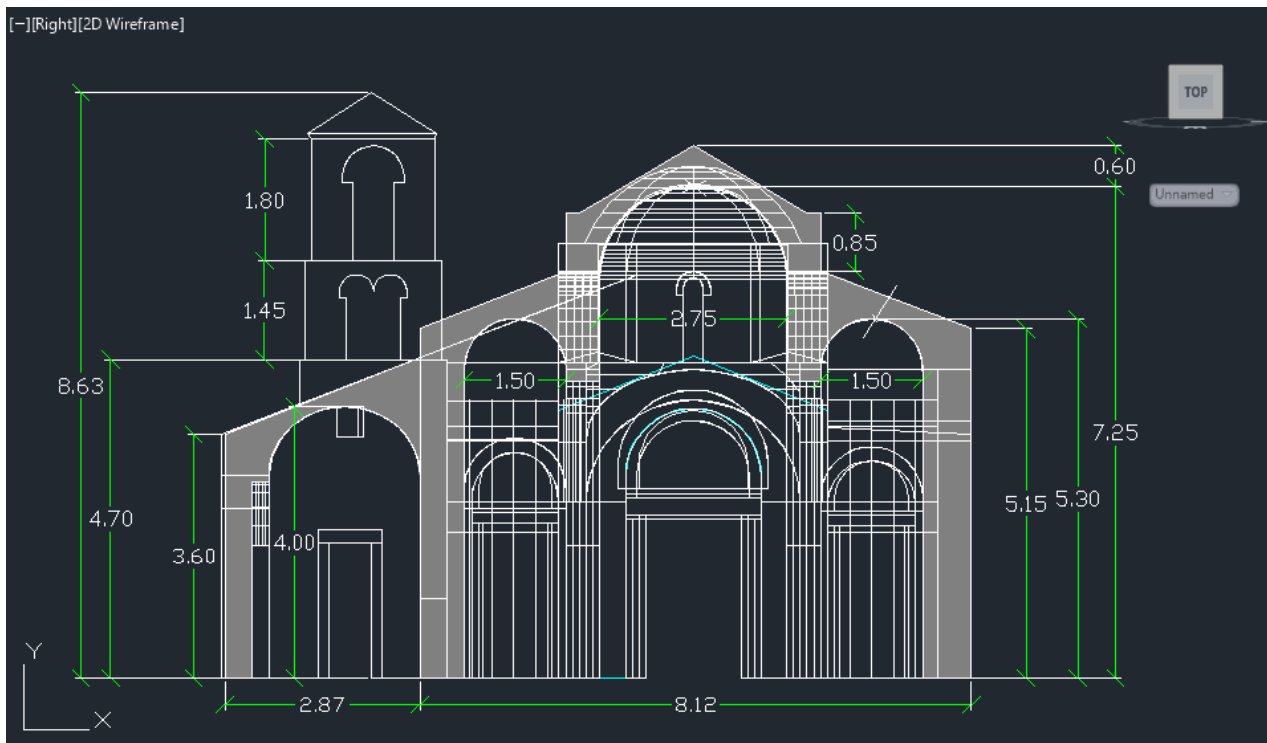
Εικόνα 2-3: Κάτοψη Καθολικού.



Εικόνα 2-4: Τομή 1-1



Εικόνα 2-5: Τομή 2-2



Εικόνα 2-6: Τομή 3-3

Η δυτική πλευρά (όψη και αντίστοιχα διαμερίσματα)

Η δυτική κεραία του Κυρίως Ναού καθώς και τα εκατέρωθεν δευτερεύοντα κλίτη έχουν εσωτερικό μήκος 2,05 m ενώ η τοιχοποιία της δυτικής όψης έχει πάχος 50 cm. Στη δυτική κεραία, ακολουθείται το ιδανικό σύστημα πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας και το ίδιο πιθανότατα ισχύει και για ολόκληρη τη δυτική όψη, κρίνοντας απ' την επιφάνεια που η προσθήκη του Νάρθηκα αφήνει εμφανή και απ' το γεγονός ότι η δυτική πλευρά του Κυρίως Ναού ήταν αρχικά η κύρια πρόσοψη του Καθολικού. Στο τύμπανο της δυτικής κεραίας ανοίγεται η κεντρική είσοδος του Κυρίως Ναού. Το άνοιγμα της εισόδου έχει πλάτος 2,00 m, λαμπάδες κατακόρυφους μέχρι το ύψος των 2,80 m και λοβωτή απόληξη που φτάνει ως τη στάθμη των +3,95 m. Οι λαμπάδες είναι ενισχυμένοι αλλά και συνάμα διακοσμημένοι με περίτεχνους μαρμάρινους ορθοστάτες που ενώνονται σε περίγραμμα σχήματος "Π", με εξ ίσου επιμελημένο μαρμάρينو ζύγωμα που εδράζεται πάνω τους. Το μαρμάρينو περίγραμμα της εισόδου αφήνει πάνω του τη λοβωτή απόληξη του ανοίγματος, η οποία περικαλύπτεται με τόξο ανακούφισης βάθους 30 cm κατασκευασμένο από μια στρώση οπτοπλινθοδομής [εικόνα 2-7]. Εκατέρωθεν της κεντρικής εισόδου υπάρχουν 2 μικρότερες εισοδοί, πλάτους 96 cm η κάθε μία, ανοιγμένες στα τύμπανα των αντιστοιχών δευτερευόντων κλιτών και έχουν ανάλογα χαρακτηριστικά με την κεντρική είσοδο [εικόνα 2-7].



Εικόνα 2-7: Στην εικόνα φαίνεται αριστερά η βόρεια δευτερεύουσα και δεξιά η κεντρική είσοδος του Κυρίως Ναού ειδωμένες από το χώρο του Νάρθηκα. Εδώ γίνεται εμφανές ότι η ανατολική τοιχοποιία του Νάρθηκα και η δυτική τοιχοποιία του Κυρίως Ναού αποτελούν 2 διακριτά σώματα σε επαφή, που τα χωρίζει κατασκευαστικός αρμός. Συγκεκριμένα, φαίνονται (εικόνα δεξιά) οι 2 πεσσοί της ανατολικής τοιχοποιίας του Νάρθηκα, εκατέρωθεν της κεντρικής εισόδου, στους οποίους εδράζεται το ανατολικό τόξο που υποβαστάζει τον τρούλο του Νάρθηκα. Πίσω από αυτό διακρίνεται η τοιχοποιία της αρχικά δυτικής όψης του Κυρίως Ναού η οποία ανήκει στον τύπο της ιδανικής πλινθοπερίκλειστης και το πλινθόκτιστο ανακουφιστικό τόξο που περιβάλλει τον λοβό της κεντρικής εισόδου.

Η νότια πλευρά (όψη και αντίστοιχα διαμερίσματα)

Η νότια κεραία του Κυρίως Ναού έχει εσωτερικό μήκος 2,20 m, το τύμπανό της έχει πάχος 45 cm και η γένεση της ημικυλινδρικής καμάρας σηματοδοτείται από την ύπαρξη μαρμάρινου γείσου το οποίο διατρέχει την νότια κεραία τόσο εσωτερικά, όσο και εξωτερικά και την διαχωρίζει σε δυο διακριτά από άποψη μορφολογίας και υλικού μέρη [εικόνα 2-8]:

- **A)** Το άνω μέρος: Απαρτίζεται από την ημικυλινδρική καμάρα και από το άνω μέρος του τυμπάνου της κεραίας και είναι κατασκευασμένο από ιδανική πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία με τους λίθους που έχουν χρησιμοποιηθεί να είναι κυρίως κογχυλιάτες. Στο τύμπανο ανοίγεται δίλοβο παράθυρο, του οποίου η ποδιά είναι στη στάθμη του μαρμάρινου γείσου και είναι διαμορφωμένο με ανακουφιστικό πλινθόκτιστο τόξο περί τους λοβούς και μαρμάρينو διαχωριστικό κιονίσκο στο κέντρο.
- **B)** Το κάτω μέρος: Αποτελείται ουσιαστικά από το κάτω μέρος του τυμπάνου της νότιας κεραίας και έχει εφαρμοσθεί η απλούστερη μορφή πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας με τη χρήση κυρίως σχιστόλιθων, συμπαγών ιζηματογενών λίθων και ελαχίστων κογχυλιατών λίθων και πωρολίθων. Λίγο κάτω από τη μέση υπάρχει ορθογωνικό παράθυρο με ύψος και πλάτος 1,15 m και 0,60 m αντίστοιχα, περιμετρικά επενδεδυμένο με μάρμαρο.

Η νότια όψη συμπληρώνεται με τις νότιες όψεις των νότιων γωνιαίων διαμερισμάτων, στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί η απλούστερη μορφή πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας και αν και μακροσκοπικά διαφοροποιείται λίγο από την τοιχοποιία του κάτω μέρους του τυμπάνου,

ωστόσο έχουν ίδια σύσταση. Εξάιρεση αποτελεί η τοιχοποιία περί τη ΝΑ γωνία του Κυρίως Ναού, όπου οι λίθοι μοιάζουν περισσότερο με εκείνους της ανατολικής όψης παρά της νότιας και ως προς το υλικό, αλλά και ως προς την καλύτερη λάξευσή τους. Στην ανατολική όψη, όπως αναφέρεται παρακάτω, έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως πωρόλιθοι και κογχυλιάτες λίθοι, τέλεια λαξευμένοι, και μόνο στα χαμηλότερα μέρη κάποιοι συμπαγείς λίθοι.



Εικόνα 2-8: Αριστερά: εσωτερική άποψη του Κυρίως Ναού, όπου αναδεικνύεται ο “εσωτερικός σταυρός”. Στην στάθμη των γενέσεων των ημικυλινδρικών καμαρών διακρίνεται μαρμάρινο γείσο το οποίο διατρέχει όλη την περίμετρο του “εσωτερικού σταυρού”. Χαμηλότερα φαίνονται οι δύο νότιοι κεντρικοί κίονες και γίνεται εμφανής η έλλειψη μονολιθικότητας στη σύνδεσή τους με την ανωδομή, ιδιαίτερα πρόδηλη στον ανατολικό από τους 2. Τέλος, εμφανίζονται οι ξύλινες δοκοί που συνδέουν τους πόδες των πεσσών που εδράζονται στους κεντρικούς κίονες. **Δεξιά:** νότια όψη του Κυρίως Ναού. Το μαρμάρινο γείσο που διατρέχει τον Κυρίως Ναό εσωτερικά, εμφανίζεται και στο εξωτερικό της νότιας κεραιάς και την διαχωρίζει σε 2 ανόμοια μέρη: Το άνω, στο οποίο τηρείται η ιδανική μορφή πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας και στο κάτω που είναι κατασκευασμένο από μια απλούστερη εκδοχή της.

Η βόρεια πλευρά (όψη και αντίστοιχα διαμερίσματα)

Καθότι το δόμημα πρακτικά παρουσιάζει συμμετρία κατά τον άξονα Α-Δ, τα βόρεια διαμερίσματα έχουν όμοια χαρακτηριστικά με τα αντίστοιχα νότια. Έτσι η **βόρεια κεραία** έχει μήκος 2,20 m, τύμπανο πάχους 52 cm και όπως και η νότια διατρέχεται τόσο εσωτερικά, όσο και εξωτερικά από μαρμάρινο γείσο που την διαχωρίζει σε δυο διακριτά από άποψη μορφολογίας και υλικού μέρη [εικόνα 2-9]:

- **A)** Το άνω μέρος: Με ουσιαστικά ίδια χαρακτηριστικά, με το συμμετρικό του άνω μέρος της νότιας κεραίας.
- **B)** Το κάτω μέρος: Στο κάτω μέρος του τυμπάνου υπάρχει ξύλινη θύρα ορθογωνικού σχήματος, με άνοιγμα 1,70 m και ύψος 2,42 m και με μαρμάρινες επενδύσεις στους λαμπάδες και στο ανώφλι της. Μέχρι και το μαρμάρινο ανώφλι, η τοιχοποιία του τυμπάνου εντάσσεται στον 1^ο τύπο, ήτοι ιδανική πλινθοπερίκλειστη. Από τη στάθμη αυτή και για τα επόμενα 1,75 m, από την τρίστρωτη τοιχοποιία απομένει μόνο η εσωτερική της στρώση, πάχους 30 cm, η οποία ακολουθεί κι αυτή το πρότυπο της ιδανικής πλινθοπερίκλειστης. Η έλλειψη των υπολοίπων στρώσεων της τοιχοποιίας αξιοποιείται με την τοποθέτηση πλινθόκτιστου τόξου που εδράζεται σε μαρμάρινα κιονόκρανα τοποθετημένα στην προεσοχή που σχηματίζει το μαρμάρινο ανώφλι της θύρας [εικόνα 2-9]. Πάνω από το τόξο και μέχρι το μαρμάρινο γείσο, η τοιχοποιία επανέρχεται στην αρχική της μορφή και πάχος, με τη χρήση όμως κυρίως ασβεστόλιθων.



Εικόνα 2-9: Αριστερά: βορειοδυτική άποψη της βόρειας όψης του Καθολικού. Εικονίζονται η βόρεια όψη του Νάρθηκα, το βορειοδυτικό γωνιαίο διαμέρισμα, η βόρεια κεραία και στο βάθος ο τρούλος του Κυρίως Ναού. Το σύνορο μεταξύ του Νάρθηκα και του Κυρίως Ναού (συγκεκριμένα του βορειοδυτικού διαμερίσματος) γίνεται εμφανές από την εκατέρωθεν διαφοροποίηση της τοιχοποιίας. Στη βόρεια κεραία φαίνονται οι προεξέχουσες παραστάδες και το μαρμάρινο γείσο που διατρέχει τον Κυρίως Ναό στη στάθμη των γενέσεων των ημικυλινδρικών καμαρών των κεραίων. Πάνω από τη στάθμη αυτή, οι παραστάδες γεφυρώνονται με τόξο σχηματισμένο από άριστα λαξευμένους πωρόλιθους. **Δεξιά:** η βόρεια είσοδος του Κυρίως Ναού. Τοποθετείται στο τύμπανο της βόρειας κεραίας. Στο μαρμάρινο ανώφλι της εδράζεται διακοσμητικό πλινθόκτιστο τόξο. Η τοιχοποιία κάτω από το τόξο αυτό παρουσιάζει "βαθούλωμα". Στην πραγματικότητα, η τοιχοποιία αυτή πιθανόν αποτελεί μόνο την εσωτερική στρώση της τρίστρωτης εξωτερικής τοιχοποιίας και, όπως φαίνεται, ακολουθεί την ιδανική πλινθοπερίκλειστη μορφή.

Εκατέρωθεν της βόρειας εισόδου προεξέχουν **παραστάδες** διατομής 50 x 50 cm, για την κατασκευή των οποίων έχουν χρησιμοποιηθεί καλά λαξευμένοι κογχυλιάτες λίθοι και πωρόλιθοι, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται οπτόπλινθοι κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα δομής. Οι παραστάδες αυτές υψώνονται ευθύγραμμα μέχρι το μαρμάρινο γείσο και

απο εκεί και πάνω ενώνονται με τόξο, που είναι κατασκευασμένο από μεγάλους, άριστα λαξευμένους πώρινους θολίτες [εικόνα 2-9]. Τέλος στη βόρεια όψη των γωνιαίων διαμερισμάτων του καθολικού έχει εφαρμοσθεί η **απλούστερη μορφή πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιίας**, με οριζόντιες, διαφορετικού μήκους οπτόπλινθους στα κενά μεταξύ μη ορθογωνισμένων λίθων. Οι λίθοι που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ασβεστόλιθοι, σχιστόλιθοι, πωρόλιθοι, αλλά διάσπαρτα και κογχυλιάτες, οι οποίοι εμφανίζουν μερική λάξευση.

Η ανατολική πλευρά (όψη, αντίστοιχα διαμερίσματα και το Ιερό Βήμα)

Το ανατολικό τμήμα του κυρίου διαμήκους κλίτους και των εκατέρωθεν αυτού δευτερευόντων έχουν εσωτερικό μήκος 2,05 m, από το οποίο μόνον τα 1,25 m ανήκουν στα ανατολικά διαμερίσματα του Κυρίως Ναού, ενώ το υπόλοιπο καταλαμβάνεται από το **Ιερό Βήμα** (βλέπε κατοψη). Το Ιερό Βήμα οριοθετείται από τη νοητή γραμμή που ορίζει το ζεύγος των πεσσών διατομής 50 x 50 cm, που υπάγονται στο σύστημα έδρασης των ανατολικών ημικυλινδρικών καμαρών, και χωρίζεται από τα ανατολικά διαμερίσματα με καλαίσθητο μαρμάρينو τέμπλο [εικόνα 2-10]. Διαιρείται, ως ήθισται, σε 3 παράλληλα διαμερίσματα από τους εσωτερικούς πεσσούς έδρασης των ανατολικών ημικυλινδρικών καμαρών, και κάθε ένα απ' αυτά επεκτείνεται έως την αντίστοιχη κόγχη.

Οι κόγχες του Ιερού Βήματος έχουν σχήμα ακανόνιστο, το οποίο μόνο αδρομερώς μπορεί να χαρακτηριστεί ημικύλινδρος με τεταρτο-σφαιρική απόληξη, όμως η τομή τους με το επίπεδο του ανατολικού τοίχου του ναού, ήτοι οι "από μέσα" όψεις τους, έχουν περίγραμμα παράλληλο με τις ανατολικές απολήξεις των αντιστοιχών κλιτών και απέχει απ' αυτές μόλις 10 cm [εικόνα 2-10]. Εξωτερικά, τα κελύφη τους έχουν σχήμα τρί πλευρου πρίσματος, με τις ακριανές (και δευτερεύουσες) κόγχες να επικάθηνται στην κεντρική. Η **κεντρική κόγχη του Ιερού** εσωτερικά έχει άνοιγμα 2,40 m και ύψος 7,10 m, ενώ εξωτερικά έχει ύψος 6,35 m μέχρι τη γένεση της ανώτερης οροφής της και συνολικό ύψος 7,25 m (όσο και το συνολικό ύψος στις κύριες καμάρες). Παρομοίως, η **κόγχη της Πρόθεσης** (βόρεια) και η **κόγχη του Διακονικού** (νότια), εσωτερικά έχουν άνοιγμα 1,20 m και ύψος 5,20 m, ενώ εξωτερικά έχουν μέγιστο ύψος 5,15 m.

Τα παράθυρα του Ιερού Βήματος, είναι δύο. Το ένα ανοίγεται στη μεσαία πλευρά της κεντρικής κόγχης και είναι δίλοβο, με διαχωριστικό κιονίσκο στη μέση, ενώ το άλλο ανοίγεται στην μεσαία πλευρά της κόγχης της Πρόθεσης και είναι μονόλοβο. Τα διπλά επάλληλα τόξα του δίλοβου τοξωτού παραθύρου της κεντρικής κόγχης του Ιερού, καθώς και του μονόλοβου της κόγχης της Πρόθεσης, είναι διαμορφωμένα με οπτοπλίνθους ακτινοειδώς διατεταγμένες, μεταξύ των οποίων το κονίαμα λαμβάνει σφηνοειδή μορφή, για να επιτευχθεί η επιθυμητή καμπυλότητα. Η ίδια διαμόρφωση, με οπτοπλίνθους, συνεχίζεται και στις παρειές των ανοιγμάτων προς τα κάτω, μέχρι το ύψος της μαρμάρινης ποδιάς τους [εικόνα 2-11].

Η εξωτερική τοιχοποιία στο σύνολο της ανατολικής όψης, συμπεριλαμβανομένων των πλαϊνών της ανατολικής κεραίας και των κογχών, τουλάχιστον πάνω από το ύψος της ποδιάς των παραθύρων, είναι κατασκευασμένη από ιδανική πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία και διαπιστώθηκε ότι τα λιθοσώματα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της είναι κυρίως πωρόλιθοι, κογχυλιάτες λίθοι και, σε μικρότερο βαθμό, συμπαγείς λίθοι οι οποίοι εντοπίζονται κάτω από το ύψος της ποδιάς των παραθύρων [εικόνα 2-11].



Εικόνα 2-10: Εσωτερική όψη του Ιερού Βήματος. Φαίνονται το μαρμάρινο τέμπλο και η κεντρική κόγχη με το δίλοβο παράθυρό της. Παρατηρείται ότι η κεντρική κόγχη αποτελεί σχεδόν συνέχεια του κύριου διαμήκους κλίτους, με ένα άλμα των 10 cm.



Εικόνα 2-11: Ανατολική Όψη του Καθολικού – Κόγχες του Ιερού Βήματος με τα παράθυρά τους.

Το κεντρικό διαμέρισμα και ο τρούλος

Τέλος, το **κεντρικό διαμέρισμα** του Κυρίως Ναού έχει διαστάσεις 2,75 x 2,75 m, στεγάζεται από τον **κεντρικό τρούλο** και οριοθετείται στις 4 κορυφές του από **4 ολόσωμους μαρμάρινους κυλινδρικούς κίονες**. Το ύψος των κίωνων είναι 3,56 m, η διατομή τους έχει διάμετρο 42 cm και η λειτουργία τους είναι να υποβαστάζουν το “τοξωτό” τετράγωνο που σχηματίζουν οι προς τα μέσα απολήξεις των τεσσάρων ημικυλινδρικών καμαρών. Στο “τετράγωνο” αυτό εδράζεται ο **τρούλος** του Κυρίως Ναού και η **συναρμογή**, μεταξύ της (οριζοντίως κείμενης) κυκλικής βάσης του και των κατακορύφων τόξων του “τοξωτού” τετραγώνου, επιτυγχάνεται μέσω **τεσσάρων λοφίων**, ήτοι κατάλληλα διαμορφωμένων σφαιρικών τριγώνων [εικόνα 2-8].

Οι 4 κίονες συνδέονται με τα κεντρικά τόξα (προκειμένου για τις προς τα μέσα απολήξεις των τεσσάρων ημικυλινδρικών καμαρών, όπως σημειώνεται παραπάνω) με **μαρμάρινα κιονόκρανα “λωνικού”** τύπου. Ωστόσο, εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι το κιονόκρανο τουλάχιστον του νοτιοανατολικού κίονα *έχει υποστεί σημαντική οριζόντια διάρρηξη* [εικόνα 2-8, 2-10], ενώ η ακριβής διαμόρφωση της σύνδεσης των κιονοκράνων και της υπερκείμενης τοιχοποιίας *είναι απροσδιόριστη*, γεγονός που όπως θα φανεί στη συνέχεια δεν άφησε ανεπιρρέαστη την προσομοίωση του δομήματος.

Επίσης, όπως φαίνεται και στις εικόνες 2-8 και 2-10, σε ορισμένες κρίσιμες για τη στατική και δυναμική απόκριση του ναού θέσεις, υπάρχουν **ξύλινοι ελκυστήρες**. Συγκεκριμένα, με ξύλινους ελκυστήρες συνδέονται στη στέψη τους τα κιονόκρανα του ΝΑ με του ΝΔ, του ΝΔ με του ΒΔ και του ΒΔ με του ΒΑ κίονα, ενώ οι ελκυστήρες επεκτείνονται (χωρίς να είναι ξεκάθαρο αν διακόπτεται η συνέχειά τους) και πίσω από τους κίονες, συνδέοντας τις γενέσεις των μικρών, δευτερευόντων τόξων που σχηματίζονται εκεί, από την απόληξη των πεσσών των διαμήκων κλιτών.

Τέλος, ο **κεντρικός τρούλος** έχει διάμετρο 2,80 m, συνολικό ύψος 4,00 m και ύψος τυμπάνου 2,60 m. Το ολικό εσωτερικό ύψος του τρούλου από του δαπέδου είναι 11,50 m, το δε εξωτερικό ολικό του ύψος είναι 11,97 m. Το τύμπανο είναι οκταγωνικό και σε κάθε πλευρά του ανοίγεται μονόλοβο παράθυρο, του οποίου ο λοβός περιβάλλεται από διπλά επάλληλα πλινθόκτιστα τόξα. Παρότι πρόκειται για ελλαδικό και μάλιστα αττικό μνημείο, ο τρούλος δεν ακολουθεί τον “αθηναϊκό τύπο”. Σε αντίθεση με την διακόσμηση των γωνιών με μαρμάρινους κιονίσκους και τις ημικυκλικές απολήξεις των πλευρών του τυμπάνου που τονίζονται με απλά μαρμάρινα ή πώρινα λοξότμητα γείσα, η διαμόρφωση του κεντρικού τρούλου του υπό εξέταση μνημείου είναι σαφώς πιο λιτή. Οι γωνίες του τυμπάνου δεν παρουσιάζουν κανενός είδους διακόσμηση, ενώ οι πλευρές του απολήγουν σε ευθύγραμμο αέτωμα, το οποίο περιτρέχεται από πλινθόκτιστο οδοντωτό γείσο.



Εικόνα 2-12: ΝΑ άποψη του Καθολικού

2.3 Οι μεταβυζαντινές προσθήκες

Γενικά γνωρίσματα

Οι μεταγενέστερες προσθήκες στο αρχικό Καθολικό, δηλαδή ο Νάρθηκας και το παρεκκλήσιο του Αγίου Αντωνίου, αντιστοιχούν σε μεταγενέστερη φάση της ναοδομίας στον ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα στην ναοδομία κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας, και ως εκ τούτου παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από τον Κυρίως Ναό.

- Ο Νάρθηκας έχει ορθογωνική κάτοψη με διαστάσεις 8,12 m x 4,85 m και μέγιστο ύψος 7,85 m.
- Το πλάτος του κατά τη διεύθυνση Β-Ν είναι ταυτόσημο με το αντίστοιχο πλάτος του Κυρίως Ναού και η τοποθέτησή του εφαρμόζει ακριβώς στη δυτική όψη του Κυρίως Ναού, με τις εξωτερικές επιφάνειες της βόρειας και νότιας πλευράς των δυο τμημάτων να αποτελούν κοινή περασιά.
- Η κάτοψη του παρεκκλησίου είναι επίσης ορθογωνική, με διαστάσεις 2,92 m x 8,10 m. Ως βόρειος τοίχος του παρεκκλησίου αξιοποιούνται οι νότιοι τοίχοι του Νάρθηκα και του Κυρίως Ναού (συγκεκριμένα, κυρίως του νοτιοδυτικού γωνιαίου διαμερίσματος, με μικρό μήκος του κεντρικού διαμερίσματος).
- Το γεγονός των διαφορετικών φάσεων κατασκευής του Κυρίως Ναού και των μεταβυζαντινών προσθηκών, είναι πρόδηλο και από τους μεταξύ τους εμφανείς αρμούς [εικόνα 2-6, 2-8].
- Αντιθέτως, μεταξύ του Νάρθηκα και του παρεκκλησίου δεν παρατηρείται κανένα εμφανές ίχνος αρμού, πράγμα που υποδεικνύει είτε ότι κτίστηκαν μαζί, είτε, ακόμα κι αν κτίστηκαν σε διαφορετικές φάσεις, ότι οι κατασκευαστές φρόντισαν να διαμορφώσουν τη **συνέχεια της δόμησης του υλικού** και να απαλείψουν την παρουσία αρμού σε

μεγάλο βαθμό. Όποια από τις δυο παραπάνω εκδοχές κι αν αληθεύει, οι προσθήκες του Καθολικού αποτελούν στην ουσία ένα **συνεχές οικοδόμημα** μεταξύ τους και προσομοιώθηκαν αναλόγως.

- Οι τοίχοι του νάρθηκα καθώς και του παρεκκλησίου του Αγίου Αντωνίου είναι κατασκευασμένοι από αργολιθοδομή, κυρίως από ασβεστόλιθους και σχιστόλιθους και λιγότερους πωρόλιθους, μικρού μεγέθους και ακανόνιστου σχήματος, με ελάχιστα τεμάχια κεραμικών τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί εμβόλιμα, ως τσιβίκια.
- Στο αυθεντικό, αρχικό κονίαμα δόμησης, στις θέσεις που είναι ορατό λόγω αποκόλλησης του νεώτερου ή μεταγενέστερου επιχρίσματος, είναι εμφανής και η ύπαρξη συσσωματωμάτων ασβέστη, ένδειξη της χαμηλότερης ποιότητας στην παρασκευή των κονιαμάτων κατά την εποχή της τουρκοκρατίας. Παράλληλα, υπάρχει πληθώρα κονιαμάτων συμπλήρωσης, κάποια εκ των οποίων είναι τσιμεντιτικά, προκαλώντας προβλήματα ασυμβατότητας, ειδικά όσον αφορά τη μεταφορά υγρασίας. Το επίχρισμα, το οποίο εφαρμόστηκε στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, έχει αποκολληθεί κατά περιοχές και εμφανίζεται διογκωμένο, ευρισκόμενο σε κακή κατάσταση διατήρησης.

Ο Νάρθηκας

Ο Νάρθηκας, όπως ήδη έχει αναφερθεί, έχει ορθογωνική κάτοψη με εξωτερικές διαστάσεις 8,12 m X 4,85 m και αντίστοιχες εσωτερικές 7,22 m x 3,15 m (βλέπε κάτοψη). Μπορεί να λεχθεί ότι η εσωτερική του διαμόρφωση αποτελείται από 3 μέρη. Τα δυο ακραία μέρη έχουν μήκος 1,60 m και 1,65 m (βόρειο και νότιο αντίστοιχα) και στεγάζονται από ημικυλινδρική καμάρα, της οποίας η γένεση βρίσκεται στη στάθμη των +2,60 m και η άντυγα στη στάθμη των +4,10 m. Στο βόρειο διαμέρισμα, η οροφή έχει τη μορφή δίρριχτης στέγης, ενώ στο νότιο, στην αντίστοιχη θέση του ανατολικού κεκλιμένου επιπέδου έχει προστεθεί υλικό πλήρωσης ώστε η εκεί στέγαση να αποτελεί συνέχιση της στέγης του παρεκκλησίου [εικόνες 1-1, 2-8].

Στο κεντρικό διαμέρισμα ο δυτικός τοίχος **πάχους 140 cm** παρουσιάζει εσοχή κατά 30 cm, η οποία επικαλύπτεται με τοξοτή μορφή ίδιων χαρακτηριστικών με τους ημικύλινδρους στέγασης των ακραίων τμημάτων [εικόνα 2-13]. Αντίστοιχα, στη βόρεια πλευρά του Νάρθηκα, η οποία βρίσκεται σε επαφή με την δυτική τοιχοποιία του Κυρίως Ναού, οι 2 πεσσοί εκατέρωθεν της κεντρικής εισόδου του Κυρίως Ναού ενώνονται με τόξο αντικατοπτρικό του νότιου [εικόνες 2-6, 2-13] διαμορφώνοντας έτσι ένα υποτυπώδες εγκάρσιο (κατά τη διεύθυνση Α-Δ) κλίτος διασταυρούμενο με το κύριο διάμηκες. Στη διασταύρωση αυτή, η οποία οριοθετεί το κεντρικό διαμέρισμα, προσαρμόζονται **4 λοφία** (σφαιρικά τρίγωνα) στα οποία γίνεται η συναρμογή και η ανάπτυξη του τρούλου του Νάρθηκα ο οποίος στεγάζει το κεντρικό διαμέρισμα [εικόνα 2-13]. Στη δυτική πλευρά του κεντρικού διαμερίσματος του Νάρθηκα ανοίγεται η **κεντρική είσοδος του Ναού** [εικόνα 1-1]. Το σχήμα της είναι ορθογωνικό με άνοιγμα 1,40 m και ύψος 2,35 m και η περίμετρος της είναι επενδεδυμένη με μαρμάρινους ορθοστάτες και υπέρθυρο.



Εικόνα 2-13: Εσωτερικό του Νάρθηκα.

Η **πρόσοψη** του Νάρθηκα, στα ακραία διαμερίσματα χαρακτηρίζεται από το ευθύγραμμο αέτωμα σε ύψος 3,50 m στο οποίο απολήγει η επίπεδη στέγη, ενώ το κεντρικό διαμέρισμα στη δυτική του πλευρά είναι εξωτερικά μορφωμένο με στέγαση δίρριχτη στέγη μπροστά απ' τον τρούλο που απολήγει σε τριγωνικό διαμέρισμα. Ακριβώς πάνω από το μαρμάρινο ανώφλι της εισόδου, στην πλευρά της πρόσοψης ανοίγεται ημικυκλική εσοχή βάθους 40 cm, ενισχυμένη περιμετρικά με πλινθόκτιστο τόξο και καλύπτεται από περίτεχνο γυάλινο πέτασμα στο οποίο σχηματίζεται το σχήμα του σταυρού [εικόνα 1-1].

Τέλος ο **τρούλος** του Νάρθηκα έχει επίσης οκταγωνικό τύμπανο, με εσωτερική διάμετρο 2,80 m και στις πλευρές του, οι οποίες είναι προσανατολισμένες προς τα 4 σημεία του ορίζοντα, ανοίγονται μονόλοβα παράθυρα [εικόνα 2-14].

Το παρεκκλήσιο του Αγίου Αντωνίου

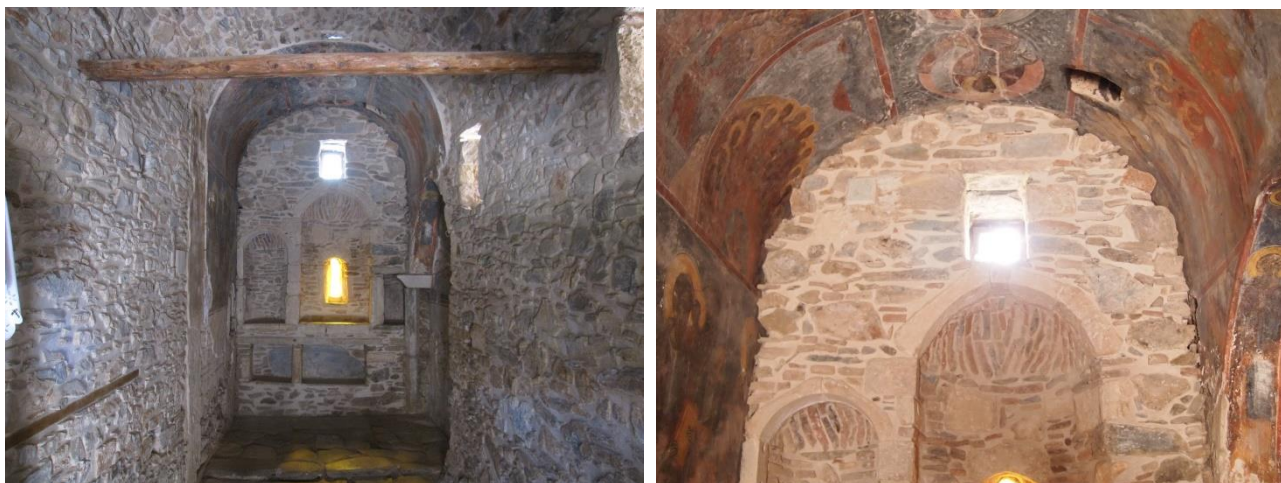


Εικόνα 2-14: Νοτιοδυτική άποψη του Καθολικού όπου φαίνεται η πρόσοψη του παρεκκλησίου του Αγίου Αντωνίου, ο τρούλος του Νάρθηκα και πίσω δεσπόζει ο τρούλος του Κυρίως Ναού.

Το παρεκκλήσιο του Αγίου Αντωνίου, όπως ήδη έχει αναφερθεί, έχει ορθογωνική επίσης κάτοψη με εξωτερικές διαστάσεις 2,92 m x 8,10 m και αντίστοιχες εσωτερικές 2,22 m x 6,30 m (βλέπε κάτοψη). Το εσωτερικό του ύψος είναι 4,00 m. Είναι “μονόκλιτο”, στεγαζόμενο από ημικυλινδρική καμάρα η οποία εξωτερικά είναι διαμορφωμένη ως μονόριχτη στέγη. Όπως φαίνεται και στη φωτογραφία [εικόνα 2-15], στην τοιχοποιία της βόρειας πλευράς (στην πραγματικότητα πρόκειται για τον νότιο τοίχο του Νάρθηκα) υπάρχει εμφανής ξυλοδεσιά και, ακριβώς από πάνω, ξύλινος ελκυστήρας που συνδέει τις γενέσεις της ημικυλινδρικής καμάρας του παρεκκλησίου. Η τοιχοποιία της δυτικής όψης του παρεκκλησίου είναι ιδιαίτερα παχιά, όπως και στο Νάρθηκα, και το πάχος της είναι 100 cm (αντίστοιχα στο Νάρθηκα είναι 140 cm). Εκεί ανοίγεται η είσοδος του παρεκκλησίου, της οποίας η εξωτερική περίμετρος επενδύεται με μαρμάρινους ορθοστάτες και υπέρθυρο. Πάνω από την είσοδο υπάρχει φεγγίτης, ο οποίος, μαζί με τα δύο παράθυρα της νότιας όψης και το παράθυρο στην ανατολική πλευρά αποτελούν τις πηγές φυσικού φωτισμού του χώρου [εικόνες 2-14, 2-15 και 2-16]

Επίσης στην πρόσοψη του παρεκκλησίου έχει προστεθεί “διόροφο” επίπεδο κωδωνοστάσιο το οποίο αποτελεί αρκετά μεταγενέστερη προσθήκη που χρονολογείται τον 19^ο αιώνα. Είναι κατασκευασμένο από αργολιθοδομή, με χρήση κυρίως ασβεστόλιθων μερικώς κατεργασμένων και ενίοτε μεγάλων διαστάσεων, και τα τόξα που γεφυρώνουν τους δυο κύριους στύλους του είναι διαμορφωμένα με τη βοήθεια πλινθόκτιστων τόξων και μαρμάρινων κιονίσκων [εικόνα 2-14]

Από ότι φαίνεται, το παρεκκλήσιο αρχικά εκτεινόταν κατά 2,6 m προς τα ανατολικά, επί πλέον. Παράλληλα, στην ανατολική πλευρά του εσωτερικού χώρου η ύπαρξη σπαραγμάτων τοιχογραφίας σε θέσεις που δεν μπορούν να αντιστοιχούν, είναι ένδειξη πως τα δομικά υλικά της τοιχοποιίας της ανατολικής όψης είναι δεύτερης χρήσης και προέρχονται από άλλη θέση και γίνεται εμφανές ότι το τμήμα αυτό της τοιχοποιίας προστέθηκε μεταγενέστερα. [εικόνα 2-15] Επιπλέον, η κατακόρυφη εσοχή που υπάρχει στη νότια όψη του παρεκκλησίου, ίσως υποδηλώνει κάποια παλαιότερη οικοδομική φάση, κατά την οποία το παρεκκλήσιο έφθανε ως το σημείο αυτό, ενώ ίσως αργότερα προεκτάθηκε προς τα δυτικά. Εξάλλου, η εσοχή αυτή βρίσκεται ακριβώς πάνω στην προέκταση του δυτικού τοίχου του καθολικού, ο οποίος σήμερα αποτελεί τον ενδιάμεσο με το Νάρθηκα τοίχο, [εικόνα 2-16].



Εικόνα 2-15: Το εσωτερικό του παρεκκλησίου του Αγίου Αντωνίου. Δεξιά γίνεται εμφανές ότι ο ανατολικός τοίχος του παρεκκλησίου αποτελεί μεταγενέστερη προσθήκη.



Εικόνα 2-16: Δυτική όψη του παρεκκλησίου του Αγίου Αντωνίου. Η εσοχή που διακρίνεται βρίσκεται στην προέκταση του δυτικού τοίχου του Κυρίως Ναού και είναι πιθανόν κατάλοιπο παλαιότερης οικοδομικής φάσης κατά την οποία εκεί βρισκόταν το δυτικό όριο του παρεκκλησίου.

3 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Λίγα λόγια για την τοιχοποιία

Η τοιχοποιία ως δομικό υλικό

Η **τοιχοποιία** θα μπορούσε να ορισθεί ως το σύνθετο υλικό που αποτελείται από ένα σύμπλεγμα δομικών μονάδων (τοιχοσώματα) συνδεδεμένα μεταξύ τους με η χωρίς τη χρήση συνδετικών υλικών (κονίαμα).

Η τοιχοποιία είναι ένα από τα αρχαιότερα δομικά υλικά, και το πλέον διαδεδομένο στις πιο πολλές περιοχές του κόσμου μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Τότε, η αλματώδης ανάπτυξη της

τεχνολογίας συνεπέφερε την εμφάνιση νέων ισχυρών και εύπλαστων υλικών, (χάλυβας, σκυρόδεμα) που μείωσαν το κόστος του φέροντος οργανισμού, αυξάνοντας ταυτοχρόνως την φέρουσα ικανότητά του, την ταχύτητα ανέγερσής του και τις σχεδιαστικές επιλογές του μηχανικού (λόγω δυνατότητας διαμόρφωσης κτιρίων μεγάλου ύψους, μεγάλων ανοιγμάτων κλπ). Έτσι η τοιχοποιία περιορίστηκε βαθμιαία στο ρόλο του οργανισμού πλήρωσης. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια η παραπάνω τάση έχει αρχίσει έστω και αμυδρά να αντιστρέφεται, διότι πλέον ανακαλύπτονται εκ νέου τα πλεονεκτήματα των κατασκευών από τοιχοποιία τα οποία είναι:

- **Η αισθητική της υπεροχής.** Η τοιχοποιία από φυσικά λιθοσώματα είναι ένα υλικό που σε κατοίκους χώρων όπως η Ελλάδα τους εγείρει την αίσθηση του οικείου, καθώς τους συνδέει με τις ρίζες τους, εναρμονίζεται άψογα με το φυσικό περιβάλλον και κατά γενικήν ομολογία είναι παράγοντας που αναβαθμίζει την καλαισθησία ενός δομικού έργου.
- **Μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο.** Μία σωστά σχεδιασμένη και κατασκευασμένη με υλικά καλής ποιότητας κατασκευή από τοιχοποιία μπορεί να έχει διάρκεια ζωής πάνω από 500 έτη σε σύγκριση με τα 30-100 έτη που αποτελούν τη συνήθη διάρκεια ζωής των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα και δομικό χάλυβα.
- Μεγάλη θερμοχωρητικότητα που προσφέρει **θερμομόνωση και πυρασφάλεια.**
- **Μειωμένο κόστος συντήρησης** το οποίο προκύπτει από τον αργό ρυθμό γήρανσης των συστατικών της μερών (λιθοσώματα, κονίαμα) καθώς και από τη δυνατότητα διατήρησης «εμφανούς» της πέτρας στις όψεις του κτιρίου, οπότε σε μία τέτοια περίπτωση είναι περιττή η επίχριση και η βαφή τους.

Όστόσο δεν παύει να είναι ένα υλικό που δεν στερείται σοβαρών μειονεκτημάτων. Πράγματι, σε κάθε μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους σεισμό, στον Ελλαδικό χώρο αλλά και παγκόσμια, διαπιστώνεται η υψηλή ευπάθεια των κτισμάτων από φέρουσα τοιχοποιία.

Η αδυναμία αυτή μπορεί να αποδοθεί σε μία σειρά από λόγους όπως:

- Τα **σχετικά πτωχά της μηχανικά χαρακτηριστικά και ιδίως η πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας** χωρίς οπλισμό ή περίδεση (ξυλοδεσιές, διαζώματα)
- Η **ψαθυρότητα** της.
- Η συχνά ανεπαρκής διαφραγματική λειτουργία πατωμάτων και στεγών.
- Η συχνά ανεπαρκής σύνδεση μεταξύ διασταυρούμενων τοίχων
- Οι κατά καιρούς ατυχείς επεμβάσεις τροποποιήσεις και προσθήκες
- Οι κάθε είδους κακοτεχνίες.

Έτσι η τριβή με τη μηχανική της τοιχοποιίας αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό εφόδιο για ένα μηχανικό που δραστηριοποιείται στις περιοχές αυτές, αλλά και για κάθε μηχανικό γενικότερα. Εντούτοις, οι γνώσεις μας για τη μηχανική συμπεριφορά και την απόκριση κτιρίων από τοιχοποιία είναι σχετικά περιορισμένες. Το οξύμωρο αυτό σχήμα μπορεί να αποδοθεί στους ακόλουθους λόγους:

- Η ανάπτυξη της επιστήμης της μηχανικής και των συναφών υπολογιστικών μέσων συνέπεσε με τη σταδιακή περιθωριοποίηση της τοιχοποιίας ως δομικό υλικό.
- Πρόκειται για ένα υλικό «**απείθαρχο**». Οι ιδιότητες των συστατικών του μερών (τοιχοσώματα, κονίαμα) κατά κανόνα παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια και διασπορά. Επίσης η ποικιλία που απαντάται στα χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, όπως

το υλικό, το σχήμα και η διάταξη των λιθοσωμάτων, τα χαρακτηριστικά του κονιάματος που ενδεχομένως να μην υπάρχει –περίπτωση ξηρολιθοδομής-, ο τρόπος δόμησης κατά το πάχος του τοίχου κλπ, συνεπάγεται την απέραντη πολυτυπία και πολυμορφία της. Ακόμη αποτελεί ένα υλικό σαφώς πολυφασικό που μόνο μακροσκοπικά μπορεί να θεωρηθεί ενιαίο. Όμως ακόμα και τότε η συμπεριφορά της χαρακτηρίζεται εν γένει από:

- **Ανισοτροπία** τόσο ως προς τις αντοχές της όσο και ως προς τον καταστατικό της νόμο.
 - Ευαισθησία στα **φαινόμενα κλίμακας**.
 - **Ψαθυρότητα**.
 - **Μη γραμμικότητα**, κυρίως μετά τη ρηγμάτωση, η οποία είναι δύσκολο να προσδιορισθεί και να ποσοτικοποιηθεί.
 - Τέλος σε αντίθεση με τα σύγχρονα υλικά τα οποία συνθέτουν κατά κύριο λόγο ραβδόμορφους φορείς, η φέρουσα τοιχοποιία σχηματίζει κατασκευές των οποίων η γεωμετρία καθιστά απαγορευτική την προσομοίωσή τους με ραβδόμορφα στοιχεία και επιβάλλει την **προσομοίωσή τους ως επιφανειακών η ακόμη και τρισδιάστατων φορέων**. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει σημαντικά την υπολογιστική της αντιμετώπιση.
- Η εκτεταμένη πολυμορφία και πολυτυπία του υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη δυσκολία προτυποποίησης υλικών και μεθόδων, γεγονός που αποτελεί τροχοπέδη στην ανάπτυξη της διεθνούς συνεργασίας για την έρευνα της συμπεριφοράς του.

Σε αντίθεση με παλαιότερα, στις μέρες μας η μηχανική της τοιχοποιίας γνωρίζει αξιόλογη ανάπτυξη, ιδίως σε χώρες που συνδυάζουν υψηλή σεισμική δραστηριότητα με εκτεταμένο υφιστάμενο δομικό πλούτο κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, στα οποία περιλαμβάνονται μνημεία υψηλής πολιτιστικής αξίας, ανάμεσα στις οποίες συγκαταλέγεται και η Ελλάδα. Τα τελευταία χρόνια συνάμα με την επαναδιαπίστωση των πλεονεκτημάτων της τοιχοποιίας ως δομικό υλικό, παρατηρείται διεθνώς έντονη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για τη συντήρηση και ανάδειξη της οικιστικής και πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσα στο κλίμα αυτό τέθηκε σε κίνηση και η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των μνημείων και διατηρητέων κτιρίων και συνόλων είναι κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία.

Συμπεριφορά κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία

A) **Υπό στατικά φορτία**. Τα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία αποτελούνται από κατακόρυφους τοίχους και πεσσούς ενώ τα ανοίγματα καλύπτονται από οριζόντια φέροντα στοιχεία, τα οποία είναι κατασκευασμένα είτε από άλλα υλικά (π.χ. ξύλινα πατώματα, ζευκτά, πλάκες ΩΣ), είτε από τοξωτές-κελυφοειδείς μορφές κατασκευασμένες και αυτές από φέρουσα τοιχοποιία και τοποθετημένες περί την γραμμή ωθήσεων (π.χ. τόξα, αψίδες, θόλοι). Ως εκ τούτου, η απόκριση των κτιρίων αυτών υπό στατικά φορτία είναι λίγο πολύ σαφής και βασίζεται στην απαγωγή των φορτίων μέσω θλιπτικών τάσεων.

B) **Υπό σεισμικές δράσεις**. Σε αντίθεση με τη στατική τους λειτουργία (υπο στατικά φορτία) η σεισμική απόκριση κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία δεν μπορεί να ορισθεί με σαφήνεια. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η λειτουργία αυτών των κτιρίων υπό οριζόντια φόρτιση (και εν προκειμένω σεισμική φόρτιση) βασίζεται στην **κιβωτιοειδή τους λειτουργία**, δηλαδή στην ικανότητά τους να λειτουργούν ως ενιαίο σώμα, όπου οι τοίχοι που δέχονται εγκαρσίως ως προς αυτούς τις αδρανειακές σεισμικές δυνάμεις μπορούν να «στηρίζονται» στους κάθετους ως προς αυτούς τοίχους με τους οποίους είναι συνδεδεμένοι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τοιχοποιίες να απαλλάσσονται από μεγάλες τιμές καμπτικών ροπών (M) και τεμνουσών (V) που δρουν εκτός του επιπέδου τους και έναντι των οποίων διαθέτουν πενιχρή αντοχή και τελικά οι σεισμικές

δράσεις απάγονται κυρίως μέσω του επιπέδου των τοιχοποιιών έντασης (M,V), έναντι της οποίας διαθέτουν σχετικά καλή αντοχή και μεγάλη **στερρότητα**. Για να συμβεί το παραπάνω θα πρέπει να αποφεύγονται οι αστοχίες των συνδέσεων μεταξύ τοίχων, πράγμα που οδηγεί στην αμοιβαία αποκόλλησή τους. Ιδιαίτερως χρήσιμη είναι επίσης η **διαφραγματική λειτουργία των πατωμάτων** και η **καλή τους σύνδεση με την τοιχοποιία**.

Η επιρροή της μορφολογίας: Η μορφολογία ενός δομήματος είναι ένας απ' τους βασικούς παράγοντες καθορισμού της σεισμικής του απόκρισης, και για τα κτίρια από τοιχοποιία είναι ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας. Μια μόρφωση κτιρίου που διέπεται από **κανονικότητα** (κυρτότητα σχήματος σε κάτοψη και σε τομή, ομοιομορφία κατανομής μαζών, αντοχών και δυσκαμψιών, απλότητα, συμμετρία) τείνει να εξασφαλίσει στο κτίριο σεισμική απόκριση στην οποία προέχει η (σχετικώς) επιθυμητή μεταφορική ταλάντωση. Αντιθέτως, οι έντονες **μή κανονικότητες** της μορφολογίας, οδηγούν το κτίριο σε σεισμική απόκριση με ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά, πχ στρεπτικές ταλαντώσεις και συγκεντρώσεις έντασης και παραμόρφωσης, έναντι των οποίων ένα κτίριο από τοιχοποιία αδυνατεί να ανταπεξέλθει.

Διαζώματα –ελκυστήρες: Τα διαζώματα και οι ελκυστήρες αποτελούν σημαντικά δομικά στοιχεία που ασκούν καθοριστική επιρροή στην απόκριση των κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία υπό οριζόντια (σεισμικά) φορτία.

- **Ελκυστήρες:** Μεταλλικά ή ξύλινα ραβδόμορφα στοιχεία που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των γενέσεων τοξοτών ή θολοτών μορφών και αψίδων, με σκοπό να παραλάβουν τις πλευρικές ωθήσεις που προκύπτουν από τη στατική λειτουργία των παραπάνω μορφών και να τις απαλλάξουν από τις ιδιαίτερα επίπονες οριζόντιες μεταμορφώσεις.
- **Διαζώματα (ή Ξυλοδεσιές):** Πρόκειται για επιμήκη στοιχεία από υλικά με εφελκυστική αντοχή (ξύλο, χάλυβας, ΩΣ) μέσα στο σώμα της τοιχοποιίας, συνήθως σε οριζόντια διάταξη σε χαρακτηριστικές στάθμες (π.χ. ανώφλια). Υπάρχουν είτε διακοπτόμενα είτε διατρέχοντας όλη την περίμετρο του κτιρίου χωρίς διακοπή. Η λειτουργία τους ενεργοποιείται *κατά κύριο λόγο μετά την ρηγμάτωση*, όπου επιστρατεύοντας την εφελκυστική τους αντοχή **αυξάνουν τις δυνατότητες ανακατανομής της έντασης** και εφόσον περιδένουν το κτίριο **κρατάνε τους τοίχους ενωμένους εξασφαλίζοντας την κιβωτιοειδή του λειτουργία**. Δευτερεύοντες ρόλοι των διαζωμάτων είναι ο περιορισμός της διάδοσης ρωγμών, η καμπτικο-εφελκυστική θωράκιση των ανωφλίων των ανοιγμάτων και η περίσφιξη που προσφέρουν στα τμήματα τοιχοποιίας που περιβάλλουν.

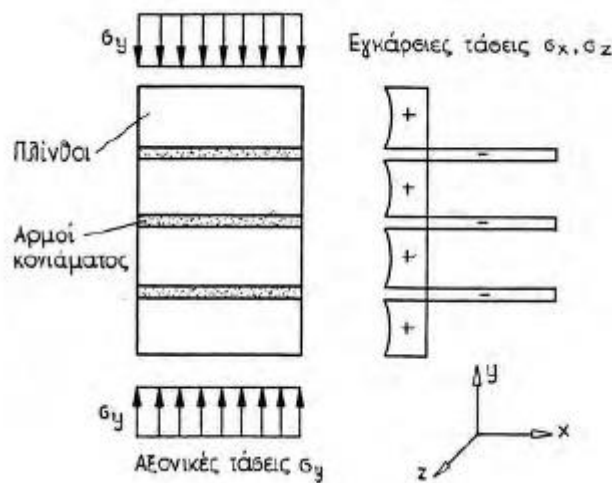
3.2 Στοιχεία μηχανικής της τοιχοποιίας

Θλιπτική αντοχή

- Η υψηλή θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μηχανικά της χαρακτηριστικά καθόρισε και τη χρήση της ως κυρίως θλιβόμενου φέροντος δομικού στοιχείου.
- Τόσο η αντοχή όσο και ο μηχανισμός αστοχίας επηρεάζονται έντονα από τη γωνία της θλιπτικής δύναμης ως προς τη διεύθυνση των οριζόντιων αρμών (ανισοτροπία). Κατά προσέγγιση η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς

είναι το 60% της αντοχής της κάθετα στους οριζόντιους αρμούς εκτός και αν η τοιχοποιία είναι αργολιθοδομή με μικρούς λίθους και μεγάλη ποσότητα κονιάματος. Τότε παρατηρείται μειωμένη ανισοτροπία.

- Η τοιχοποιία καταπονούμενη σε θλίψη κάθετα στους αρμούς αστοχεί συνήθως απο εγκάρσια ρηγματώση των τοιχοσωμάτων, γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στα τοιχοσώματα σε οριζόντιες *Type equation here*. διευθύνσεις. Οι τάσεις αυτές προκαλούνται απο το συμβιβαστό των μεγάλων εγκαρσίων παραμορφώσεων του κονιάματος των αρμών με τις μικρότερες των τοιχοσωμάτων, με αποτέλεσμα την (ευεργετική) εγκάρσια περίσφιξη για το κονίαμα και αντιστρόφως, την υπονομευτική ετερόσημη 3-αξονική καταπόνηση για το λιθόσωμα (Σχ. 1.1).
- Ως εκ τούτου στη συνήθη περίπτωση που $f_{bc} > f_{mc}$ ισχύει ότι $f_{bc} > f_{wc} > f_{mt}$ όπου f_{bc} , f_{wc} και f_{mc} οι θλιπτικές αντοχές του λιθοσώματος, της τοιχοποιίας και του κονιάματος αντίστοιχα.
- Παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας:
 - Τρόπος δόμησης (γεωμετρία τοιχοσωμάτων και αρμών, τρόπος δόμησης και αλληλοδιαπλοκή των διαφόρων στρώσεων της τοιχοποιίας...)
 - Αντοχή των τοιχοσωμάτων (f_{bc} , f_{bt})
 - Θλιπτική αντοχή του κονιάματος (f_{mc})
 - Ελαστικά χαρακτηριστικά τοιχοσωμάτων και κονιάματος (E_b, ν_b, E_m, ν_m)
 - ποιότητα δόμησης



Εικόνα 3-1: Διανομή τάσεων σε πρίσμα τοιχοποιίας υπό θλίψη

Εφελκυστική Αντοχή.

- Είναι γενικά πολύ χαμηλότερη της θλιπτικής αντοχής.
- Διαφοροποιείται έντονα απο τη γωνία της εφελκυστικής δύναμης ως προς τους οριζόντιους αρμούς (ανισοτροπία). Η εφελκυστική αντοχή παράλληλα στους κύριους αρμούς είναι χοντρικά διπλάσια απο την αντίστοιχη αντοχή κάθετα σε αυτούς. Εξαίρεση

αποτελούν αργολιθοδομές με λιθοσώματα μικρού μεγέθους και ακανόνιστου σχήματος και μεγάλη ποσότητα κονιάματος, στις οποίες η ανισοτροπία είναι εξασθενημένη.

▪ Παράγοντες που επηρεάζουν την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας:

A) Κάθετα στους οριζόντιους αρμούς:

- f_{mt} (εφελκυστική αντοχή κονιάματος).
- f_{jso} (συνάφεια κονιάματος –τοιχοσώματος).
- $f_{wt} = \min(f_{mt}, f_{jso})$.

B) Παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς:

- f_{mt}, f_{bt} .
- Διατμητική αντοχή κονιάματος.
- Διατμητική αντοχή διεπιφάνειας κονιάματος-τοιχοσώματος.
- Αριθμός οριζόντιων αρμών και τοιχοσωμάτων που ανήκουν στην εφελκυστική διατομή.
- Έντονη διαφοροποίηση –ποικιλία μηχανισμών αστοχίας

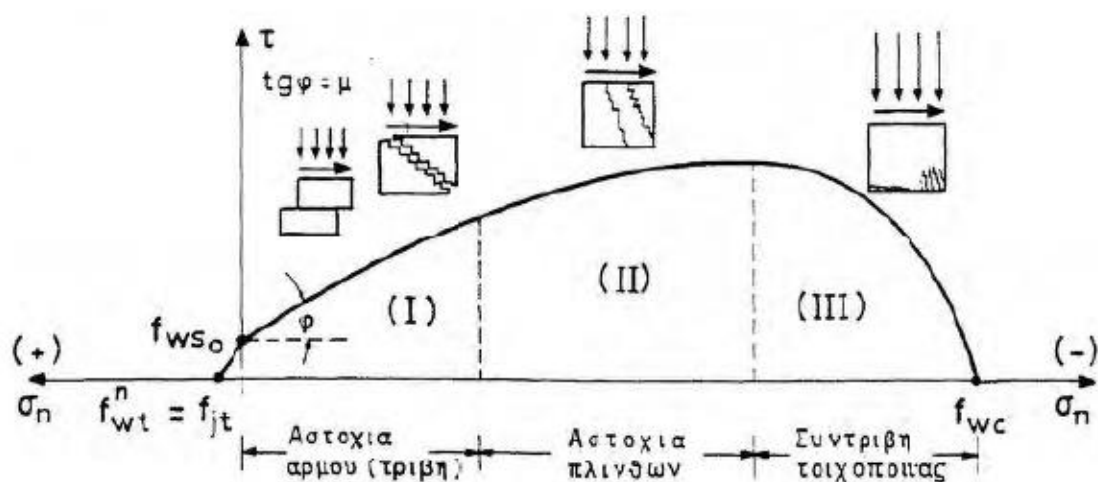
▪ Οι κανονισμοί κατα κανόνα δεν χρησιμοποιούν την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας στον σχεδιασμό. Αντίθετα, συνήθως προβαίνουν στην λογική της «αδρανούς περιοχής».

Διατμητική αντοχή

▪ Καθαρή διάτμηση δεν υπάρχει υπό πραγματικές συνθήκες.

Οι διατμητικές τάσεις (τ) συνυπάρχουν και με ορθές (σ_n) ακόμα και μόνο λόγω του ίδιου βάρους της τοιχοποιίας.

▪ Πολύ χρήσιμη είναι η περιβάλλουσα αστοχίας τοιχοποιίας υπό συνδυασμό (τ, σ_n) (σχήμα 1.2.2)



Εικόνα 3-2: Τυπική μορφή καμπύλης αστοχίας (τ, σ_n) τοιχοποιίας

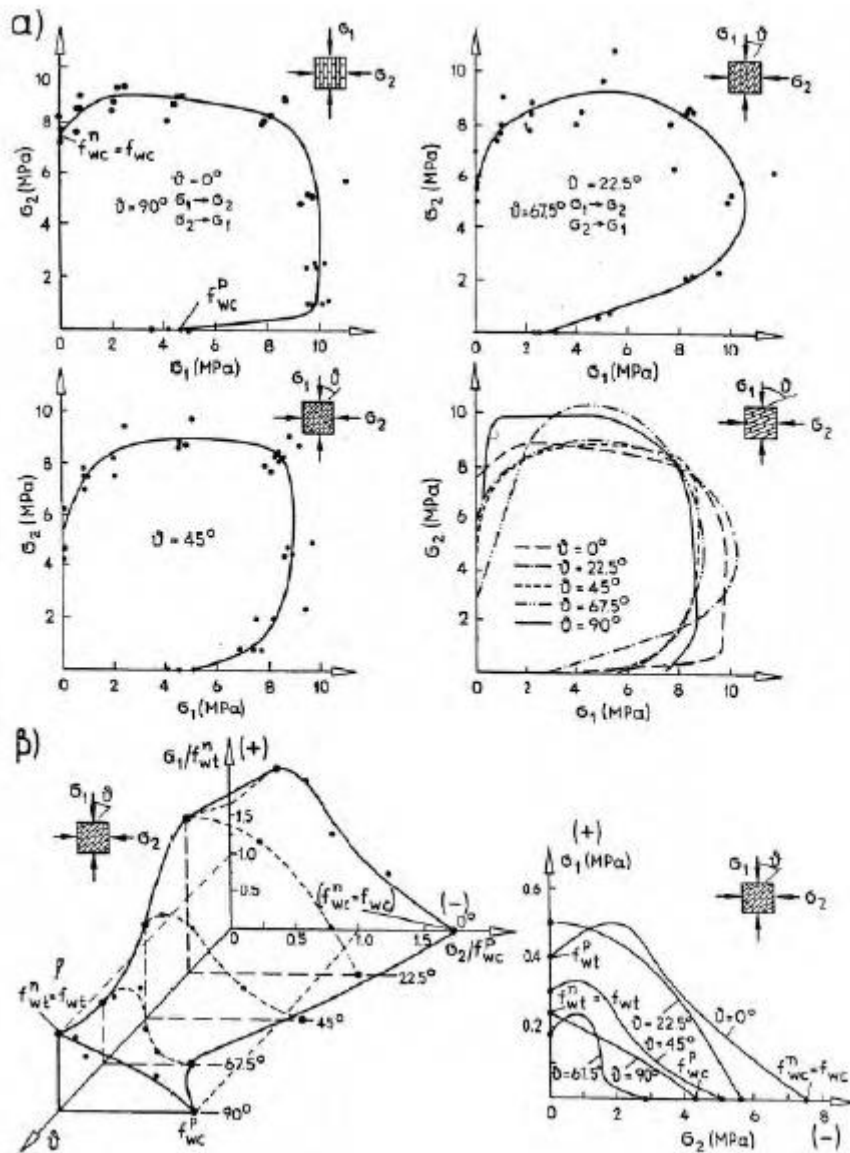
Σχολιάζοντας το παραπάνω σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

1. Χαμηλές τιμές της σ_n (περιοχή I): Αστοχία τριβής-ολίσθησης οριζοντίου αρμού ή κλιμακωτή αποκόλληση και ολίσθηση κατακόρυφων και οριζόντιων αρμών (συνήθως μορφή διατμηματικής αστοχίας τοίχων). Αποδεκτό γενικά το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Coulomb:
 2. Μέσες τιμές της σ_n (περιοχή II): Αστοχία απο λοξή ρηγμάτωση που διαπερνά και τοιχοσώματα. Συνήθως εμφανίζεται σε πεσσούς μεταξύ ανοιγμάτων.
 3. Υψηλές τιμές της σ_n (περιοχή III): Αστοχία από σύνθλιψη της θλιβόμενης γωνίας. Αστοχία καμπτικού τύπου η οποία προηγείται της διατμητικής αστοχίας.
 4. Περιοχή εφελκυστικής σ_n : Η περιβάλλουσα αστοχίας είναι σχεδόν ευθεία γραμμή με έντονη κλίση καθώς συνήθως ισχύει $f_{ws_o} > f_{jt}$
- Η μορφή της οριακής καμπύλης (τ, σ_n) επηρεάζεται έντονα από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τοιχοσωμάτων, του κονιάματος και του αρμού αλλά και από τον τρόπο δόμησης.
 - Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τιμές του συντελεστή τριβής (μ) για το αρχικό σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης (τ, σ_n) που κυμαίνονται συνήθως από 0,4 ως 0,7. Το τμήμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι αντιστοιχεί στη συνήθη περιοχή των ορθών τάσεων λειτουργίας της τοιχοποιίας.

Ως γνωστόν, η διατμητική φόρτιση της τοιχοποιίας υπό κατακόρυφη (ή και οριζόντια) ορθή ένταση ανάγεται σε διαξονική καταπόνηση του υλικού υπό συνδυασμό ετερόσημων κυρίων τάσεων υπό τυχαία γωνία ως προς τους οριζόντιους αρμούς.

Αντοχή της τοιχοποιίας υπό τυχούσα επίπεδη ένταση

- Η τοιχοποιία εμφανίζεται συνήθως στις κατασκευές ως επιφανειακής μορφής φορέας με λειτουργία δίσκου. Έτσι στο σώμα της τοιχοποιίας αναπτύσσεται μια τυχούσα επίπεδη καταπόνηση (σ_n, σ_p, t) που ισοδυναμεί με ένα ζεύγος ορθών τάσεων (σ_1, σ_2) υπό τυχούσα γωνία (θ) ως προς τους οριζόντιους αρμούς. Κατά συνέπεια η απόκριση της τοιχοποιίας επηρεάζεται έντονα από τον ανισότροπο χαρακτήρα της καθώς είναι καθοριστική η διεύθυνση των κύριων αξόνων έντασης ως προς τη διεύθυνση των αρμών (γωνία θ).
- Είναι γνωστό ότι στα δομικά στοιχεία (και κυρίως στα υψίκορμα όπως συνήθως οι τοίχοι) κυριαρχεί η ετερόσημη κύρια διαξονική καταπόνηση ($\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$). Ενώ όμως σε ένα ισότροπο ψαθυρό υλικό πχ σκυρόδεμα η ρηγμάτωση υπό ετερόσημη διαξονική καταπόνηση επέρχεται κάθετα στην κύρια εφελκυστική τάση, στην τοιχοποιία η αντοχή, ο τύπος αστοχίας και η διεύθυνση των ρωγμών διαφοροποιούνται και καθορίζονται τις περισσότερες φορές από τη διεύθυνση και την αντοχή των οριζόντιων αρμών.
- Στο σχήμα 1.3. παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες αστοχίας τυπικής πλινθοδομής υπό τυχούσα διαξονική καταπόνηση για διάφορες τιμές της γωνίας θ , όπως προέκυψαν από εκτεταμένη πειραματική έρευνα.



Εικόνα 3-3: Περιβάλλουσες αστοχίας πλινθοδομής υπο διαξονική καταπόνηση και μεταβλητή κλίση αρμών

Συμπεριφορά άοπλης τοιχοποιίας υπό εναλλασόμενη σεισμική καταπόνηση

- Ο τύπος της ρηγμάτωσης, η απομένουσα αντοχή μετά τη ρηγμάτωση και η πλαστιμότητα υπό εναλλασόμενη σεισμική καταπόνηση της άοπλης τοιχοποιίας επηρεάζονται έντονα από τους ακόλουθους παράγοντες:
 - Μέγεθος αξονικής φόρτισης σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.
 - Τύπος και αντοχή τοιχοσωμάτων
- Τοίχοι με πλήρη ισχυρά τοιχοσώματα και σχετικά χαμηλό κατακόρυφο αξονικό φορτίο εμφανίζουν:
 - Διαγώνια αποκόλληση-ολίσθηση αρμών κονιάματος
 - Απορρόφηση σεισμικής ενέργειας μέσω μηχανισμού τριβής –ολίσθησης αρμών (ικανοποιητική πλαστιμότητα)
 - Σημαντική απομένουσα φέρουσα ικανότητα μετά τη ρηγμάτωση

- Τοίχοι με ασθενή τοιχοσώματα και υψηλό αξονικό φορτίο εμφανίζουν:
 - Χιαστή ρηγμάτωση πιθανόν με θραύση τοιχοσωμάτων
 - Ψαθυρό χαρακτήρα αστοχίας (χωρίς πλαστιμότητα)
 - Έντονη απώλεια φέρουσας ικανότητας μετά τη ρηγμάτωση.

Μηχανικές σταθερές της τοιχοποιίας

- Στη βιβλιογραφία παρατηρείται μεγάλη διασπορά τιμών για το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson τοιχοποιίας. Ενδεικτικά αναφέρονται ότι το τέμνον μέτρο ελαστικότητας το οποίο αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη θλιπτική τάση ίση με το 30% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας κυμαίνεται από $300 \div 1200 f_{wc}$. Οι μεγαλύτερες τιμές του πολλαπλασιαστή της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας.
- Πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρείται έντονη ανισοτροπία. Οι καμπύλες (σ - ϵ) και οι τιμές των E_w, ν_w διαφοροποιούνται αναλόγως με τη γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση φόρτισης με τη διεύθυνση των οριζόντιων αρμών. Ειδικά για τοιχοποιίες με μεγάλο πάχος αρμών, όπως οι πλινθοδομές ρωμαϊκών και βυζαντινών μνημείων, η διαφοροποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη ($E_w^n \ll E_w^p$). Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζει την τοιχοποιία ως έντονα ορθότροπο υλικό.
- Ο λόγος Poisson (ν_w), αν δεν υπάρχει ακριβέστερος προσδιορισμός του συνήθως λαμβάνει την τιμή $\nu_w = 0,25$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην παραδοχή του Ευρωκώδικα 6 ότι:

$$G_w = \frac{E_w}{2(1 + \nu)} \approx 0,4E_w$$

3.3 Προσομοίωση

Γενικά για την προσομοίωση της τοιχοποιίας

Η μελέτη φαινομένων στη φύση, όπως είναι η ανάλυση φορέων στη στατική, με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα ακολουθεί δυο βασικά στάδια:

- **Τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου**, η οποία βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές γύρω από τις διαδικασίες που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο.
- Την **αριθμητική ανάλυση** του μαθηματικού προσομοιώματος, με στόχο την επίλυση της μαθηματικής διατύπωσης μέσω προσεγγιστικών μεθόδων.

Βέβαια, η τοιχοποιία ως μέσο δόμησης έχει την αφετηρία της πολύ βαθιά στο χρόνο και η ανέγερση έργων τοιχοποιίας ουσιαστικά βασιζόταν σε πολύ απλούς υπολογισμούς και σε εμπειρικές τεχνικές. Κατά τους νεότερους όμως χρόνους και ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες η εξέλιξη της επιστήμης της μηχανικής (των στερεών) παράλληλα με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνουν στο σύγχρονο μηχανικό τη δυνατότητα μιας επιστημονικότερης ανάλυσης και σχεδιασμού των κατασκευών από τοιχοποιία.

Έτσι, για την ανάλυση των κατασκευών απο τοιχοποιία έχουν προταθεί και επικρατήσει οι εξής μέθοδοι:

- **Η μέθοδος των πεσσών**
- **Η μέθοδος του ισοδύναμου χωρικού πλαισίου**
- **Η μέθοδος συστήματος θλιπτήρων και ελκυστήρων**
- **Η μέθοδος των μακροστοιχείων**
- **Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων**

Εν συντομία μπορεί να ειπωθεί ότι :

- Οι μέθοδοι **των πεσσών** και του **ισοδύναμου πλαισίου** αν και ελκυστικές για τους μηχανικούς λόγω της ευκολίας τους, αλλά και μέχρι πριν από μερικά χρόνια οι μόνες εφαρμόσιμες στην πράξη μαζί με τη μέθοδο θλιπτήρων-ελκυστήρων, εξ' αιτίας της ελλειπούς ανάπτυξης των Η/Υ, είναι δύο μέθοδοι υπεραπλουστευτικές.
- Η Μέθοδος του συστήματος **θλιπτήρων-ελκυστήρων** είναι εφαρμόσιμη μόνο στην περίπτωση που στην τοιχοποιία υπάρχουν ενσωματωμένα στοιχεία που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως ελκυστήρες και ενδείκνυται για την προσομοίωση μόνο κρίσιμων τμημάτων του δομήματος. Μειονέκτημά της είναι η ασάφεια των συνθηκών σύνδεσης-επαφής των ελκυστήρων με την τοιχοποιία και η εφαρμογή της απαιτεί υψηλό βαθμό εμπειρίας του μηχανικού.
- Από τις ανεπάρκειες των παραπάνω μεθόδων φαίνεται να οδηγούμαστε στην επικράτηση των μεθόδων των **μακροστοιχείων** και των **πεπερασμένων στοιχείων**.
- Ως **μακροστοιχεία** μπορούν να θεωρηθούν τμήματα της κατασκευής που αποτελούν ξεχωριστά μέλη (υπέρθυροι δίσκοι, πεσσοί) ή που ορίζονται απο την ύπαρξη ρωγμών υφισταμένων ή υποτιθεμένων-αναμενόμενων π.χ. μετά από προκαταρκτική ελαστική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία συνεχούς μέσου. Τα μακροστοιχεία συνδέονται μεταξύ τους στους κόμβους τους μέσω **ελατηρίων επαφής**. Τα διαγράμματα δύναμης παραμόρφωσης των ελατηρίων αυτών μπορούν να είναι και μη γραμμικά **επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση της μετελαστικής συμπεριφοράς του δομήματος**.
 - Ελλάτωμα αυτής της προσομοίωσης είναι ότι αδυνατεί να λάβει υπ' όψιν την εκτός επιπέδου δράση, οπότε είναι ακατάλληλη για αναλύσεις σε χωρικά προσομοιώματα κτιρίων με εύκαμπτα διαφράγματα.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση της εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην προσομοίωση φορέων τοιχοποιίας.

Προσομοίωση με τη μέθοδο των Π.Σ

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 διαδομένη 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 συντοριακές συνθήκες.

Κατά τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της μεθόδου αυτής, παράλληλα με την εξέλιξη των Η/Υ, την έχει αναδείξει ως τη δεσπόζουσα μέθοδο υπολογιστικής αντιμετώπισης δομοστατικών

και όχι μόνο προβλημάτων. Εδώ και πάνω από 20 χρόνια αρκετοί ερευνητές έχουν καταπιαστεί με την ανάπτυξη ποικίλων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων για υλικά με χαμηλή εφελκυστική αντοχή. Ομως, η ιδιόρρυθμη φύση της τοιχοποιίας εφιστά την προσοχή στην εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου.

Τα τρία επίπεδα προσομοίωσης:

Η τοιχοποιία είναι ένα πολυφασικό, ετερογενές υλικό που αποτελείται από τοιχοσώματα και συνδετικό κονίαμα. Το γεγονός ότι στην κλίμακα ενός μεμονωμένου τοιχοσώματος η "μικροδομή" της είναι ιδιαίτερα έκδηλη, αποτελεί αιτία που περιπλέκει τον καθορισμό ενός κατάλληλου υπολογιστικού προσομοιώματός της. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω και ανάλογα με την επιδιωκόμενη στάθμη ακρίβειας έχουν προταθεί **τα εξής 3 επίπεδα προσομοίωσης:**

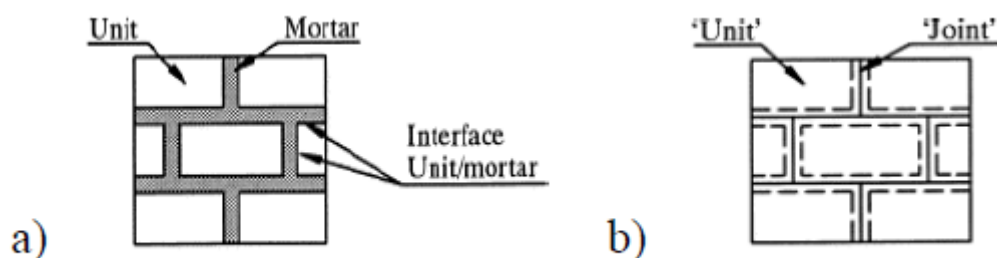
α. Μικρο-προσομοίωση (micro-modeling)

Τα μικρο-προσομοιώματα αποδίδουν το κάθε συστατικό στοιχείο της τοιχοποιίας με την πραγματική του γεωμετρία, καταστατικό νόμο, κριτήριο αστοχίας και ιδιότητες επαφής (αλληλεπίδρασης). Τόσο τα τοιχοσώματα όσο και το κονίαμα προσομοιώνονται ως στοιχεία όγκου (ή κελύφους), ενώ η μεταξύ τους διεπιφάνεια αντιπροσωπεύεται από «στοιχεία επαφής» (Σχ. 1.3.1).

β. Απλοποιημένη μικρο-προσομοίωση (simplified micro-modeling)

Στην περίπτωση αυτή το κονίαμα και η διεπιφάνεια κονιάματος-τοιχοσώματος συνδυάζονται σε ένα ενιαίο «στοιχείο επαφής». Τα δε τοιχοσώματα αποτελούν γραμμικά-ελαστικά συνεχή στοιχεία, οπότε η τοιχοποιία αντιμετωπίζεται ως μία συναρμογή γραμμικών ελαστικών δομικών μονάδων με δυνητικές επιφάνειες αστοχίας τα μεταξύ τους σύνορα. (Σχ. 1.3.1)

Το κύριο μειονέκτημα της μικρο-προσομοίωσης, και ιδίως της λεπτομερούς, είναι ότι απαιτεί λεπτομερή διακριτοποίηση και μεγάλους υπολογιστικούς πόρους. Έτσι, η μικρο-προσομοίωση είναι κατάλληλη πρωτίστως για ερευνητικούς σκοπούς, όπως η αναπαραγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3-4: Προσομοίωση της τοιχοποιίας: α) Λεπτομερής μικρο-προσομοίωση, β) Απλοποιημένη μικροπροσομοίωση.

γ. Μακρο-προσομοίωση (macro-modeling)

Η τοιχοποιία θεωρείται στο σύνολό της ως συνεχές ομοιογενές μέσο χωρίς διαχωρισμό μεταξύ των τοιχοσωμάτων και των αρμών. Από εκεί και ύστερα υπάρχει δυνατότητα προσομοίωσής της ως υλικό ανισότροπο, με μη γραμμικό καταστατικό νόμο και με εφαρμογή κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας που μπορεί να αποδώσει με αποδεκτή ακρίβεια την αστοχία, άλλα φυσικά όχι τον ακριβή μηχανισμό και τη μορφή της.

Είναι προφανές ότι η εξάλειψη της “μικροδομής” του υλικού καθιστά αδύνατο τον προσδιορισμό των πραγματικών τασικών συγκεντρώσεων καθώς και των λεπτομερών μηχανισμών και μορφών των αστοχιών. Αυτή η εγγενής αδυναμία της μακρο-προσομοίωσης της τοιχοποιίας καθιστά μάταιη τη διαμόρφωση ενός υπολογιστικού προσομοιώματος που αποσκοπεί στην υψηλής ακρίβειας τασική ανάλυση, δηλαδή ενός προσομοιώματος με πυκνή διακριτοποίηση ή που να ενσωματώνει στη γεωμετρία του μικρές λεπτομέρειες της κατασκευής. Για το λόγο αυτόν, η πλέον κατάλληλη στάθμη διακριτοποίησης θεωρείται εκείνη όπου το χαρακτηριστικό μήκος των πεπερασμένων στοιχείων είναι λίγο μεγαλύτερο από το τυπικό μέγεθος των τοιχοσωμάτων.

Παράλληλα με την αδυναμία πρόβλεψης των τασικών συγκεντρώσεων σε τοπικό επίπεδο, ισχύει και το ότι η εμφάνιση ρωγμών δεν οδηγεί κατ’ ανάγκην σε αστοχία. Για το λόγο αυτό, η παραπάνω αδυναμία του μακρο-μοντέλου δεν αποτελεί μειονέκτημα. Μία δεύτερη απόρροια των παραπάνω είναι ότι απαιτείται η εξέταση των αποτελεσμάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα, δηλαδή η «μετάφρασή» τους στη στάθμη του δομικού στοιχείου και η σύγκρισή τους με περιβάλλουσες συμπεριφορές, όπως π.χ. τα διαγράμματα αλληλεπιδράσεως.

3.4 Μέθοδοι Αντισεισμικής Ανάλυσης

Παρουσίαση μεθόδων

Ενώ η φόρτιση από τα κατακόρυφα φορτία ορίζεται με σχετική σαφήνεια, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει με τη σεισμική φόρτιση. Η φυσική διέγερση του εδάφους θεμελίωσης, η απόκριση της κατασκευής στη διέγερση αυτή και η συνεπόμενη κατανομή των σεισμικών αδρανειακών δυνάμεων, είναι δεδομένα στα οποία υπεισέρχεται μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας. Τελικά, για την εκτίμηση των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών έχουν αναπτυχθεί οι παρακάτω μέθοδοι, η καθεμία εκ των οποίων βασίζεται στις δικές της παραδοχές, και ως εκ τούτου διαφέρουν ως προς το πεδίο εφαρμογής τους, την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και το υπολογιστικό τους κόστος.

- Ελαστική (ισοδύναμη στατική) ανάλυση.
- Ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης.
- Μη γραμμική στατική ανάλυση.
- Μη γραμμική δυναμική ανάλυση (ανάλυση χρονοϊστορίας).

Στόχος της παρούσας ενότητας είναι η αποσαφήνιση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των παραπάνω μεθόδων καθώς και της καταλληλότητάς τους να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία αντισεισμικής ανάλυσης κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία.

Ελαστική (ισοδύναμη στατική) ανάλυση

Όπως μαρτυρεί και η ονομασία της ανάλυσης, πρόκειται για επίλυση του φορέα υπό «ισοδύναμα» στατικά οριζόντια φορτία. Η κατανομή της «ισοδύναμης στατικής φόρτισης» συνήθως γίνεται ως εξής:

1. Σύμφωνα με τη θεμελιώδη ιδιομορφή
2. Ανεστραμένη τριγωνική κατανομή

3. Ομοιόμορφη κατανομή οριζοντίων σεισμικών ωθήσεων καθ' ύψος του κτιρίου.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε **γραμμικά-ελαστικά** προσομοιώματα της κατασκευής και υπόκειται στον εξής επιπλέον περιορισμό (σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ), κατά τον οποίο αυτός ο τύπος ανάλυσης μπορεί να εφαρμοσθεί σε κτίρια η απόκριση των οποίων σε κάθε κύρια διεύθυνση δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις συμβολές ιδιομορφών ταλαντώσεως υψηλότερων από τη θεμελιώδη ιδιομορφή. Η απαίτηση αυτή πρακτικά ικανοποιείται όταν:

- $T_1 < \{ 4T_c, 2.0 \text{ sec} \}$
- Η μορφή του κτιρίου χαρακτηρίζεται από «κανονικότητα» (σε κάτοψη, καθ' ύψος, κλπ) και τα δάπεδα καθώς και η στέγη να έχουν **διαφραγματική λειτουργία** και να είναι σωστά συνδεδεμένα με τους φέροντες τοίχους.

Είναι λοιπόν προφανές ότι η μέθοδος αυτή υπόκειται σε πλήθος περιορισμών, τους οποίους τα περισσότερα κτίρια από τοιχοποιία και ιδίως τα μνημεία, λίγες φορές ικανοποιούν.

Ιδιομορφική Ανάλυση Φάσματος Απόκρισης

Η **ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης** χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέγιστης απόκρισης ενός μεγέθους (μετακίνηση, τάση κλπ) βάσει του φάσματος απόκρισης του σεισμού, στον οποίον υπόκειται η κατασκευή. Η μέθοδος αυτή είναι μεν προσεγγιστική, αλλά ταυτόχρονα χρήσιμη, καθώς δεν έχει μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις και γι αυτό προτείνεται ευρέως από τους δομοστατικούς κανονισμούς για τις ανάγκες του σχεδιασμού.

Η ανάλυση αυτή βασίζεται στη χρήση ενός υποσυνόλου ιδιομορφών του συστήματος. Για να είναι ο αριθμός τους επαρκής, ώστε να αποδίδουν την πραγματική απόκριση του συστήματος αντιπροσωπευτικά, θα πρέπει το άθροισμα των δρωσών ιδιομορφικών μαζών για τις ιδιομορφές που λαμβάνονται υπ' όψιν να είναι ίσο με τουλάχιστον το 75% της συνολικής μάζας του φορέα (κατά ΚΑΔΕΤ), καθώς και να λαμβάνονται υπ' όψιν όλες οι ιδιομορφές με αξιόλογες δρώσεις ιδιομορφικές μάζες, μεγαλύτερες από το 5% της συνολικής μάζας.

Στη συνέχεια η διαδικασία της μεθόδου έχει ως εξής: Δεδομένου του σεισμικού φάσματος απόκρισης, υπολογίζεται η μέγιστη ιδιομορφική απόκριση του κάθε ενδιαφερόμενου μεγέθους (π.χ. τάση, μετακίνηση, κλπ) για κάθε ιδιομορφή και για κάθε διεύθυνση σεισμού ξεχωριστά. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται συναρτήσει της ιδιοπεριόδου (T_j) και της ιξώδους απόσβεσης (ζ_j) που χαρακτηρίζει την κάθε ιδιομορφή.

Υπολογισμός ιδιομορφικού μεγίστου $p_{jmax}^i(\zeta_i, T_i)$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, n$ και $j = 1, 2, 3$

Όπου: j : οι 3 κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις της σεισμικής επιτάχυνσης.

i : ο αριθμός της εκάστοτε ιδιομορφής

n : ο αριθμός των ιδιομορφών που έχουν επιλεγεί για την ανάλυση.

p : το ενδιαφερόμενο μέγεθος.

Φυσικά η *συνεισφορά της κάθε ιδιομορφής μεγιστοποιείται σε χρόνο ο οποίος είναι εν γένει διαφορετικός από τη χρονική στιγμή μεγιστοποίησης της συνεισφοράς των άλλων ιδιομορφών*, ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τη συμβολή στην απόκριση των 3 κάθετων μεταξύ τους συνιστωσών της σεισμικής επιτάχυνσης. Η ακριβής επίλυση του προβλήματος αυτού θα επερχόταν μετά από υπέρθεση των ιδιομορφικών αποκρίσεων σε πραγματικό χρόνο (real time superposition of modal contribution), που θα οδηγούσε στον πλήρη προσδιορισμό της ιστορίας της απόκρισης του εν λόγω μεγέθους ($p(t, \zeta)$) και θα απαιτούσε ως δεδομένο και την ιστορία της διέγερσης.

Για την παράκαμψη των παραπάνω η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης προτείνει μια πιθανοτική θεώρηση των πραγμάτων. Καταρχάς, γίνεται ο υπολογισμός της μέγιστης

απόκρισης του μεγέθους p για σεισμό κατά την κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Αυτό πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου πιθανοτικού συνδυασμού των ιδιομορφικών μεγίστων για σεισμική δράση κατά την εκάστοτε διεύθυνση. Οι δυο επικρατέστερες μέθοδοι συνδυασμού είναι:

- Ο Πλήρης Δευτεροβάθμιος Συνδυασμός (Complete Quadratic Combination-CQC)
- Η μέθοδος της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των ιδιομορφικών μεγίστων (Square-Root-of-the-sum-of-the-Squares- SRSS).

$$\text{Σύμφωνα με την SRSS, } p_{j \max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{j \max}^i)^2}$$

Στη συνέχεια γίνεται κατάλληλος πιθανοτικός συνδυασμός των $p_{j \max}$ $j=1,2,3$ ώστε να προκύψει το ζητούμενο μέγεθος p_{\max} .

Ο κίνδυνος των παραπάνω προσεγγίσεων είναι ότι μπορούν να οδηγήσουν σε άκρως συντηρητικές εκτιμήσεις της απόκρισης κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία. Σε αντίθεση με τους συνήθεις πλαισιωτούς φορείς, κατασκευασμένους από σύγχρονα υλικά (ΩΣ, χάλυβας) οι οποίοι εναποθέτουν το κύριο μέρος των φορτίων τους στις στάθμες των ορόφων, σε πλάκες με διαφραγματική λειτουργία, στα κτίρια από τοιχοποιία το μέγιστο μέρος της μάζας είναι κατανομημένο κατά συνεχή τρόπο στις τοιχοποιίες, ενώ πατώματα και στέγες με πλήρη διαφραγματική λειτουργία σπανίζουν. Το αποτέλεσμα είναι ότι στην απόκριση του δομήματος δεν δεσπόζουν μια ή έστω λίγες ιδιομορφές. Έτσι οι απαιτούμενες ιδιομορφές που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ώστε το σύνολο των δρυσών ιδιομορφικών τους μαζών να είναι επαρκές (πχ πάνω από το 75%), είναι πολλές, δευτερεύουσες και, σε ένα προσομοίωμα (πεπερασμένων στοιχείων) που εξ ορισμού δεν στερείται απλοποιήσεων, ορισμένες από αυτές είναι κίβδηλες και δεν έχουν σχέση με την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής. Υπερβολικά συντηρητικές εκτιμήσεις της απόκρισης που απορρέουν από τον κανόνα του "SRSS" μπορεί να οδηγήσουν σε ανώφελες, δαπανηρές, οχληρές και μη αναστρέψιμες επεμβάσεις στα κτίρια από τοιχοποιία και γι' αυτό καλό θα ήταν να μεταχειρίζονται με σύνεση.

Επιπλέον, η μέθοδος αυτή (όπως και η προηγούμενη) ως γραμμική που είναι, παρουσιάζει το εγγενές μειονέκτημα να αδυνατεί να προβλέψει τις ανακατανομές της έντασης και γενικά την μη-γραμμική συμπεριφορά που συνεπάγεται η ρηγμάτωση.

- Μια παραλλαγή των παραπάνω μεθόδων (ισοδύναμης στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης) είναι η εισαγωγή στους υπολογισμούς του **συντελεστή συμπεριφοράς της κατασκευής (q)**. Εν συντομία αναφέρεται ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς εκφράζει τον λόγο της μέγιστης επιτάχυνσης που θα αναπτυσσόταν στην κατασκευή αν αυτή λειτουργούσε ελαστικά προς την μέγιστη επιτάχυνση που αναμένεται ότι τελικά θα αναπτύξει, η οποία θα είναι απομειωμένη λόγω βλαβών («πλαστικοποιήσεων»). Με άλλα λόγια αποτελεί έναν δείκτη που επιχειρεί να συμπυκνώσει την μετ-ελαστική συμπεριφορά του δομήματος και εισάγεται ως υποκατάστατο των υπολογιστικά απαιτητικών και επίπονων μη-γραμμικών αναλύσεων.

Μη-γραμμική στατική ανάλυση

Την κυριότερη σήμερα μη-γραμμική στατική μέθοδο αποτελεί ουσιαστικά η λεγόμενη Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (pushover analysis) καθώς και οι παραλλαγές της. Στην παρούσα εργασία δεν θα παρουσιασθεί περαιτέρω το περιεχόμενο της μεθόδου, ώστε η παρουσίασή μας να επικεντρωθεί στην εφαρμογή της στα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία.

- Περίπτωση κτιρίων με «κανονική» μορφολογία και διαφραγματική λειτουργία πατωμάτων και στεγών. Στην περίπτωση αυτή η στατική υπερωθητική ανάλυση

(pushover analysis) μπορεί να εφαρμόζεται με την χρήση 2 πάγιων μορφών κατανομής πλευρικών φορτίσεων:

- **Της ιδιομορφικής** με κατανομή των οριζόντιων ωθήσεων σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή της κατασκευής.
- **Της σταθερής καθ' ύψος** κατανομής οριζόντιων ωθήσεων που συνάδει με την απόκριση κτιρίου στο οποίο έχει σχηματισθεί μηχανισμός 1^{ου} ορόφου.

Τα πραγματικά εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη αναμένεται να κυμαίνονται μεταξύ των 2 παραπάνω ακραίων εκδοχών.

- Περίπτωση κτιρίων «μη κανονικής» μορφολογίας με **διαφραγματική λειτουργία πατωμάτων και στεγών**. Στην περίπτωση αυτή, ως καλύτερη προσέγγιση θεωρείται η παραλλαγή της κλασικής στατικής υπερωθητικής ανάλυσης, γνωστή στην αγγλική ορολογία και ως “adaptive pushover”. Στην περίπτωση της, η ανάλυση αναπροσαρμόζεται προοδευτικά ώστε να θεωρήσει διεξοδικότερα την εξέλιξη της απόκρισης.
- Περίπτωση κτιρίων με πατώματα, στέγες ή κελύφη **χωρίς διαφραγματική λειτουργία**. Πρόκειται για την τυπική περίπτωση κτιρίων από τοιχοποιία και δη μνημειακών, όμως η εφαρμογή των καθιερωμένων μη-γραμμικών στατικών αναλύσεων προσκρούει σε ζητήματα και αβεβαιότητες οι οποίες δεν έχουν ληφθεί ακόμη υπ' όψιν από τους υπάρχοντες Κανονισμούς, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την επιλογή κατάλληλου «κόμβου ελέγχου». Μια αποδεκτή πρακτική θα μπορούσε να είναι η ανάλυση της εντός-επιπέδου απόκρισης του κάθε τοίχου ξεχωριστά, αποκομμένου από την κατασκευή και με τα φορτία που φέρει μαζί με την δική του μάζα.

Μη-γραμμική δυναμική ανάλυση (ανάλυση χρονοϊστορίας)

Πρόκειται αναμφισβήτητα για την πλέον γενική και ρεαλιστική μέθοδο, η εφαρμογή της οποίας όμως είναι επίπονη, απαιτεί ιδιαίτερη σύνεση όσον αφορά στα χρησιμοποιούμενα επιταχυνσιογραφήματα και προσομοιώματα της κατασκευής, ενώ είναι απαραίτητη η χρήση Η/Υ υψηλών δυνατοτήτων.

Όπωςδήποτε, οι μη γραμμικές επιλύσεις όπως αυτές που απαιτεί η πλήρης προσομοίωση της τοιχοποιίας εξακολουθούν να παρακωλύονται από δυσχέρειες σύγκλισης και αριθμητική αστάθεια, ιδίως εφόσον εκλείπει η σταθεροποιητική δράση του χαλύβδινου οπλισμού που είναι διαθέσιμος στο ωπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές μέθοδοι που αναπαράγουν μεν τη μη-γραμμικότητα της απόκρισης των ρηγματωμένων υλικών αλλά δεν παύουν να εκμεταλλεύονται την ευστάθεια των ελαστικών επιλύσεων.

Μια αποτελεσματική επιλογή είναι η δυνατότητα επαναδιακριτοποίησης του προσομοιώματος, παράλληλα με την δημιουργία νέων συνόρων μέσα στο σώμα του, προσομοιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ρηγμάτωση. Με την προοδευτική διάδοση της ρωγμής, σε κάθε βήμα της ανάλυσης δημιουργούνται νέα σύνορα και έπεται η επαναδιακριτοποίηση και η επαναδημιουργία του ελαστικού μητρώου δυσκαμψίας του προσομοιώματος.

Πέραν της ρηγμάτωσης, μια συχνή πηγή μη-γραμμικής απόκρισης είναι επίσης η επαφή τμημάτων που απαρτίζουν το προσομοίωμα και δεν είναι μεταξύ τους συνδεδεμένα. Συνήθως πρόκειται για την επαφή είτε μερών του δομήματος μεταξύ των οποίων δεν υπάρχει πραγματική συνέχεια υλικού, είτε για την επαφή διαφορετικών υλικών χωρίς εξασφαλισμένη συνάφεια (πχ τοιχοποιία-έδαφος, τοιχοποιία-ξύλο, ...). Τέτοια φαινόμενα ενδέχεται να είναι καθοριστικά για την απόκριση της κατασκευής και η ένταξή τους στο προσομοίωμα που προορίζεται για τη μη-

γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς, όπως και παραπάνω, το υλικό παραμένει ελαστικό.

Όπως προαναφέρθη, ένα ακόμη ζήτημα στο οποίο προσκρούει η μέθοδος της ανάλυσης χρονοϊστορίας είναι η επιλογή των κατάλληλων επιταχυνσιογραφημάτων με τα οποία θα γίνει η ανάλυση. Για το θέμα αυτό ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει τα εξής:

Προσομοίωση χρονοϊστορίας

Γενικά

(1)P Η σεισμική κίνηση μπορεί επίσης να προσομοιωθεί σε όρους χρονοϊστοριών εδαφικής επιτάχυνσης και αντίστοιχων μεγεθών (ταχύτητα και μετακίνηση).

(2)P Όταν απαιτείται χωρικό προσομοίωμα του φορέα, η σεισμική κίνηση θα αποτελείται από τρία επιταχυνσιογραφήματα που δρουν ταυτόχρονα. Το ίδιο επιταχυνσιογράφημα δεν μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Είναι δυνατές απλοποιήσεις σύμφωνα με τα σχετικά Μέρη του EN 1998.

(3) Ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής και τα διαθέσιμα στοιχεία, η περιγραφή της σεισμικής κίνησης μπορεί να γίνει με τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα καθώς και καταγραφές ή προσομοιώσεις επιταχυνσιογραφημάτων.

Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα

(1)P Τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα θα παράγονται ώστε να είναι συμβατά με τα φάσματα ελαστικής απόκρισης για 5% ιξώδη απόσβεση ($\xi = 5\%$).

(2)P Η διάρκεια των επιταχυνσιογραφημάτων θα είναι συμβατή με το μέγεθος και τα άλλα σχετικά χαρακτηριστικά του σεισμικού γεγονότος που υπεισέρχεται ουσιαστικά στον καθορισμό του σ_g .

(3) Όταν δεν είναι διαθέσιμα στοιχεία για την συγκεκριμένη περιοχή, η ελάχιστη διάρκεια T_s του στάσιμου μέρους των επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει να είναι ίση με 10 s.

(4) Η ομάδα των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει να τηρεί τους ακόλουθους κανόνες:

α) πρέπει κατ' ελάχιστον να χρησιμοποιούνται τρία επιταχυνσιογραφήματα

β) η μέση τιμή της επιτάχυνσης φασματικής απόκρισης μηδενικής περιόδου (που υπολογίζεται από τις μεμονωμένες χρονοϊστορίες) δεν θα είναι μικρότερη από την τιμή $\sigma_g \cdot S$ για την θέση που εξετάζεται.

γ) στην περιοχή περιόδων μεταξύ $0,2T_1$ και $2T_1$, όπου T_1 είναι η θεμελιώδης περίοδος του φορέα στην διεύθυνση όπου θα εφαρμοστεί το επιταχυνσιογράφημα., καμία τιμή του μέσου ελαστικού φάσματος απόσβεσης 5%, που υπολογίζεται από όλες τις χρονοϊστορίες, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της αντίστοιχης τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης, με απόσβεση 5%.

Καταγραφές ή Προσομοιώσεις Επιταχυνσιογραφημάτων

(1)P Μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταγραφές επιταχυνσιογραφημάτων ή επιταχυνσιογραφήματα που παράγονται από φυσική προσομοίωση των μηχανισμών πηγής και διάδοσης, εφόσον τα δείγματα που χρησιμοποιούνται είναι κατάλληλα επιλεγμένα όσον αφορά τα σειсмоγεννητικά χαρακτηριστικά των πηγών και τις εδαφικές συνθήκες της περιοχής του έργου και οι τιμές τους έχουν υποστεί κλιμακώσεις για προσαρμογή στην τιμή του $\sigma_g \cdot S$ για την ζώνη που εξετάζεται.

(2)P Για αναλύσεις εδαφικής ενίσχυσης και για ελέγχους ευστάθειας πρανών βλέπε EN 1998-5:2004, 2.2.

(3) Η ομάδα των καταγραφών ή προσομοιώσεων επιταχυνσιογραφημάτων **πρέπει να ικανοποιεί την (4) απαίτηση των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων (βλέπε άνω).**

3.5 Σύγχρονες προσεγγίσεις για την αντισεισμική προστασία κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομίας – Ανασκόπηση-Πρόταση

Εισαγωγή

Υπάρχει έλλειψη μιας κοινής προσέγγισης για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομίας. Η εξισορρόπηση μεταξύ της ασφάλειας και της διατήρησης των αρχιτεκτονικών και καλλιτεχνικών χαρακτηριστικών των κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομίας παραμένει μια πρόκληση, αλλά ταυτόχρονα και ένα ζήτημα το οποίο χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Σχεδόν στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι περιορισμοί που απορρέουν από την υλοποίηση των παρεμβάσεων σε ιστορικά κτίσματα και μνημεία, ώστε να είναι συμβατές με τις διεθνώς αποδεκτές κατευθυντήριες γραμμές και αρχές, (π.χ., Χάρτης της Αθήνας, Χάρτης της Βενετίας, Διακήρυξη του Άμστερνταμ), δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση του επιπέδου ασφάλειας που επιβάλλεται σε νέες κατασκευές. Για το λόγο αυτό η γενικά αποδεκτή πρακτική είναι η εφαρμογή επεμβάσεων με στόχο τη συντήρηση ή/και την περιορισμένη μείωση της τρωτότητας του κτίσματος.

Σε σειсмоγενείς περιοχές, ο σεισμός αποτελεί την κυριότερη αιτία αστοχιών και κατάρρευσης ιστορικών κατασκευών. Η αντισεισμική προστασία κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομίας απαιτεί τον προσδιορισμό της σεισμικής τους διακινδύνευσης προκειμένου να ληφθούν κατάλληλα μέτρα. Η **σεισμική διακινδύνευση** προκύπτει ως συνδυασμός τεσσάρων παραγόντων: **(i)** της σεισμικής επικινδυνότητας (πιθανότητα εμφάνισης ενός σεισμού δεδομένης έντασης στη θέση του κτίσματος), **(ii)** της τρωτότητας (προδιάθεση του δομήματος να υποστεί βλάβες από σεισμό), **(iii)** της επισκεψιμότητάς του από το κοινό (δηλαδή των συνθηκών χρήσης και της παρουσίας κοινού) και **(iv)** της μνημειακής σπουδαιότητας του κτίσματος καθώς και των καλλιτεχνικών στοιχείων που περιέχει. Η αντισεισμική προστασία των κτισμάτων πολιτιστικής αξίας αφορά όχι μόνο στην ασφάλεια του κοινού και στις οικονομικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη βλάβη του, αλλά και ιδιαίτερα στη διατήρηση αυτής καθεαυτής της πολιτιστικής κληρονομίας από ενδεχόμενη απώλειά του.

Η ανάπτυξη που ακολουθεί παρουσιάζει μία μεθοδολογία η οποία οδηγεί σε εφαρμόσιμες επεμβάσεις εξισορροπώντας τις απαιτήσεις της ασφάλειας και του σεβασμού των πολιτιστικών και αρχαιολογικών χαρακτηριστικών του δομήματος.

Οι σύγχρονοι κανονισμοί

Οι σύγχρονοι κανονισμοί αντισεισμικού σχεδιασμού για νέες κατασκευές, καθώς και οι συστάσεις/κανονισμοί για την αξιολόγηση και την πραγματοποίηση επεμβάσεων σε υφιστάμενες, βασίζονται στην αποτίμηση της συμπεριφοράς τους με βάση την επιτελεστικότητα (performance based assessment), η οποία αποσκοπεί στην εκπλήρωση ορισμένων στοχευόμενων επιπέδων συμπεριφοράς (οριακές καταστάσεις) σε αντιστοιχία με προκαθορισμένες σεισμικές δράσεις (design earthquake). Η διαδικασία αυτή υιοθετείται από

πολλούς σύγχρονους κανονισμούς, όπως ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων, ο Ευρωκώδικας 8 και ο Ιταλικός Κανονισμός.

▪ **Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.):**

Για μία κατασκευή με συμβατικό χρόνο ζωής $T_L=50$ έτη οι στάθμες επιτελεστικότητας σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 και τον υπό ανάπτυξη Κ.Α.Δ.Ε.Τ. 2014 ορίζονται ως εξής:

- (Α) «Περιορισμένες βλάβες»,
- (Β) «Σημαντικές βλάβες» και
- (Γ) «Οιονεί κατάρρευση».

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. υιοθετούνται δύο επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας:

- (α) Συχνή σεισμική διέγερση: με πιθανότητα εμφάνισης $P_R=50\%$ στα 50 χρόνια και μέση περίοδο επαναφοράς $T_{RL}=72$ έτη, και
- (β) Σπάνια σεισμική διέγερση: με $P_R=10\%$ και $T_{RL}=475$ έτη.

Αποδεχόμενοι ότι τα κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς ανήκουν στις κατηγορίες σπουδαιότητας III και IV , τότε σύμφωνα με πρόταση της Επιτροπής Υποστήριξης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δύνανται να υιοθετηθούν οι ακόλουθοι στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού: A1, A2, B1. Οι στόχοι αυτοί, όπως προκύπτουν από ένα πλήθος συνδυασμών των σταθμών επιτελεστικότητας και των επιπέδων σεισμικής διέγερσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού φέροντος οργανισμού

P_R για $T_L=50$	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Περιορισμένες βλάβες (Α)	Σημαντικές βλάβες (Β)	Οιονεί κατάρρευση (Γ)
10%	A1	B1	Γ1
50%	A2	B2	Γ2

▪ **Ευρωκώδικας EC8-3 :**

Το τρίτο μέρος του Ευρωκώδικα 8, EC8-3 αναφέρεται στα ίδια επίπεδα επιτελεστικότητας του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με τις ακόλουθες διαφορές:

- (α) η οριακή κατάσταση «περιορισμένες βλάβες» συνδυάζεται με πιθανότητα υπέρβασης $P_R=20\%$ για την οποία αντιστοιχεί μέση περίοδος επαναφοράς $T_{RL}=225$ έτη, και
- (β) συμπεριλαμβάνει ένα επιπλέον επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας: «οιονεί κατάρρευση» (NC) με πιθανότητα υπέρβασης $P_R=2\%$ για την οποία αντιστοιχεί μέση περίοδος επαναφοράς $T_{RL}=2475$ έτη.

Επιπλέον ο EC8-1, όπως και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. , καθορίζει τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας, I, II, III και IV για τις οποίες ορίζει αντίστοιχους συντελεστές σπουδαιότητας $\gamma_i=0.8, 1.0, 1.2$ και 1.4 . Οι κατηγορίες I, II, III και IV ορίζονται ως ακολούθως:

- I Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
- II Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
- III Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
- IV Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κλπ.

Συνεπώς υιοθετώντας την οριακή κατάσταση «περιορισμός βλαβών» κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και προσθέτοντας την οριακή κατάσταση NC, οδηγούμαστε στην προσθήκη μιας επιπλέον

σειράς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Επισημαίνεται ότι οι στόχοι A3, B3 και Γ3 που περιλαμβάνονται ως δυνατότητα στον Πίνακα 2 ελέγχονται κατά την κρίση του μηχανικού. Υπονοείται ότι στην περίπτωση των μνημείων παραμένει στη διακριτική ευχέρεια της Δημόσιας Αρχής καθώς και του κυρίου του έργου η επιβολή εφαρμογής των στόχων A3, B3 και Γ3.

Πίνακας 3-2: Στόχοι σχεδιασμού φέροντος οργανισμού

P _R για T _L =50	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Περιορισμένες βλάβες (A)	Σημαντικές βλάβες (B)	Οιονεί κατάρρευση (Γ)
PR=2% (T _{RL} =2475 έτη)	A1	B1	Γ1
PR=10% (T _{RL} =475 έτη)	A2	B2	Γ2
PR=50% (T _{RL} =72 έτη)	A3	B3	Γ3

(T_{RL}: Περίοδος επαναφοράς)

- **Ιταλικός Κανονισμός για Μνημεία DR 226/02/2011:**
 Ο ιταλικός κανονισμός για τα μνημεία [14] καθορίζει πέντε οριακές καταστάσεις: SLC, SLV, SLD, SLO και SLA. Οι τρεις πρώτες αντιστοιχούν στις οριακές καταστάσεις του EC8 με αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασης: P_R=5%, 10% και 63%. Η τέταρτη καθορίζει «οιονεί ελαστική συμπεριφορά» με πιθανότητα υπέρβασης 81%. Επισημαίνεται ότι για δομικά μέλη και αντικείμενα καλλιτεχνικής αξίας ο ιταλικός κανονισμός ορίζει επιπλέον την οριακή κατάσταση SLA, η οποία συναρτάται με τη λειτουργικότητα και την πολιτιστική αξία τους. Οι πιθανότητες υπέρβασης συνδυάζονται με τη διάρκεια αναφοράς (VR). Η VR μπορεί να υπολογιστεί από την ονομαστική διάρκεια ζωής της κατασκευής (VN), η οποία για ένα συνηθισμένο κτίσμα θεωρείται VN = 50 χρόνια, και το συντελεστή σπουδαιότητας (CU) με εφαρμογή της σχέσης VR = VN x CU. Ο κανονισμός προσδιορίζει τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας προβλέποντας σε κάθε κατηγορία διαφορετική τιμή για το συντελεστή σπουδαιότητας (CU), (ήτοι 0.7, 1.0, 1.5 και 2.0) σε αντιστοιχία με το συντελεστή σπουδαιότητας γ₁ του EC8.
- **Σύγχρονες Προτάσεις για Μνημεία στην Ελλάδα:** Σήμερα στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμη κανονισμός για την αντισεισμική προστασία των μνημείων, αν και έχουν πραγματοποιηθεί αξιόλογες προσπάθειες. Ως παράδειγμα, στην εργασία του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) και του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πρόληψης και Πρόγνωσης Σεισμών (ΕΚΠΠΣ): *“Προσχέδιο Ρυθμιστικού Πλαισίου για τις Δομητικές Επεμβάσεις και την Αντισεισμική Προστασία των Μνημείων”*, [2010] προτείνονται σεισμικές δράσεις σχεδιασμού, καθώς και αποδεκτά επίπεδα βλάβης με βάση τη σπουδαιότητα του μνημείου. Καθορίζονται τρία επίπεδα σπουδαιότητας για τα μνημεία:

 - παγκόσμιας (I1),
 - εθνικής (I2), και
 - τοπικού ενδιαφέροντος (I3).
- Επίσης προτείνεται να κατατάσσονται τα μνημεία στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες ανάλογα με την επισκεψιμότητά τους:

 - C1: Σχεδόν συνεχής παρουσία κοινού ή συχνή παρουσία μεγάλων ομάδων κοινού: (i) κατοικημένα κτίρια στο ιστορικό κέντρο των πόλεων, (ii) μνημεία που

χρησιμοποιούνται ως μουσεία, και (iii) μνημεία που χρησιμοποιούνται συνεχώς ως χώροι λατρείας.

- **C2:** περιστασιακή χρήση ή σποραδική παρουσία μικρών ομάδων κοινού: (i) μνημεία τα οποία είναι επισκέψιμα μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, και (ii) μνημεία σε απομακρυσμένες περιοχές ή μνημεία σπανίως επισκέψιμα.
- **C3:** μνημεία στα οποία η είσοδος επιτρέπεται μόνο σε προσωπικό υπηρεσίας.

Συγκρίνοντας τις τρεις κατηγορίες με αυτές που καθορίζονται κατά EC8 ή ΚΑΝ.ΕΠΕ. , συνάγεται ότι όσον αφορά στην επισκεψιμότητά τους, οι C2 και C3 δύνανται να αντιστοιχιστούν με την κατηγορία Σπουδαιότητας II ενώ η C1 με την κατηγορία Σπουδαιότητας III, ή IV.

Στρατηγικές επεμβάσεων

▪ **Συνήθης Πρακτική:**

Τα κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς πρέπει να αποτιμώνται για μεγάλες σεισμικές απαιτήσεις και σεισμικές δράσεις που χαρακτηρίζονται από μεγάλη περίοδο επαναφοράς. Συνεπώς, η διατήρησή τους σε πολλές περιπτώσεις θα οδηγούσε σε σημαντικές παρεμβατικές επεμβάσεις προκειμένου να ικανοποιηθούν οι «προδιαγραφές ασφαλείας» οι οποίες ισχύουν για νέα κτίρια. Η πρακτική όμως, σύμφωνα με τις αρχές των επεμβάσεων σε μνημεία, επιβάλλει λιγότερο εκτεταμένες επεμβάσεις, οι οποίες, παρ' όλα αυτά, επιθυμείται να εξασφαλίζουν σε κάποιο βαθμό την ασφάλεια του κτίσματος. Σε γενικές γραμμές, οι επεμβάσεις στα κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς θα πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες τρεις αρχές:

- (i) αναστρεψιμότητα,
- (ii) διατηρησιμότητα (στο χρόνο), και
- (iii) εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

Οι κατά κανόνα εφαρμοζόμενες επεμβάσεις σε κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν σε δύο κατηγορίες:

- (i) «Συνολική Βελτίωση» η οποία επιχειρεί να βελτιώσει την ασφάλεια έναντι σεισμού του συνόλου του δομήματος μέσω εκτεταμένων αλλά μη παρεμβατικών επεμβάσεων επιτυγχάνοντας ένα στόχο χαμηλότερο από εκείνο που καθορίζεται για νέες κατασκευές και
- (ii) «Τοπική Βελτίωση», η οποία βελτιώνει την απόκριση της κατασκευής μέσω τοπικών επεμβάσεων χωρίς όμως να επηρεάζεται η συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.

Αν και οι δύο εναλλακτικές λύσεις αποτελούν τον κανόνα, δυστυχώς σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζονται σε κτίσματα πολιτισμικής κληρονομιάς στη χώρα μας χωρίς την πραγματοποίηση αναλύσεων με τις οποίες να καθορίζεται η αποτελεσματικότητα της επέμβασης.

▪ **Μέτρα Επέμβασης Καθορισμένης Διάρκειας - Πρόταση:**

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσεται μεθοδολογία για την εφαρμογή Συνολικής Βελτίωσης σε κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς. Αποσκοπεί στην εφαρμογή επεμβάσεων που πληρούν μια προκαθορισμένη οριακή κατάσταση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μετά το πέρας του οποίου επιβάλλεται να πραγματοποιηθεί εκ νέου αποτίμηση του κτίσματος και ανάλογα με τα αποτελέσματα να επανεξεταστεί η λήψη κατάλληλων μέτρων. Η μεθοδολογία απαιτεί:

- (i) την εισαγωγή του όρου «**συμβατική διάρκεια επέμβασης**», T_{Δ} , η οποία ορίζεται ως ο χρόνος για τον οποίο η επέμβαση εξασφαλίζει ένα επιλεγμένο στόχο, π.χ., B1 για $P_R=10\%$ και A2 για $P_R=50\%$, και

- (ii) τη χρήση είτε μιας σχέσης εξασθένησης είτε φασμάτων σχεδιασμού.

Εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις εξασθένησης, καθώς αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς a_{gR} για τα φάσματα σχεδιασμού στη χώρα μας σύμφωνα με τον EC8-1. Δεδομένου ότι η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, Z_i , ($i= 1, 2, 3$), κάθε εξίσωση προσδιορίζει την αντίστοιχη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς T_{RL} :

- **Ζώνη Z1:** $\log a_{gR} \approx 0.277 \log T_{RL} + 1.579$ (1)

- **Ζώνη Z2:** $\log a_{gR} \approx 0.264 \log T_{RL} + 1.739$ (2)

- **Ζώνη Z3:** $\log a_{gR} \approx 0.240 \log T_{RL} + 2.015$ (3)

Υιοθετώντας κατανομή Poisson για τους σεισμούς, δηλαδή την υπόθεση ότι τα σεισμικά γεγονότα είναι στατιστικά ανεξάρτητα, η T_{Δ} συνδέεται με την περίοδο επαναφοράς T_{RL} και την πιθανότητα υπέρβασης P_R , μέσω της σχέσης:

$$T_{RL} = - \frac{T_{\Delta}}{\ln(1-P_R)} \approx \frac{T_{\Delta}}{P_R} \quad (4)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η a_{gR} που προκύπτει από τις εξισώσεις (1) έως (3) μειώνεται κατά 20% πριν από την εφαρμογή της στα φάσματα του κανονισμού. Εάν η σεισμική δράση ορίζεται με βάση τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} , η τιμή του συντελεστή σπουδαιότητας γ_i ο οποίος πολλαπλασιάζει τη σεισμική δράση αναφοράς για την επίτευξη της ίδιας πιθανότητας υπέρβασης σε χρόνο T_{Δ} , όπως και στα $T_{\Delta R}$ έτη για τα οποία ορίζεται η σεισμική δράση αναφοράς, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση $\gamma_i \approx (T_{\Delta R} / T_{\Delta})^{-1/k}$ (5)

- όπου το k είναι της τάξης του 3. Η παραπάνω σχέση προκύπτει με τη θεώρηση ότι το ετήσιο ποσοστό υπέρβασης $H(a_{gR})$, της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς a_{gR} μπορεί να ληφθεί ότι μεταβάλλεται με την a_{gR} σύμφωνα με τη σχέση $H(a_{gR}) \sim k_0 \cdot a_{gR}^{-k}$. Προτείνεται:
 - (i) Η T_{Δ} να υπερβαίνει τα 50 έτη για στόχο A2.
 - (ii) Η T_{Δ} να προσεγγίζει τα 50 έτη ή τουλάχιστον να μην υπολείπεται των 20 ετών για στόχο B1.
 - (iii) Μετά το πέρας της χρονικής διάρκειας που ορίζει το T_{Δ} για στάθμη B1 να αποτιμάται εκ νέου η σεισμική επικινδυνότητα του κτίσματος.
 - (iv) Εάν και με τις προτεινόμενες επεμβάσεις προκύψει ότι δεν ικανοποιούνται τα ελάχιστα όρια για το T_{Δ} που ορίζονται στα (i) και (ii), το κτίσμα θα πρέπει να θεωρείται ότι ανήκει στην κατηγορία C3 (βλέπε παραπάνω).

Με το πρώτο κριτήριο, (i), επιτρέπεται το κτίσμα να υποστεί ελαφριές βλάβες σε ένα συχνό σεισμό, ενώ με το δεύτερο κριτήριο, (ii), επιτρέπεται οι ενδεχόμενες βλάβες, αν είναι σημαντικές, να είναι επισκευάσιμες.

4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

4.1 Σκοπός

Η γενική σύλληψη

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του Καθολικού της Ι. Μ. Καισαριανής ως έχει, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για τις ανάγκες του υπολογισμού της απόκρισης του Ναού έχουν αναπτυχθεί 3 προσομοιώματα της κατασκευής:

- **Προσομοίωμα 1:** Ο Ναός στο σύνολό του, θεωρείται ως ένα ενιαίο συνεχές σώμα.
- **Προσομοίωμα 2:** Ο Κυρίως Ναός (κατασκευαστική φάση 1) και οι μεταβυζαντινές προσθήκες (κατασκευαστική φάση 2) προσομοιώνονται ως 2 ξεχωριστά σώματα που, λόγω του μεταξύ τους κατασκευαστικού αρμού, συμπεριφέρονται ανεξάρτητα.
- **Προσομοίωμα 3:** Στο προσομοίωμα αυτό εισάγεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των τμημάτων που αντιστοιχούν στις 2 διαφορετικές κατασκευαστικές φάσεις. Ο Κυρίως Ναός και οι μεταβυζαντινές προσθήκες προσομοιώνονται ως σώματα σε επαφή με την εισαγωγή κατάλληλων ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης.

Συγκριτική εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου

Στη συνέχεια, ακολουθεί η συγκριτική εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου για την τιμή της σεισμικής δράσης, δηλαδή της εδαφικής επιτάχυνσης " a_{gR} ", που προβλέπεται στο εθνικό παράρτημα του EC8 για τη σεισμική ζώνη στην οποία εντάσσεται η τοποθεσία του μνημείου. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι αυτή των διαδοχικών προσεγγίσεων από την απλούστερη και "κλασικότερη" στην πληρέστερη και πλέον εξεζητημένη θεώρηση.

Σε πρώτη φάση, ο υπολογισμός της απόκρισης του δομήματος γίνεται με εφαρμογή της Ιδιομορφικής Ανάλυσης Φάσματος Απόκρισης (Ι.Α.Φ.Α.) στα προσομοιώματα 1 και 2, με συνεκτίμηση όλων των σημαντικών ιδιομορφών. Στη συνέχεια, για λόγους σύγκρισης τα 2 παραπάνω προσομοιώματα επαναχρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της "ακριβέστερης" μεθόδου της "ανάλυσης χρονοϊστορίας". Για τις ανάγκες της ανάλυσης αυτής χρησιμοποιήθηκαν 3 σεισμικές καταγραφές οι οποίες κλιμακώθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EC8.

Τέλος, η απόκριση του Ναού επανεκτιμάται με τη χρήση του "προσομοιώματος 3" το οποίο είναι και το πιο πλήρες και ρεαλιστικό. Καθώς η Ι.Α.Φ.Α. είναι μια γραμμική μέθοδος, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί στο προσομοίωμα 3, το οποίο εμφανίζει μη-γραμμική συμπεριφορά εξ αιτίας της μονόπλευρης επαφής. Συνεπώς, η χρήση του προσομοιώματος 3 συνδυάζεται αποκλειστικά με την εκτέλεση "ανάλυσης χρονοϊστορίας" με τα ίδια επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιούνται στις προηγούμενες αναλύσεις.

Στόχος των παραπάνω αναλύσεων είναι η αξιολόγηση των 2 ακραίων θεωρήσεων που αντιπροσωπεύονται από τα προσομοιώματα 1 και 2, μέσω της σύγκρισης των αντιστοιχών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εισαγωγή της αλληλεπίδρασης (προσομοίωμα 3) που αποτελεί μια καλύτερη προσέγγιση της φυσικής συμπεριφοράς του Ναού.

Ένας δεύτερος στόχος που τίθεται είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της I.A.Φ.A. και της “ανάλυσης ιστορίας”. Ως επί το πλείστον, το διαθέσιμο λογισμικό δομοστατικών αναλύσεων παρέχει μόνο την δυνατότητα εκτέλεσης I.A.Φ.A. με συνδυασμό των ιδιομορφικών μεγίστων μέσω της εφαρμογής κατάλληλου κανόνα της επιλογής του χρήστη. Ωστόσο, οι απλοποιήσεις που ακολουθεί η παραπάνω μέθοδος της στερούν ακρίβεια κατά τρόπο που αναπτύχθηκε λεπτομερέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο (υποκεφάλαιο 3.4: “Μέθοδοι αντισεισμικής ανάλυσης”) και εν συντομία έχει ως εξής: Η συμβολή των διαφόρων ιδιομορφών εν γένει δεν μεγιστοποιείται ταυτόχρονα, ενώ σε κτίρια από τοιχοποιία και δὴ χωρίς διαφράγματα, για να ληφθεί υπόψιν ένα επαρκές ποσοστό της συνολικής ταλαντούμενης μάζας είναι απαραίτητη η συνεκτίμηση της συμβολής πολλών ιδιομορφών, που σε κάποιες περιπτώσεις δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής.

Η παραπάνω ανακρίβεια, αν και εκφράζεται σε αρκετό βαθμό στη βιβλιογραφία [Πανταζοπούλου], δεν έχει μελετηθεί επαρκώς πως επιδρά σε περιπτώσεις κτιρίων από τοιχοποιία ώστε να εξαχθούν ποσοτικά συμπεράσματα του πιθανού σφάλματος που συνεπάγεται.

4.2 Το λογισμικό Abaqus

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος Abaqus. Το Abaqus είναι μία σύνθεση από ισχυρά προγράμματα μηχανικής προσομοίωσης, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο μπορεί να επιλύσει προβλήματα που ποικίλουν από σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις μέχρι και τα πλέον απαιτητικά προσομοιώματα. Διαθέτει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη πεπερασμένων στοιχείων για τις ανάγκες πολύπλοκων γεωμετριών, καθώς και έναν εξ ίσου μακρύ κατάλογο υλικών συμπεριφορών.

Πρόκειται για πρόγραμμα γενικής εφαρμογής του οποίου οι δυνατότητες ξεπερνούν κατά πολύ τα δομοστατικά προβλήματα (και γενικότερα τα προβλήματα τάσεων/παραμορφώσεων) και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ευρέως από τον επιστημονικό κόσμο, σε όλα τα πεδία των μηχανικών.

Το Abaqus αποτελείται από **4 κύρια** υποπροϊόντα, για τα οποία υπάρχει η δυνατότητα να συμπληρωθούν από άλλα δευτερεύοντα για τους σκοπούς ειδικότερων εργασιών. Από τα 4 κύρια υποπροϊόντα τα 3 αφορούν στην ανάλυση και είναι τα εξής:

- **Abaqus/Standard:** Το Abaqus/Standard είναι ένα γενικής χρήσης προϊόν ανάλυσης το οποίο μπορεί να επιλύσει μια ευρεία γκάμα γραμμικών και μη-γραμμικών προβλημάτων λύνοντας ένα σύστημα εξισώσεων “έμμεσα” (implicitly) σε κάθε βήμα (increment) της επίλυσης.
- **Abaqus/Explicit:** Το Abaqus/Explicit είναι ένα ειδικής χρήσης προϊόν το οποίο είναι κατάλληλο για την ανάλυση σύντομων, παροδικών δυναμικών γεγονότων και είναι επίσης πολύ αποτελεσματικό σε εντόνως μη-γραμμικά προβλήματα που σχετίζονται με φαινόμενα επαφής, πράγμα που συμβαίνει και στην περίπτωση αυτής της εργασίας.
- **Abaqus/CFD:** Το Abaqus/CFD είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικής υδροδυναμικής που προορίζεται για ασυμπίεστα ρευστά.

Τέλος το τέταρτο κύριο υποπροϊόν αφορά στην διάδραση με τον χρήστη και είναι το Abaqus/CAE που έχει σαν υποσύνολο το Abaqus/Viewer .

- **Abaqus/CAE:** (Complete Abaqus Environment). Είναι ένα διαδραστικό, γραφικό περιβάλλον που συντελεί στην εύκολη δημιουργία του προσομοιώματος, την υποβολή

και τον έλεγχο των αναλύσεων και την γραφική εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Το Abaqus/CAE είναι διαιρεμένο σε ομάδες εντολών (modules), όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε κάποια λογική ενότητα της διαδικασίας προσομοίωσης. Αυτές οι ομάδες εντολών παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Part:** Σχεδιάζεται (ή εισάγεται) η γεωμετρία του προσομοιώματος κατά τμήματα.
- **Property:** Ορίζονται οι ιδιότητες και τα υλικά των μερών του μοντέλου.
- **Assembly:** Γίνεται η συναρμογή των επι μέρους τμημάτων του προσομοιώματος και καθορίζεται ο προσανατολισμός στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων.
- **Step:** Καθορίζεται το είδος της ανάλυσης που θα εφαρμοστεί και τα ζητούμενα μεγέθη.
- **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 σε γραφικό περιβάλλον.
- **Sketch:** Γίνεται η σχεδίαση των απαραίτητων βοηθητικών διδιάστατων σχεδίων (σκίτσων)

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

5.1 Γενικές παραδοχές

Η αντιμετώπιση του κάθε προβλήματος μηχανικής, όπως εν προκειμένω η διερεύνηση της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς ενός δομήματος και ο προσδιορισμός των συναφών μεγεθών, ξεκινά από την μόρφωση ενός κατάλληλου προσομοιώματος. Η φυσική πραγματικότητα που αποτελεί το αντικείμενο της μελέτης εξιδανικεύεται και απλοποιείται κατάλληλα, διαδικασία που συνιστά την μετάβαση στο *μαθηματικό (ή φυσικό) προσομοίωμα* της ενώ στη συνέχεια έπεται η μετάβαση στο *υπολογιστικό προσομοίωμα* το οποίο αποτελεί και το εργαλείο για τον προσδιορισμό των ζητούμενων φυσικών μεγεθών που είναι τα ζητούμενα του προβλήματος.

Για τις ανάγκες της εργασίας, το υπό εξέταση μνημείο προσομοιώθηκε καθ' υπόδειξιν των γεωμετρικών και υλικών του ιδιοτήτων και των συνοριακών του συνθηκών. Για το (υπολογιστικό) προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό του οποίου έγινε χρήση είναι το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων "ABAQUS", όπως ήδη έχει αναφερθεί.

Εδώ κρίνεται σκόπιμο να υπενθυμιστεί η σύλληψη της προσομοίωσης που αναπτύχθηκε εισαγωγικά (υποκεφάλαιο 4.1: “Σκοπός της εργασίας”). Για τις ανάγκες του υπολογισμού της απόκρισης του Ναού έχουν αναπτυχθεί 3 προσομοιώματα της κατασκευής:

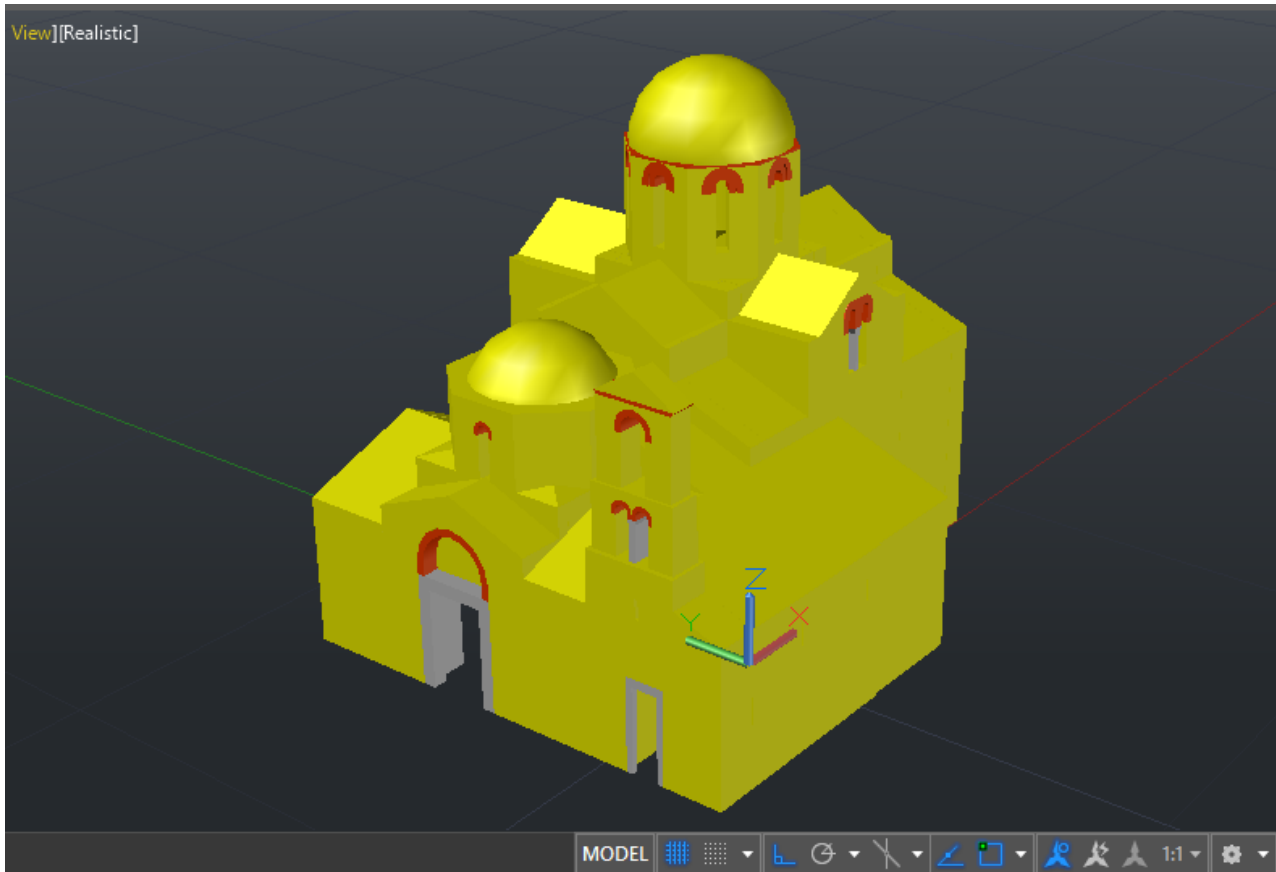
- **Προσομοίωμα 1:** Ο Ναός στο σύνολό του, θεωρείται ως ένα ενιαίο συνεχές σώμα.
- **Προσομοίωμα 2:** Ο Κυρίως Ναός (κατασκευαστική φάση 1) και οι μεταβυζαντινές προσθήκες (κατασκευαστική φάση 2) προσομοιώνονται ως 2 ξεχωριστά σώματα που, λόγω του μεταξύ τους κατασκευαστικού αρμού, συμπεριφέρονται ανεξάρτητα.
- **Προσομοίωμα 3:** Στο προσομοίωμα αυτό εισάγεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των 2 επιμέρους τμημάτων του Καθολικού. Ο Κυρίως Ναός και οι μεταβυζαντινές προσθήκες προσομοιώνονται ως σώματα σε επαφή με την εισαγωγή κατάλληλων ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης.

Και στις 3 παραπάνω περιπτώσεις η προσομοίωση του κτίσματος υπόκειται στις εξής παραδοχές που παρατίθενται και σχολιάζονται παρακάτω:

- Το κτίσμα προσομοιώνεται ως φορέας **τριδιάστατου πεδίου**. Η μη-επιλογή προσομοίωσης του ως ραβδόμορφου ή επιφανειακού φορέα, που θα οδηγούσε σε μικρότερο υπολογιστικό φόρτο, επιβάλλεται από την “τριδιάστατη” γεωμετρία σχεδόν όλων των περιοχών της κατασκευής και την πολυπλοκότητά της που συνεπάγεται την εκτεταμένη ύπαρξη “περιοχών διαταραχής”.
- Εξάιρεση αποτελούν οι ξύλινες δοκίδες που συνδέουν τις γενέσεις ορισμένων τόξων στο εσωτερικό του Κυρίως Ναού και του παρεκκλησίου. Τα παραπάνω μέλη προσομοιώθηκαν ως **αμφιαρθρωτές ράβδοι** που καταπονούνται μόνο αξονικά και συνεπώς αποδόθηκαν από “στοιχεία δικτυώματος”, ώστε να αναδειχθεί ο ρόλος τους ως **εκλυστήρες**.
- Για την προσομοίωση της τοιχοποιίας επιλέγεται ευλόγως το επίπεδο της μακρο-προσομοίωσης.
- Όλα τα υλικά της κατασκευής είναι **ισότροπα** και διέπονται από **γραμμικά ελαστική συμπεριφορά**. Η παραδοχή αυτή κρίνεται ικανοποιητική μέχρι το σημείο της αστοχίας, όμως η σωστή απόδοση της μετέπειτα συμπεριφοράς θα απαιτούσε την εισαγωγή ενός κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας και την γνώση των χαρακτηριστικών που διέπουν τη (μη-γραμμική συμπεριφορά) της τοιχοποιίας μετά τη ρηγμάτωση, όμως η σχετική έρευνα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο.
- Στους υπολογισμούς δεν εισάγεται η γεωμετρική μη-γραμμικότητα. Έτσι, μοναδική πηγή μη-γραμμικής συμπεριφοράς είναι η επαφή (συνοριακή μη-γραμμικότητα) και αφορά στο προσομοίωμα 3.
- Τα επιχρίσματα που καλύπτουν τις εσωτερικές επιφάνειες καθώς και η κεραμοσκεπή προσομοιώθηκαν ως **κατανεμημένες μάζες**, πράγμα που έγινε με την χρήση κατάλληλου είδους πεπερασμένων στοιχείων τα οποία ορίζονται στο “Abaqus” ως “surface elements”.
- Τέλος η θεμελίωση του κτιρίου προσομοιώθηκε ως **πάκτωση της βάσης** του (κάτω επιφάνειας). Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το μνημείο είναι θεμελιωμένο σε βράχο που είναι πρακτικά ακλόνητος, όμως υπόκειται επιπλέον στην απλουστευτική παραδοχή ότι κατά τη διέγερση δεν εμφανίζεται το φαινόμενο του ανασηκώματος της θεμελίωσης, ενώ ο περιορισμός των συνοριακών συνθηκών στη βάση του κτιρίου αγνοεί την ανισοσταθμία του εδάφους.

5.2 Η γεωμετρία των προσομοιωμάτων

Η σχεδίαση του μνημείου στο AutoCAD 2015



Εικόνα 5-1: Σχέδιο του Ναού στο AutoCAD2015.

Το αρχικό βήμα της παρούσας εργασίας ήταν η σχεδίαση του υπό εξέταση μνημείου σε τριδιάστατη μορφή. Εργαλείο για την εργασία αυτή ήταν το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD 2015. Η σχεδίαση στο AutoCAD βασίστηκε σε προγενέστερα σχέδια από τη συλλογή αρχείων αρχιτεκτονικών ερευνών του Ε.Μ.Π. (εικόνα 5-2), με προσαρμογή βάσει της πρόσφατης γεωμετρικής αποτύπωσης του μνημείου που διενεργήθηκε από ερευνητική ομάδα της Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “SEISMO”.

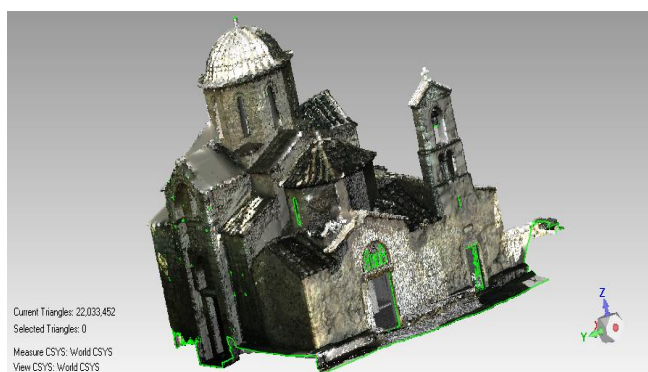
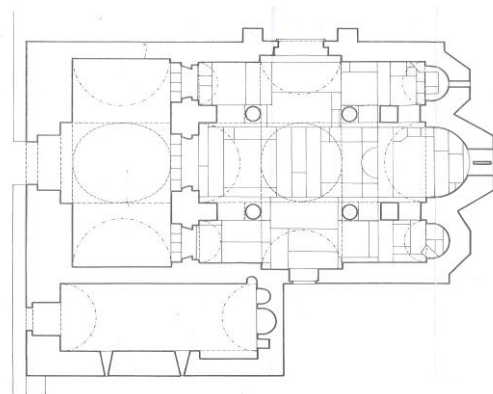
Η αποτύπωση αυτή έγινε με τη σύγχρονη μέθοδο του “laser scanner”. Η διαδικασία αυτής της μεθόδου είναι η σάρωση του προς αποτύπωση αντικειμένου με ακτίνες laser και μέσω της ανάκλασής τους ο προσδιορισμός των (τοπικών) συντεταγμένων εκατομμυρίων σημείων της επιφάνειάς του, τα οποία συνιστούν ένα πυκνό νέφος που αποδίδει το σχήμα του αντικειμένου (εικόνα 5-2). Εν συνεχεία, η πληροφορία αυτή καταχωρείται σε κατάλληλο λογισμικό προς αξιοποίησίν της που στην περίπτωση της εργασίας αυτής ήταν το τοπογραφικό πρόγραμμα “GEOMAGIC QUALIFY”.

Η μέθοδος αξιοποίησης της τοπογραφικής αποτύπωσης που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Στο περιβάλλον του τοπογραφικού προγράμματος (Geomagic Qualify) διενεργήθηκαν στο νέφος

σημείων τομές ανά ένα 1 m και κατά τα 3 επίπεδα (x,y,z), οι οποίες αποθηκεύτηκαν σε μορφή dxf και εισήχθησαν στο AutoCAD.

Στη συνέχεια, με βάση τις παραπάνω τομές διασταυρώθηκαν τα σχέδια από τη συλλογή αρχιτεκτονικών μελετών του ΕΜΠ (στα πλαίσια προγενέστερης αποτύπωσης) και επι πλέον εξήχθησαν οι απαιτούμενες πληροφορίες για τις υπόλοιπες γεωμετρικές διαστάσεις του ναού. Φυσικά, σκοπός του βήματος αυτού είναι η σχεδίαση του φέροντος οργανισμού, στον οποίο όμως δεν συνεισφέρουν τα επιχρίσματα και η κεραμοσκεπή. Έτσι, η σχεδίαση ακολούθησε την παραδοχή ότι τα επιχρίσματα καλύπτουν μια στρώση περίπου 5 cm όπου υπάρχουν, ενώ το πάχος της κεραμοσκεπής είναι γύρω στα 10 cm.

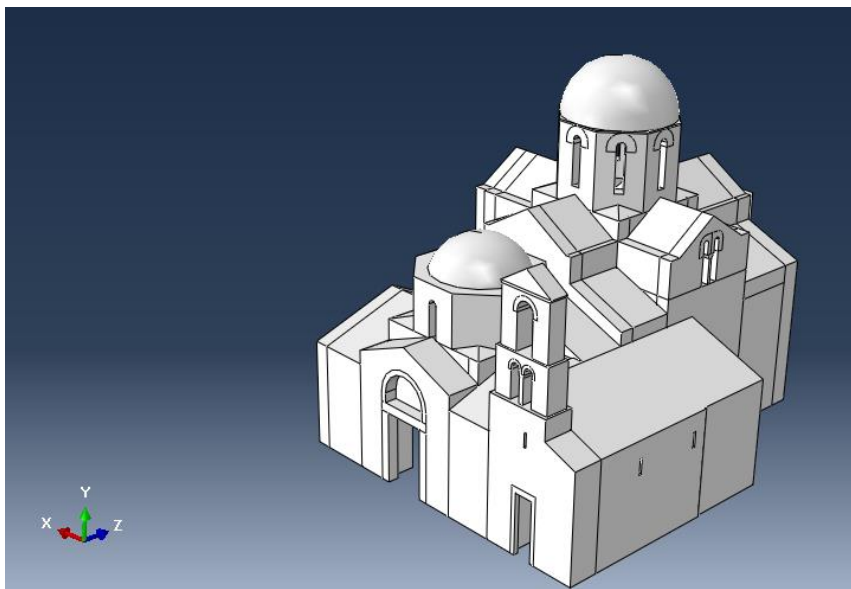
Στην διαδικασία της σχεδίασης, ο Ναός χωρίστηκε σε τμήματα που συνιστούν σχετικά απλές γεωμετρικές ή/και δομικές ενότητες, όπως για παράδειγμα κάποια πρόσοψη ή κάποιος πεσσός, τα οποία σχεδιάστηκαν ως ξεχωριστά "solids". Αυτό συνέβη διότι όπως αναφέρεται και παραπάνω (4.2, σελ. 51), το περιβάλλον του Abaqus είναι διαρθρωμένο ούτως ώστε το προσομοίωμα να σχεδιάζεται κομμάτι-κομμάτι με τα τμήματα αυτά να αποτελούν ξεχωριστά "parts", τα οποία στην πορεία συνδέονται κατάλληλα ώστε να συναρθρώσουν το συνολικό προσομοίωμα.



Εικόνα 5-2: Παρτίθενται ενδεικτικά οι αποτυπώσεις στις οποίες βασίστηκε η σχεδίαση του μνημείου. Αριστερά εικονίζεται η κάτοψη από παλαιότερη αποτύπωση που διατίθεται στη συλλογή αρχείων και αρχιτεκτονικών ερευνών του Ε.Μ.Π. Δεξιά εικονίζεται το 3-διάστατο γεωμετρικό μοντέλο του ναού που βασίζεται στο νέφος σημείων που ελήφθη με τη μέθοδο "lazer scanner" από την τοπογραφική αποτύπωση του μνημείου στα πλαίσια του προγράμματος "SEISMO".

Η σχεδίαση του μνημείου στο περιβάλλον του Abaqus

Το γεωμετρικό σχέδιο του μνημείου στο AutoCAD 2015 έγινε με σκοπό να λειτουργήσει ως υπόδειγμα για την εκ νέου σχεδίαση του μνημείου στο περιβάλλον του Abaqus.



Εικόνα 5-3: Σχέδιο του Καθολικού στο Abaqus

Ως βασικός κανόνας της σχεδίασης του Ναού, τόσο στο AutoCAD 2015 όσο και στο Abaqus, ακολουθήθηκε η απλότητα. Στο γεωμετρικό σχήμα του προσομοιώματος εισήχθει η *βασική μορφολογία του μνημείου*, με στρογγυλοποιήσεις μέχρι και της τάξης των 10 cm επί των μετρούμενων στην αποτύπωση αποστάσεων. Η σκοπιμότητα αυτής της “φιλοσοφίας” είναι ιδιαίτερα έντονη καθώς αποσκοπεί στην, κατά το δυνατόν, απαλλαγή του φυσικού προσομοιώματος του κτιρίου από το “θόρυβο” των περιττών λεπτομερειών, οι οποίες σε ένα κτίριο με ούτως ή άλλως πολύπλοκη γεωμετρία και με ένα “απείθαρχο” υλικό σαν την τοιχοποιία, δεν έχουν να προσφέρουν καμία πρόσθετη ακρίβεια, παρά μόνο μάταιο κόπο και προβλήματα στην διακριτοποίηση του προσομοιώματος.

5.3 Ιδιότητες υλικών

Είδη υλικών

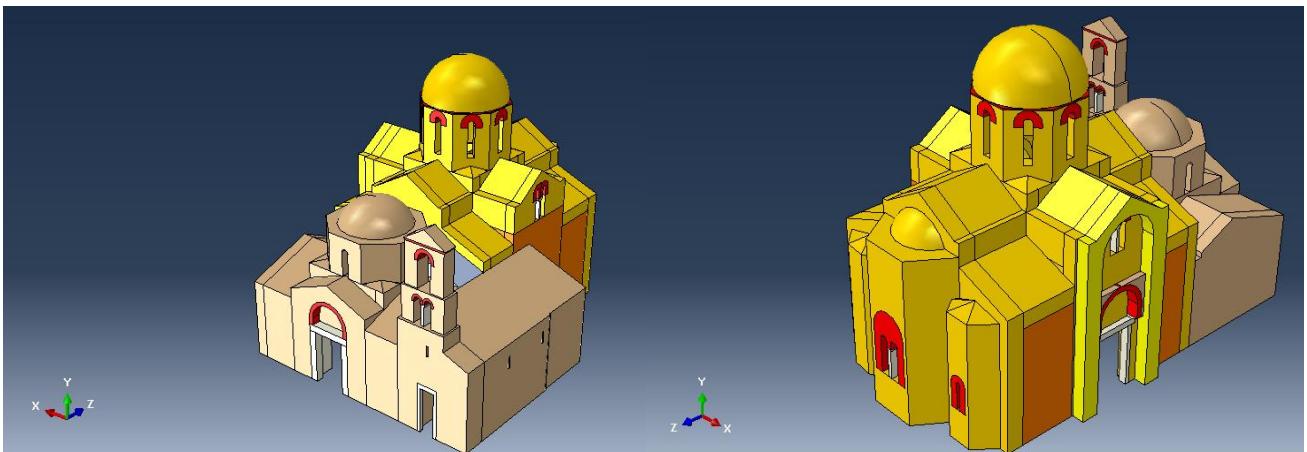
Επόμενο βήμα της διαδικασίας της προσομοίωσης είναι η εισαγωγή των υλικών ιδιοτήτων του φορέα. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα αποτελέσματα της *διαγνωστικής έρευνας επί των υλικών του μνημείου που διενεργήθηκε από ερευνητική ομάδα Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. στα πλαίσια του προγράμματος “SEISMO”*, και ο υπολογισμός των απαραίτητων πρόσθετων ιδιοτήτων (αντοχών και μέτρων ελαστικότητας) έγινε σύμφωνα με τον υπό ανάπτυξη **Κανονισμό για Αποτίμηση και Δομικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας [Κ.Α.Δ.Ε.Τ.]**

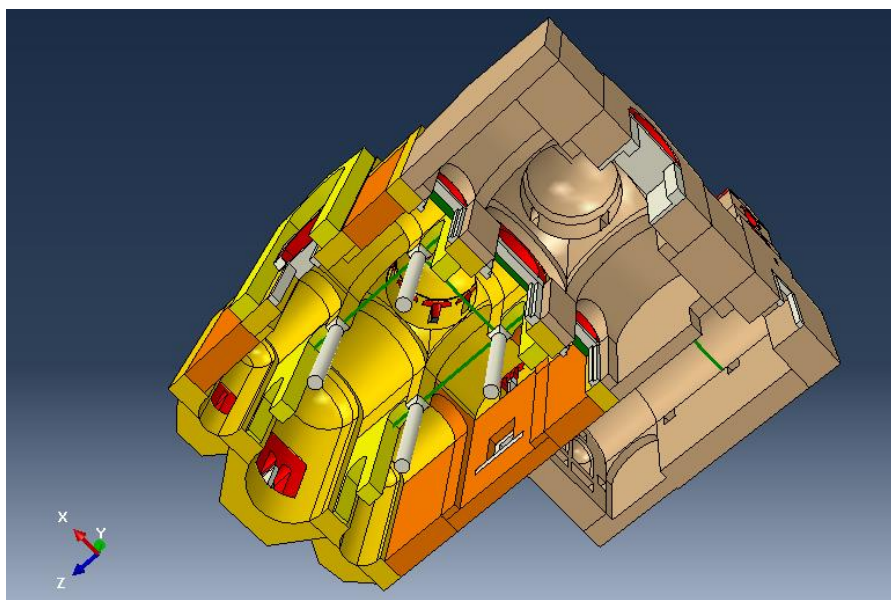
Βάσει των συμπερασμάτων της προαναφερθείσας έρευνας και της μακροσκοπικής επί τόπου παρατήρησης, το κτίριο θεωρήθηκε ότι αποτελείται από τα εξής **8 υλικά**:

- **Λαξευμένη τοιχοποιία με αλληλοδιαπλοκή στρώσεων (Masonry-0)**: Πρόκειται για το είδος τοιχοποιίας που κυριαρχεί στους εσωτερικούς πεσσούς του Κυρίως Ναού και στις προεξέχουσες παραστάδες της βόρειας όψης. Σύμφωνα με την παρατήρηση που αναπτύσσεται αναλυτικότερα στο υποκεφάλαιο 2.2, στους εσωτερικούς πεσσούς του Κυρίως Ναού δεν υπάρχει λόγος ή περιθώριο για χρήση 3-στρωτης τοιχοποιίας όπως

στους εξωτερικούς τοίχους και γι' αυτό γίνεται η παραδοχή ότι το χρησιμοποιούμενο υλικό δόμησης είναι λαξευμένη τοιχοποιία με έντονη αλληλοδιαπλοκή των λίθων.

- **Ιδανική πλινθοπερίκλειστη 3-στρωτη τοιχοποιία (Masonry-1):** Είναι το είδος της τοιχοποιίας που κυριαρχεί στην ανατολική πλευρά, στη δυτική πλευρά, στη βόρεια κεραία και στο άνω μέρος της νότιας κεραίας του Κυρίως Ναού. Επιπροσθέτως, στο ίδιο υλικό θεωρείται ότι βρίσκεται πιο κοντά και τελικά εντάχθηκε και η τοιχοποιία του κελύφους της οροφής (οι ημικυλινδρικές καμάρες κεραιών και γωνιαίων διαμερισμάτων, τα λοφία και ο θόλος του τρούλου).
- **Απλή πλινθοπερίκλειστη 3-στρωτη τοιχοποιία (Masonry-2):** Σ' αυτό το υλικό εντάσσεται η λιγότερο κατεργασμένη τοιχοποιία των όψεων των γωνιαίων διαμερισμάτων και του κάτω μέρους της νότιας κεραίας.
- **Αργολιθοδομή (Masonry-rubble):** Σ' αυτήν την κατηγορία ανήκει το σύνολο της τοιχοποιίας των μεταβυζαντινών προσθηκών, καθώς και η αργολιθοδομή πάνω από το τόξο που κοσμεί την βόρεια είσοδο.
- **Πλινθοδομή (Brick-masonry):** Είναι η μονής στρώσης πλινθοδομή που περιβάλλει τα περισσότερα ανοίγματα. Σ' αυτήν εντάσσονται και τα πλινθόκτιστα γείσα όπου υπάρχουν.
- **Ασθενής στρώση τοιχοποιίας (weak M-leaf):** Αποτελεί το υλικό της ιδιαίτερας παχειάς στρώσης υλικού που έχει προστεθεί στο νοτιο-ανατολικό τμήμα της οροφής του Νάρθηκα με σκοπό τη συνέχιση της στέγης του παρρεκλησίου μέχρι τον τρούλο του Νάρθηκα. Γίνεται η παραδοχή ότι το υλικό αυτό έχει κοινές ιδιότητες με την ενδιάμεση ασθενή στρώση της 3-στρωτης τοιχοποιίας.
- **Μάρμαρο (Marble)**
- **Ξύλο (Wood)**





Εικόνα 5-4: Υλικά του Ναού.

Υλικό δόμησης	Λιθοσώματα	Μάρμαρο:	Οπτόπλινθοι:	Συνδετικό κονίαμα (αυθεντικό κονίαμα)	Ξύλο
Ιδιότητες					
Θλιπτική αντοχή (MPa)	12,00	27,00	5,00	1,00	
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	2,40	5,40	1,00	0,20	
Μέτρο ελαστικότητας (παράλληλες ίνες) (MPa)					10.000
Φαινόμενο βάρος (KN/m ³)	18,00	18,00	15,00	17,00	5,00

Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα της διαγνωστικής επί των υλικών έρευνας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος "ΘΑΛΗΣ".

Τιμές ιδιοτήτων

Ακολουθεί η λεπτομερέστερη παράθεση των ιδιοτήτων των υλικών και των συναφών υπολογισμών:

- Λαξευμένη τοιχοποιία με αλληλοδιαπλοκή στρώσεων (Masonry-0):
 - Αγνόηση υψηλής αντοχής των οπτοπλίνθων.
 - Ποσοστό κονιάματος κατ' όγκον: $\nu=15\%$ (παραδοχή-όπως και στην περίπτωση της ιδανικής πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας)
 - Πυκνότητα: $\rho=1800\text{kg/m}^3$
 - Για την εύρεση της θλιπτικής αντοχής ακολουθείται ο παρακάτω τύπος που δίνει την αντοχή μιας στρώσης "χαμηλής αντοχής" λιθοδομής: (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

$$f_{wc} = \left[\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - f_o + \lambda f_{mc} \right] : \left[1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 1 \right) \right]$$

- Θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων $f_{bc}=8,2 \text{ MPa}$
- Συντελεστής λάξευσης των λιθοσωμάτων (πλήρης λάξευση) $f_o=0$
- Συντελεστής συνάφειας λιθοσώματος-κονιάματος (μέτρια) $\lambda=0,3$
- Θλιπτική αντοχή κονιάματος $f_{mc}=1,7 \text{ MPa}$
- $\left[1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 1 \right) \right] = 1/\xi \geq 1 \rightarrow \xi=1$

Οπότε,

$$f_{wc} = \left[\frac{2}{3} \sqrt{8,2} + 0,3 * 1,7 \right] = \mathbf{2,42 \text{ MPa}}$$

- Θλιπτική αντοχή παράλληλα στους αρμούς: Λαμβάνεται ως το 60% της θλιπτικής της αντοχής κάθετα στους αρμούς, δηλαδή:

$$f_{wc//} = 2,42 * \mathbf{0,6} = \mathbf{1,45 \text{ MPa}}$$

- Εφελκυστική αντοχή:

- $f_{wt\perp} = \max(f_{mt}, f_{jt})$
- Θεωρώ ότι $f_{wt\perp} = f_{mt} = \mathbf{0,20 \text{ MPa}}$
- $f_{wt//} = 2 * f_{wt\perp} = \mathbf{0,40 \text{ MPa}}$

- Μέτρο ελαστικότητας:

- $E_{wc} \approx 1300 * \left(1 - \frac{f_{wc}}{5} \right) * f_{wc} \pm 14$
- $0 * f_{wc}^2 = 1424 \pm 367 \approx \mathbf{2500 \text{ MPa}}$

Γίνεται η παραδοχή ισότροπης συμπεριφοράς. Ως εκ τούτου το υπό γωνίαν μέτρο ελαστικότητας δεν διαφοροποιείται.

- Δείκτης poisson: $\nu = 0,25$

- Ιδανική πλινθοπερίκλειστη 3-στρωτη τοιχοποιία (Masonry-1):

- Αγνόηση υψηλής αντοχής των οπτοπλίνθων.
- Ποσοστό κονιάματος κατ' όγκον: $\mathbf{\nu=15\%}$
- Πυκνότητα: $\mathbf{\rho=1800 \text{ kg/m}^2}$
- Αντοχή εξωτερικής στρώσης: (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

$$f_{wc} = \left[\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - f_o + \lambda f_{mc} \right] : \left[1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 1 \right) \right]$$

- $f_{bc}=8,2 \text{ MPa}$
- $f_o=0$
- $\lambda=0,3$
- $f_{mc}=1,7 \text{ MPa}$
- $\left[1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 1 \right) \right] = \xi \geq 1 \rightarrow \xi=1$

- Οπότε,

$$f_{wc} = \left[\frac{2}{3} \sqrt{8,2} + 0,3 * 1,7 \right] = \mathbf{2,42 \text{ MPa}}$$

- Αντοχή ενδιάμεσης στρώσης: (από την βιβλιογραφία)

$$f_{wc,i} = e^{-10ni} = 10 * e^{-10 * 0,25} = \mathbf{0,82 MPa}$$

- $f_o = 10 MPa$ (για κονίαμα $\sim 1 MPa$)
- $ni = 0,25 MPa$ (0,25-0,45 ανάλογα με το μέγεθος των αδρανών μέσα στη στρώση)

- Θλιπτική αντοχή τρίστρωτης τοιχοποιίας: (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

$$f_{wc} = [\lambda_e(\delta_{e1}f_{c,e1} + \delta_{e2}f_{c,e2}) + \lambda_i f_{c,i}]: (1 + \delta_{e1} + \delta_{e2})$$

- Δέχομαι ότι: $\delta_{e1} = \delta_{e2} = 1$
- $f_{c,e1} = f_{c,e2} = 2,42 MPa$
- $\lambda_e = 0,80$
- $\lambda_i = 1,20$

Οπότε, $f_{wc} = [0,8 * (2,42 + 2,42) MPa + 1,2 * 0,82 MPa]: (1 + 1 + 1) = \mathbf{1,62 MPa}$

- Θλιπτική αντοχή παράλληλα στους αρμούς: Λαμβάνεται ως το 60% της θλιπτικής της αντοχής κάθετα στους αρμούς, δηλαδή:

$$f_{wc//} = [0,8 * 2 * 2,42 * \mathbf{0,6} + 1,2 * 0,82] / 3 = \mathbf{1,1 MPa}$$

- Εφελκυστική αντοχή ιδανικής πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας:

- $f_{wt\perp} = \max(f_{mt}, f_{jt})$
- Θεωρώ ότι $f_{wt\perp} = f_{mt} = \mathbf{0,20 MPa}$
- $f_{wt//} = 2 * f_{wt\perp} = \mathbf{0,40 MPa}$

- Μέτρο ελαστικότητας ιδανικής πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας:

$$E_{wc} \approx 1300 * \left(1 - \frac{f_{wc}}{5}\right) * f_{wc} \pm 140 * f_{wc}^2 = 1424 \pm 367 \approx \mathbf{1500 MPa}$$

Γίνεται η παραδοχή ισότροπης συμπεριφοράς. Ως εκ τούτου το υπό γωνίαν μέτρο ελαστικότητας δεν διαφοροποιείται.

- Δείκτης poisson: $\nu = 0,25$

- **Απλή πλινθοπερίκλειστη 3-στρωτη τοιχοποιία (Masonry-2):**

- Αγνόηση υψηλής αντοχής των οπτοπλίνθων.
- Ποσοστό κονιάματος κατ' όγκον: $\mathbf{\nu=35\%}$
- Πυκνότητα: $\mathbf{\rho=1800 kg/m^2}$
- Αντοχή εξωτερικής στρώσης: (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

$$f_{wc} = \left[\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - f_o + \lambda f_{mc} \right] : \left[1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 0,3 \right) \right]$$

- $f_{bc} = 8,2 MPa$
- $f_o = 1 MPa$ (λαξευτή λιθοδομή)
- $\lambda = 0,4$
- $f_{mc} = 1,7 MPa$

$$\left[1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 0,3\right)\right] = \xi \geq 1 \rightarrow \xi = 1,175$$

Οπότε,

$$f_{wc} = [1,59 + 1,175] = \mathbf{1,35 MPa}$$

- Αντοχή ενδιάμεσης στρώσης: (από τη βιβλιογραφία)

$$f_{wc,i} = e^{-10ni} = 10 * e^{-10 * 0,25} = \mathbf{0,82 MPa}$$

- $f_o = 10 MPa$ (Κονίαμα ~1 MPa)
- $ni = 0,25 MPa$ (0,25-0,45 ανάλογα με το μέγεθος των αδρανών μέσα στη στρώση)

- Θλιπτική αντοχή τρίστρωτης τοιχοποιίας: (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

$$f_{wc} = [\lambda_e(\delta_{e1}f_{c,e1} + \delta_{e2}f_{c,e2}) + \lambda_i f_{c,i}]: (1 + \delta_{e1} + \delta_{e2})$$

- Δέχομαι ότι: $\delta_{e1} = \delta_{e2} = 1$
- $f_{c,e1} = f_{c,e2} = 1,35 MPa$
- $\lambda_e = 0,80$
- $\lambda_i = 1,20$

$$\text{Οπότε, } f_{wc} = [0,8 * (1,35 + 1,35) MPa + 1,2 * 0,82 MPa]: (1 + 1 + 1) = \mathbf{1,00 MPa}$$

- Θλιπτική αντοχή παράλληλα στους αρμούς: Λαμβάνεται ως το 60% της θλιπτικής της αντοχής κάθετα στους αρμούς, δηλαδή:

$$f_{wc//} = [0,8 * 2 * 1,35 * \mathbf{0,6} + 1,2 * 0,82] / 3 = \mathbf{0,76 MPa}$$

- Εφελκυστική αντοχή απλής πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας:

- $f_{wt\perp} = \max(f_{mt}, f_{jt})$
- Θεωρώ ότι $f_{wt\perp} = f_{mt} = \mathbf{0,20 MPa}$
- $f_{wt//} = 2 * f_{wt\perp} = \mathbf{0,40 MPa}$

- Μέτρο ελαστικότητας απλής πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας:

$$\bullet E_{wc} \approx 1300 * \left(1 - \frac{f_{wc}}{5}\right) * f_{wc} \pm 140 * f_{wc}^2 = 1040 \pm 140 \approx \mathbf{1100 MPa}$$

Γίνεται η παραδοχή ισότροπης συμπεριφοράς. Ως εκ τούτου το υπό γωνίαν μέτρο ελαστικότητας δεν διαφοροποιείται.

- Δείκτης poisson: $\nu = 0,25$

- **Αργολιθοδομή (Masonry-rubble):**

- Αποτελείται από λιθοσώματα που ως επί το πλείστον είναι ασβεστόλιθοι και σχιστόλιθοι.
- Ποσοστό κονιάματος κατ' όγκον: $\mathbf{v=40\%}$

- Πυκνότητα: $\rho = v * \rho_{\text{κονιάματος}} + (1 - v) * \rho_{\text{ασβεστόλιου}} = 0,4 * 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0,6 * 2600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Ελλείπει παραπάνω δεδομένων για τις αντοχές των λιθοσωμάτων της τοιχοποιίας, λαμβάνουμε την τιμή της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας από την εργασία (Finite element analysis and fragility curves for the evaluation of restoration mortars behavior regarding the earthquake protection of historic structures K. Syrmakizis a, O.Mavrouli a, P.Papaevaggeliou a, E.Aggelakopolulou b,n, A.Bakolas b, A.Μογορούλου):

$$f_{wc} = 1,30 \text{ MPa}$$

- Η τοιχοποιία είναι αργολιθοδομή με μικρών διαστάσεων λίθους και με μεγάλη ποσότητα κονιάματος (~40%). Αυτό σημαίνει ότι η ανισοτροπία του υλικού είναι μειωμένη, οπότε:

$$f_{wc\perp} = f_{wc\parallel}$$

- Εφελκυστική αντοχή αργολιθοδομής:

- $f_{wt\perp} = \max(f_{mt}, f_{jt})$
- Θεωρώ ότι $f_{wt\perp} = f_{mt} = 0,20 \text{ MPa}$
- Λόγω μειωμένης ανισοτροπίας, θεωρώ $f_{wt\parallel} = f_{wt\perp}$

- $E_{wc} \approx 1300 * \left(1 - \frac{f_{wc}}{5}\right) * f_{wc} \pm 140 * f_{wc}^2 = 1250 \pm 236,6 \approx 1300 \text{ MPa}$
(σύμφωνα και με την προαναφερθείσα εργασία).
- Δείκτης poisson: $\nu = 0,25$

▪ Πλινθοδομή (Brick-masonry):

- Λόγος πάχους αρμών προς πάχος πλίνθων : $a = \frac{t_{jm}}{tbm} = 0,9$
- Πυκνότητα πλίνθων: $\rho_b = 1500 \text{ kg/m}^3$
- Πυκνότητα κονιάματος: $\rho_m = 1700 \text{ kg/m}^3$
- Πυκνότητα: $\rho = \frac{\rho_b + \rho_m * v}{1 + v} = \frac{1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,9}{1 + 0,9} = 1595 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Για την εύρεση της θλιπτικής αντοχής της πλινθοδομής ακολουθείται ο παρακάτω τύπος που δίνει την θλιπτική αντοχή “καλοδομημένης οπτοπλινθοδομής” (μονόστρωτης ή δίστρωτης με διάτονα λιθοσώματα). (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.)

$$f_{wc} = [f_{mc} + 0,4 * (f_{bc} - f_{mc})] * (1 - 0,8 * \sqrt[3]{a})$$

- Αντοχή λιθοσωμάτων: $f_{bc} = 33,64 \text{ MPa}$
- Αντοχή κονιάματος: $f_{mc} = 1,70 \text{ MPa}$
- $a = \frac{t_{jm}}{tbm} = 0,9$

$$\text{Οπότε, } f_{wc} = 3,30 \text{ MPa}$$

- Θλιπτική αντοχή παράλληλα στους αρμούς: Λαμβάνεται ως το 60% της θλιπτικής της αντοχής κάθετα στους αρμούς, δηλαδή:
 $f_{wc\parallel} = 0,60 * 3,30 \text{ MPa} = 1,98 \text{ MPa}$

- Εφελκυστική αντοχή: Θεωρείται ότι

$$f_{wt\perp} = f_{mt} = 0,20 \text{ MPa}$$

- Μέτρο ελαστικότητας πλινθοδομής:
 - $E_{wc} \approx 1300 * \left(1 - \frac{f_{wc}}{5}\right) * f_{wc} \pm 140 * f_{wc}^2 = 1458,60 \pm 1524,60 \approx 2000 \text{ MPa}$
- Δείκτης poisson: $\nu = 0,20$

- **Ασθενής στρώση τοιχοποιίας (weak M-leaf):**
 - Θλιπτική αντοχή: (από τη βιβλιογραφία)

$$f_{wc,i} = e^{-10ni} = 10 * e^{-10 * 0,25} = 0,82 \text{ MPa}$$
 - $f_o = 10 \text{ MPa}$ (για κονίαμα $\sim 1 \text{ MPa}$)
 - $ni = 0,25 \text{ MPa}$ (0,25-0,45 ανάλογα με το μέγεθος των αδρανών μέσα στη στρώση)
 - Εφελκυστική αντοχή αργολιθοδομής:
 - $f_{wt\perp} = \max(f_{mt}, f_{jt})$
 - Θεωρώ ότι $f_{wt\perp} = f_{mt} = 0,20 \text{ MPa}$
 - Λόγω μειωμένης ανισοτροπίας, θεωρώ $f_{wt\parallel} = f_{wt\perp}$
 - $E_{wc} \approx 1300 * \left(1 - \frac{f_{wc}}{5}\right) * f_{wc} \pm 140 * f_{wc}^2 = 1250 \pm 236,6 \approx 820 \text{ MPa}$
 - Δείκτης poisson: $\nu = 0,25$

- **Μάρμαρο (Marble):**
 - Πυκνότητα : $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$
 - Θλιπτική αντοχή : $f_c = 27,00 \text{ MPa}$
 - Εφελκυστική αντοχή : $f_t = 5,00 \text{ MPa}$
 - Μέτρο ελαστικότητας : $E = 51800 \text{ MPa}$
 - Δείκτης Poisson : $\nu = 0,33$

- **Ξύλο (Wood):**
 - Πυκνότητα : $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$
 - Θλιπτική αντοχή : $f_c = 27,0 \text{ MPa}$
 - Εφελκυστική αντοχή : $f_t = 5,40 \text{ MPa}$
 - Μέτρο ελαστικότητας : $E = 10000 \text{ MPa}$
 - Δείκτης Poisson : $\nu = 0,30$

- **Επικαλύψεις:**
 - **Στέγη** : $\rho = 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,10\text{m} = 170 \text{ kg/m}^2$
 - **Εσωτερικά επιχρίσματα** : $\rho = 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,05\text{m} = 85 \text{ kg/m}^2$

Κριτήριο αστοχίας

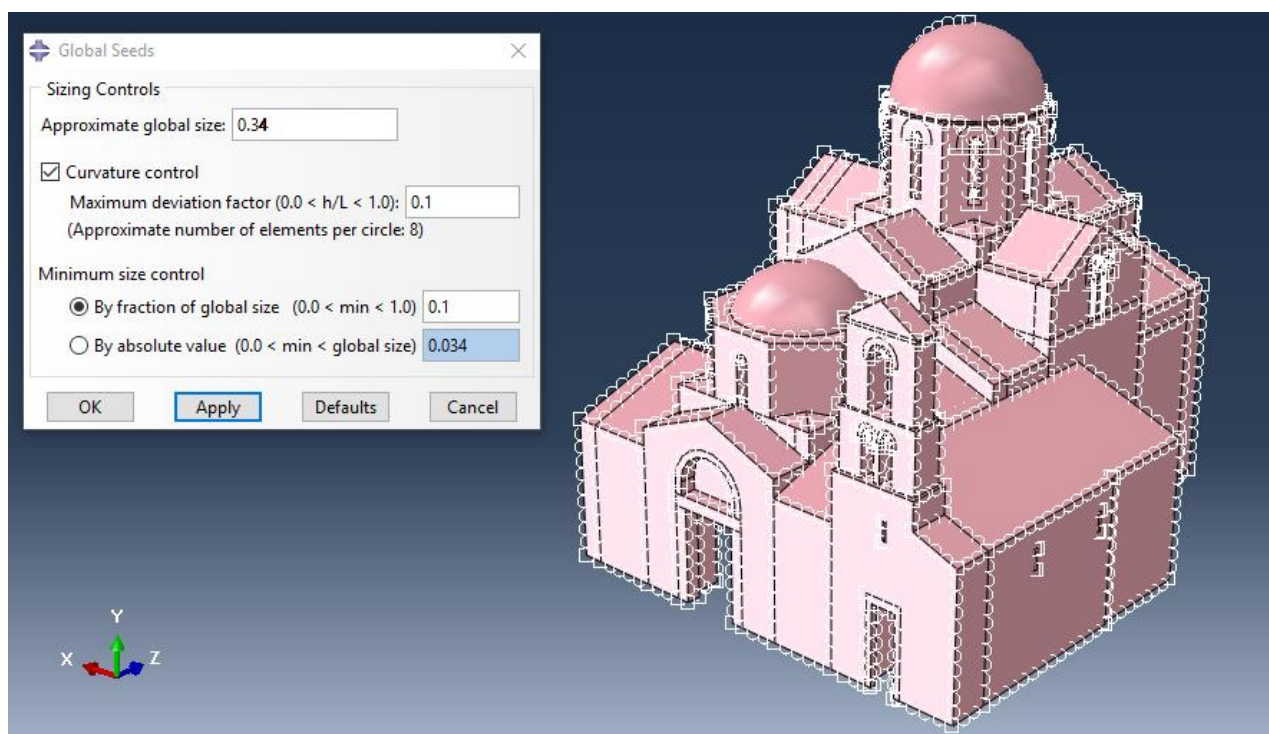
Το κριτήριο αστοχίας που ακολουθείται είναι η **μέγιστη κύρια εφελκυστική** και η **μέγιστη κύρια θλιπτική τάση**. Συγκεκριμένα:

- Θεωρείται ότι η αντοχή της τοιχοποιίας σε **κύριο εφελκυσμό** είναι ίση με την εφελκυστική της αντοχή παράλληλα στους αρμούς, δηλαδή: $f_{wt} = f_{wt\perp t}$ που, όπως φάνηκε παραπάνω είναι ίδια για όλα τα είδη τοιχοποιίας, ίση με **0,20 MPa**.

- Η αντοχή της τοιχοποιίας σε **κύρια θλίψη** θεωρείται συντηρητικά ίση με **1,00 MPa**.
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν η τριαξονικότητα της έντασης, δηλαδή η επίδραση των υπολοίπων κυρίων τάσεων.
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν η ανισοτροπία των αντοχών, δηλαδή ο προσανατολισμός των αρμών σε σχέση με τις κύριες τάσεις.
- Το παραπάνω κριτήριο αστοχίας είναι υπερβολικά συντηρητικό για τα μαρμάρινα στοιχεία, τα οποία διαθέτουν πολύ υψηλότερες αντοχές. Για το λόγο αυτό, τα συμπεράσματα των αναλύσεων δεν εστιάζουν στα στοιχεία αυτά.
- Λαμβάνονται υπόψιν υπερβάσεις αντοχών οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε έκταση της τάξης μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων και άνω. Η απόκλιση, σε τοπικό επίπεδο, του (μακρο)προσομοιώματος που χρησιμοποιείται από την πολυφασική δομή της τοιχοποιίας και επιπροσθέτως οι ατέλειες του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, καθιστούν αδύνατη την πρόβλεψη τασικών συγκεντρώσεων.

5.4 Η διακριτοποίηση του φορέα

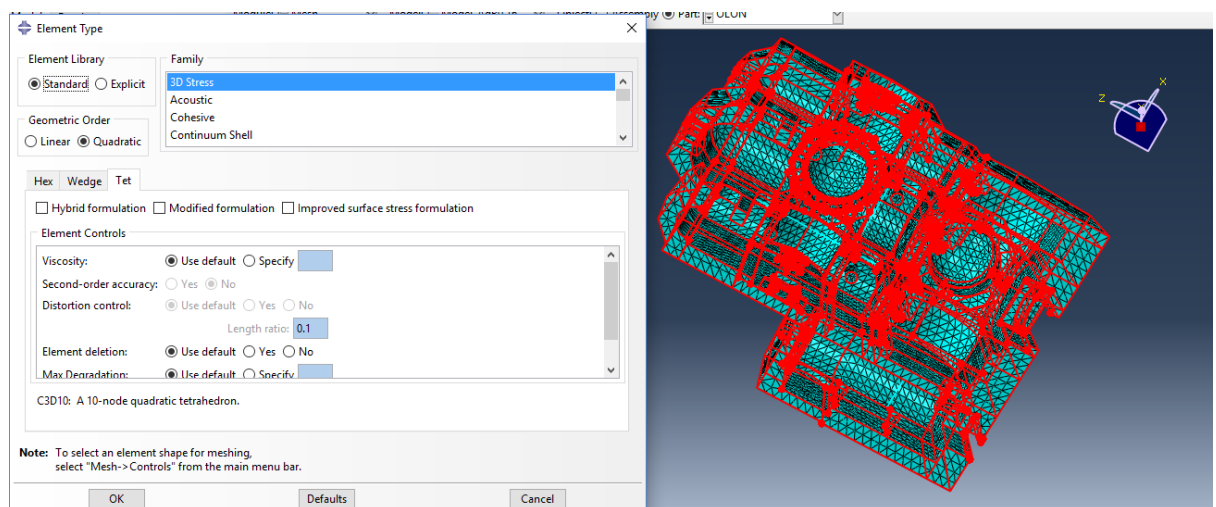
Ο φορέας διακριτοποιείται με **τετραεδρικά στοιχεία 3 βαθμών ελευθερίας, χαρακτηριστικού μήκους 25-35 cm** (παρεμφερές με το μέγεθος των λιθοσωμάτων) (εικόνα 5-9).



Εικόνα 5-5: Διακριτοποίηση φορέα (προσομοίωμα "1" για τις ανάγκες της ανάλυσης χρονοϊστορίας). Ορίζεται ως μέσο μήκος των πεπερασμένων στοιχείων τα 34 cm.

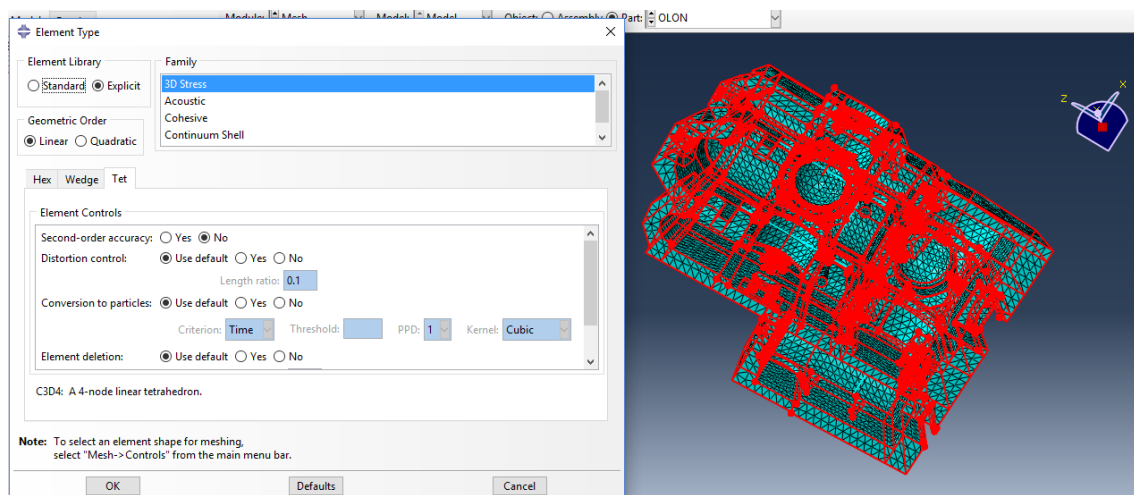
- Στα προσομοιώματα που εφαρμόζεται ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης (I.A.Φ.Α.) τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι δευτεροβάθμια (quadratic), δηλαδή περιλαμβάνουν κόμβους όχι μόνο στις 4 κορυφές τους αλλά και στα μέσα των 6 ακμών τους. Η ύπαρξη πρόσθετων κόμβων στα μέσα των ακμών προσδίδει στα πεπερασμένα στοιχεία μεγαλύτερη ευελιξία που τα βοηθά να προβλέπουν ακριβέστερα την παραμόρφωση του φορέα και κατ' επέκτασιν και την εντατική του κατάσταση.

Σύμφωνα με την σύμβαση ορολογίας του "Abaqus", σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο αποδίδεται ένα όνομα που υποδεικνύει τα βασικά χαρακτηριστικά που το ταυτοποιούν. Εν προκειμένω, τα προαναφερθέντα στοιχεία ανήκουν στην οικογένεια των "στοιχείων όγκου" (Continuum element), έχουν 3 βαθμούς ελευθερίας (3D) και περιλαμβάνουν 10 κόμβους (10). Με τον τρόπο αυτό για τα στοιχεία αυτά προκύπτει η ονομασία **C3D10**.



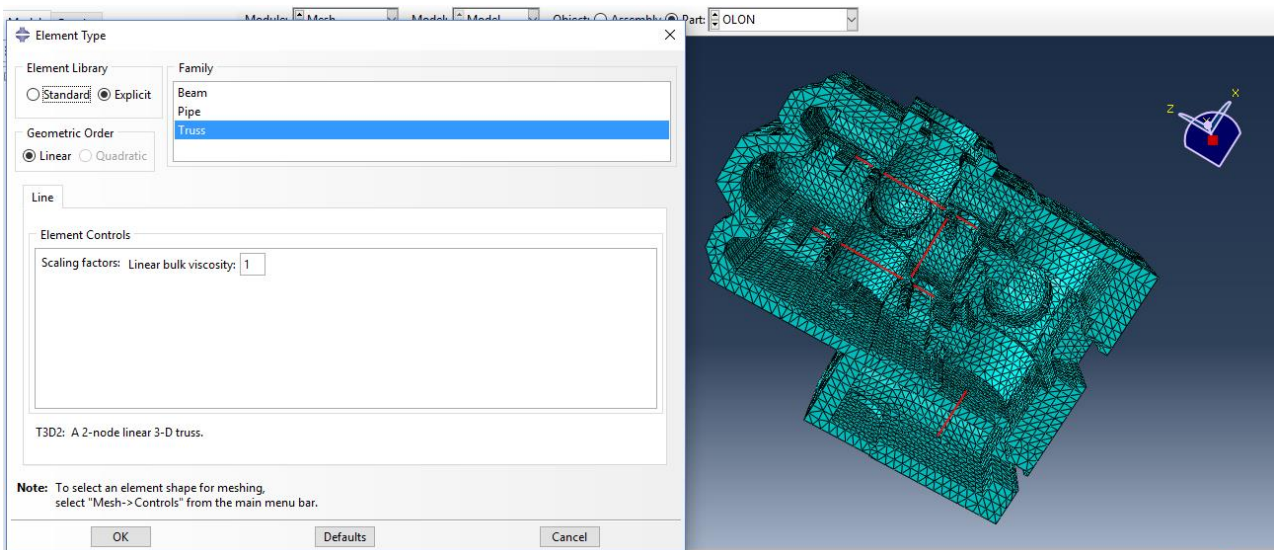
Εικόνα 5-6: Επιλογή διακριτοποίησης φορέα με C3D10.

- Αντιθέτως, για τις ανάγκες των αναλύσεων χρονοϊστορίας επιλέχθηκαν τα υπολογιστικώς βολικά *πρωτοβάθμια* (linear) τετραεδρικά στοιχεία (**C3D4** κατά τη σύμβαση ορολογίας του Abaqus). Μην έχοντας την ευελιξία των C3D10, τα στοιχεία αυτά οδηγούν σε αρκετά επισφαλέστερα αποτελέσματα, ιδίως σε περίπτωση καμπτικής παραμόρφωσης του φορέα, όμως μειώνουν κατά πολύ (περίπου κατά το ¼) τον χρόνο των ούτως ή άλλως χρονοβόρων αναλύσεων χρονοϊστορίας.



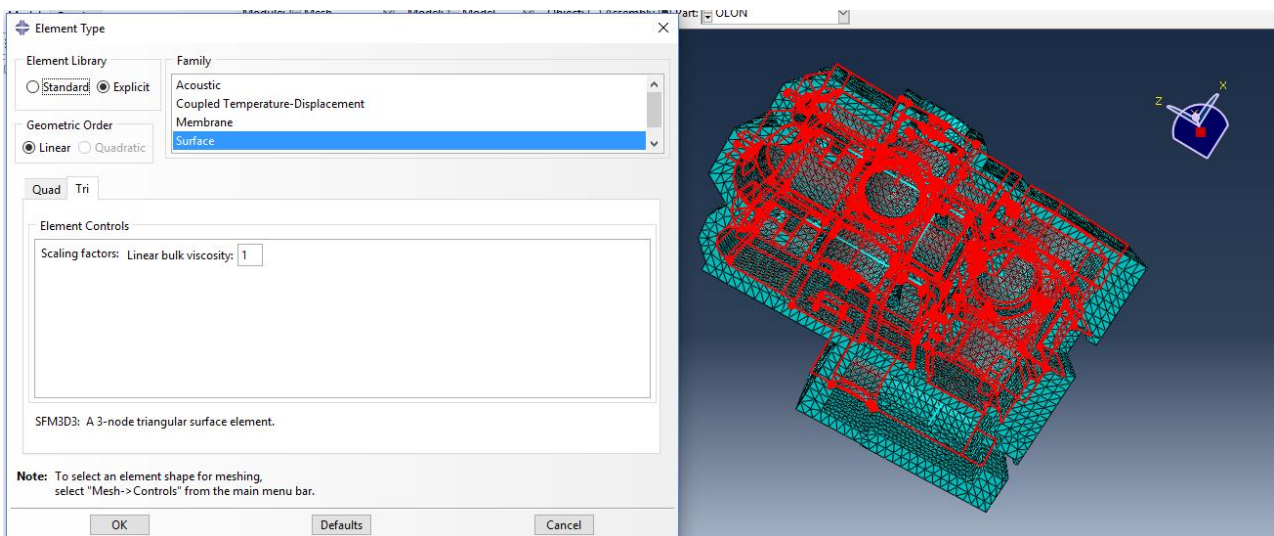
Εικόνα 5-7: Επιλογή διακριτοποίησης φορέα με C3D4.

Οι συνολικά 8 ξύλινοι ελκυστήρες στο εσωτερικό του κτιρίου αποδόθηκαν με τη χρήση στοιχείων δικτυώματος (**T3D2**).



Εικόνα 5-8: Επιλογή διακριτοποίησης των ξύλινων ελκυστήρων με T3D2.

Οι επιφανειακά κατανεμημένες μάζες του προσομοιώματος (επιχρίσματα, κεραμοσκεπή) διακριτοποιήθηκαν με τη χρήση κατάλληλων επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, χωρίς πάχος και στιβαρότητα, παρά μόνο επιφανειακά κατανεμημένη μάζα. (**SFM3D3** όταν συνδυάζονται με C3D4 και **SFM3D6** όταν συνδυάζονται με C3D10 – ώστε να υπάρχει ταύτιση των κόμβων).



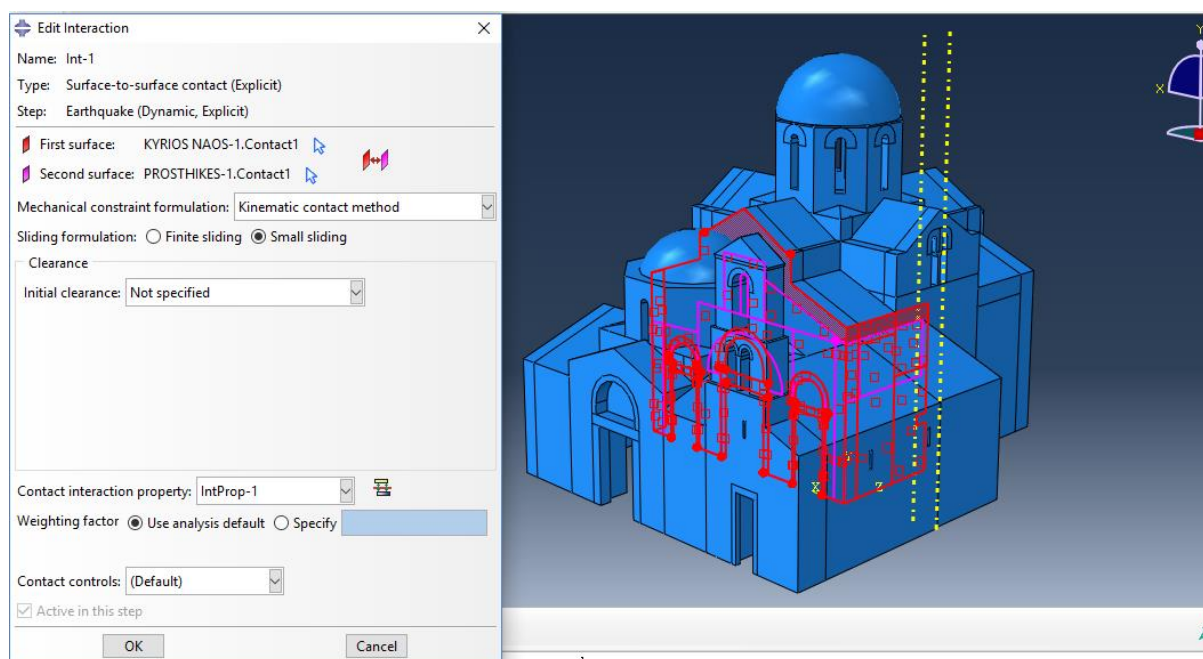
Εικόνα 5-9: Επιλογή διακριτοποίησης φορέα με SFM3D3.

5.5 Το προσομοίωμα "3"

Οι διεπιφάνειες επαφής

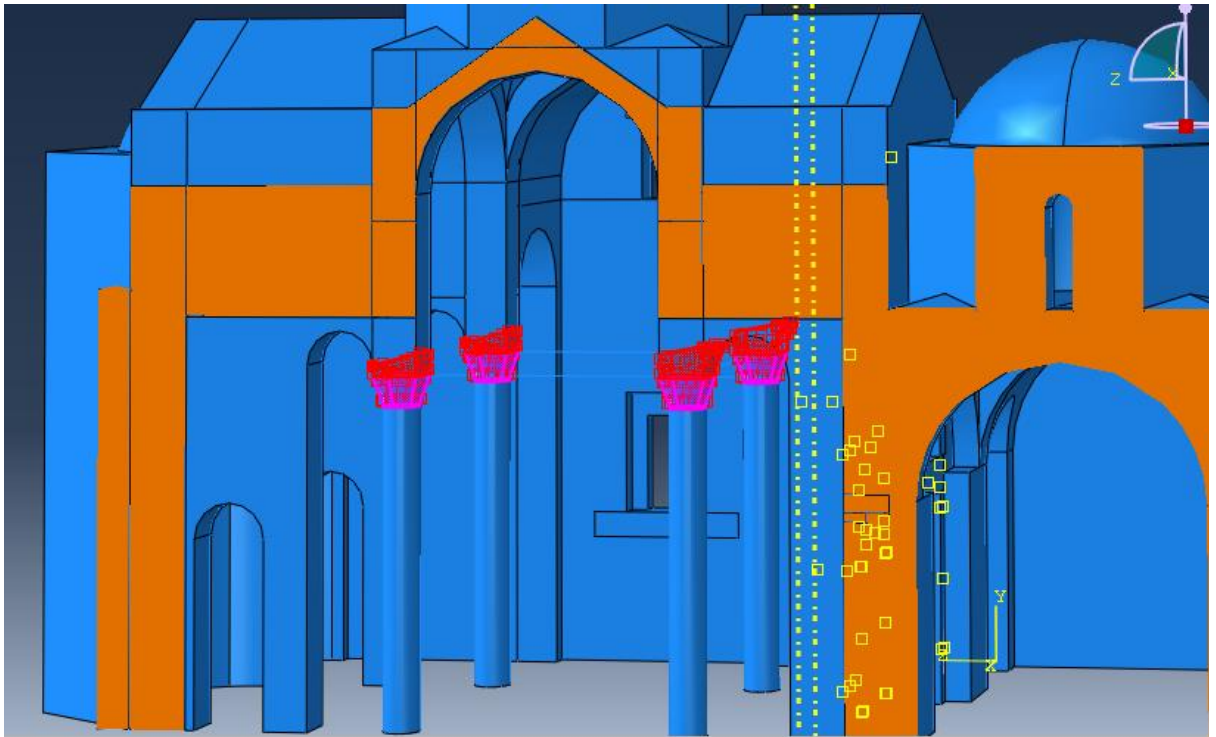
Στο προσομοίωμα αυτό που είναι και το τελευταίο και το πληρέστερο που μορφώθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, τα τμήματα του μνημείου που διαχωρίζονται από κατασκευαστικό αρμό που αποκλείει την σύνδεση των εκατέρωθεν υλικών, προσομοιώνονται ως ξεχωριστά σώματα σε επαφή με τα γειτονικά τους. Αυτοί οι αρμοί θεωρείται ότι εντοπίζονται στις παρακάτω διεπιφάνειες:

- Μεταξύ του Κυρίως Ναού (μεσοβυζαντινή φάση κατασκευής) και του Νάρθηκα και του παρεκκλησίου (μεταβυζαντινή φάση κατασκευής).



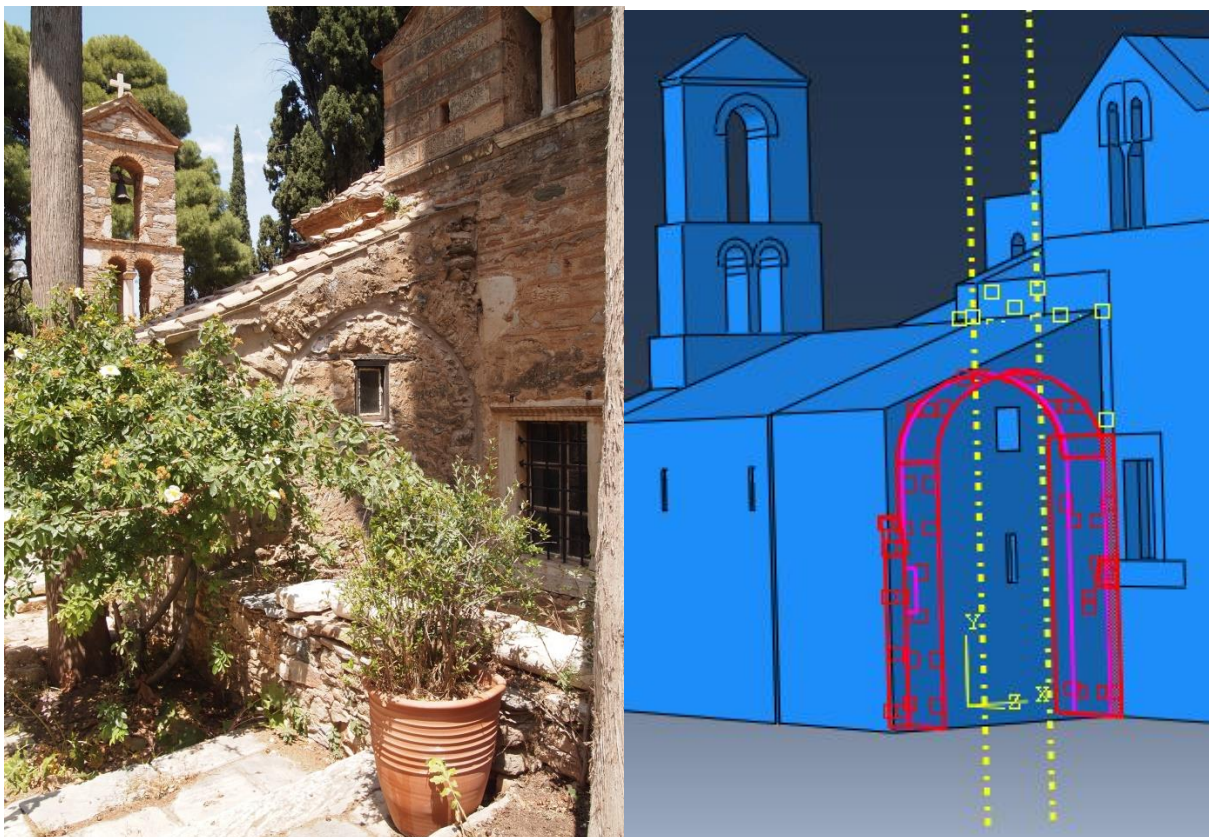
Εικόνα 5-10

- Στη σύνδεση των κιονόκρανων των 4 κεντρικών κίωνων του Κυρίως Ναού με την υπερκείμενη τοιχοποιία.



Εικόνα 5-11

- Στη σύνδεση του ανατολικού «τυμπάνου» του παρεκκλησίου με τον νότιο τοίχο και την οροφή του.



Εικόνα 5-12: Εισαγωγή ασυνέχειας στον ανατολικό τοίχο του παρεκκλησίου και παραλληλισμός με την πραγματική κατασκευή.

Ιδιότητες αλληλεπίδρασης

Πολλά προβλήματα μηχανικής εμπλέκουν επαφή μεταξύ δυο η περισσότερων μερών του συνολικού φορέα. Σ' αυτά τα προβλήματα, σε σώματα που βρίσκονται σε επαφή δρα μια δύναμη κάθετη στην διεπιφάνεια επαφής τους. Επίσης, αν υπάρχει και τριβή, τότε στην διεπιφάνεια θα εμφανιστούν και διατμητικές δυνάμεις οι οποίες θα αντιτίθενται στην εφαπτομενική κίνηση (αμοιβαία ολίσθηση) των σωμάτων. Ο γενικός σκοπός της εισαγωγής στην προσομοίωση της επαφής, είναι ο προσδιορισμός των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και ο υπολογισμός των δυνάμεων επαφής που θα προκύψουν.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης των φαινομένων επαφής, το Abaqus διαθέτει κατάλληλη βιβλιοθήκη "καταστατικών νόμων επιφανειών". Στα πλαίσια αυτών των "νόμων" εντάσσεται ο προσδιορισμός της πίεσης επαφής (p) που αναπτύσσεται μεταξύ των δυο επιφανειών, συναρτήσει της αλληλοδιείσδυσής τους (h). Η συνάρτηση $p = p(h)$ που εφαρμόζεται στο προσομοίωμα "3", είναι η εξής:

$$p = 0 \quad \text{for } h < 0 \quad (\text{open}), \text{ and}$$

$$h = 0 \quad \text{for } p > 0 \quad (\text{closed}).$$

δηλαδή, η επαφή θεωρείται απολύτως ανένδοτη και μονόπλευρη (**hard contact**).

Επίσης, στο προσομοίωμα αυτό λαμβάνεται υπόψιν η ύπαρξη τριβής. Η τιμή του συντελεστή τριβής δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί, ούτε είναι κατ' ανάγκη σταθερή ως προς την τιμή της θλιπτικής τάσης, της ολίσθησης και της ανακύκλισης. Σε μια πρώτη προσέγγιση του φαινομένου που επιχειρείται από αυτήν την εργασία, **ο συντελεστής τριβής θεωρείται σταθερός με τιμή $\mu=0,5$** . (Ο Ευρωκώδικας 6 προτείνει μια σταθερή και συντηρητική τιμή του συντελεστή τριβής, $\mu=0,40$)

Τέλος, η απόσβεση κατά την κρούση αγνοείται ώστε να μην επιβαρυνθεί το υπολογιστικό προσομοίωμα και αυξηθεί ο απαιτούμενος χρόνος των αναλύσεων χρονοϊστορίας.

Υπολογιστική αντιμετώπιση των φαινομένων επαφής

Σε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οι συνθήκες επαφής είναι μια ιδιαίτερη κλάση ασυνεχών κινηματικών δεσμεύσεων (discontinuous constraints), καθώς εφαρμόζονται μόνο όταν οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή. Μόλις αποχωρίζονται, τότε η δέσμευση παύει να ισχύει. Οπότε, η ανάλυση πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει πότε δύο επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή ώστε να επιβάλει τη δέσμευση, και πότε δεν είναι ώστε να την απομακρύνει.

Στο προσομοίωμα αυτό, ο ορισμός των (δυναμικών) επαφών γίνεται με βάση τις επιφάνειες (surface based type) και ο επιλεχθείς αλγόριθμος (contact pairs algorithm) προϋποθέτει τον, ένα προς ένα προσδιορισμό των ζευγών επιφανειών που δύναται να έρθουν σε επαφή (βλέπε τις εικόνες παραπάνω).

Πολλές φορές το Abaqus χρησιμοποιεί την, σύμφωνα με την ορολογία του, "master-slave" προσέγγιση. Μια από τις δύο επιφάνειες ορίζεται από το χρήστη ως "κυρίαρχη" (master), η άλλη ορίζεται ως "υποτελής" (slave) και επιβάλλεται η κινηματική συνθήκη ότι οι κόμβοι της δεύτερης δεν επιτρέπεται να διαπεράσουν την πρώτη, χωρίς όμως να υπάρχει και ο αντίστροφος περιορισμός με αποτέλεσμα η "master" επιφάνεια να μην αποκλείεται να διεισδύσει στην "slave". Για το λόγο αυτό συνιστάται μια προσεκτικότερη επιλογή του ρόλου των επιφανειών. Δύο απλοί κανόνες είναι οι ακόλουθοι:

- Η επιφάνεια "slave" πρέπει να είναι αυτή με την πυκνότερη διακριτοποίηση και
- Αν η διακριτοποίηση είναι παρόμοια εκατέρωθεν, ως "slave" επιφάνεια πρέπει να οριστεί αυτή με το μαλακότερο υλικό.

Τέλος, σχετικά με το μέγεθος της ολίσθησης γίνεται η επιλογή του, σύμφωνα με την ορολογία του προγράμματος, “small-sliding”. Το Abaqus δίνει στον χρήστη την επιλογή να θεωρήσει τις ολισθήσεις “μικρές” με σκοπό την έντονη μείωση του υπολογιστικού φόρτου, υπό την προϋπόθεση ότι η τιμή της ολίσθησης είναι ένα μικρό κλάσμα της χαρακτηριστικής διάστασης των επί της επιφάνειας επαφής πλευρών των πεπερασμένων στοιχείων (γεγονός που στην περίπτωση μας ισχύει καθώς, όπως θα φανεί παρακάτω, η ολίσθηση είναι της τάξης του 1 cm ενώ το χαρακτηριστικό μήκος των πεπερασμένων στοιχείων είναι >20 cm (βλέπε τις εικόνες παραπάνω).

6 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

6.1 Εύρεση ιδιομορφών με το λογισμικό ABAQUS

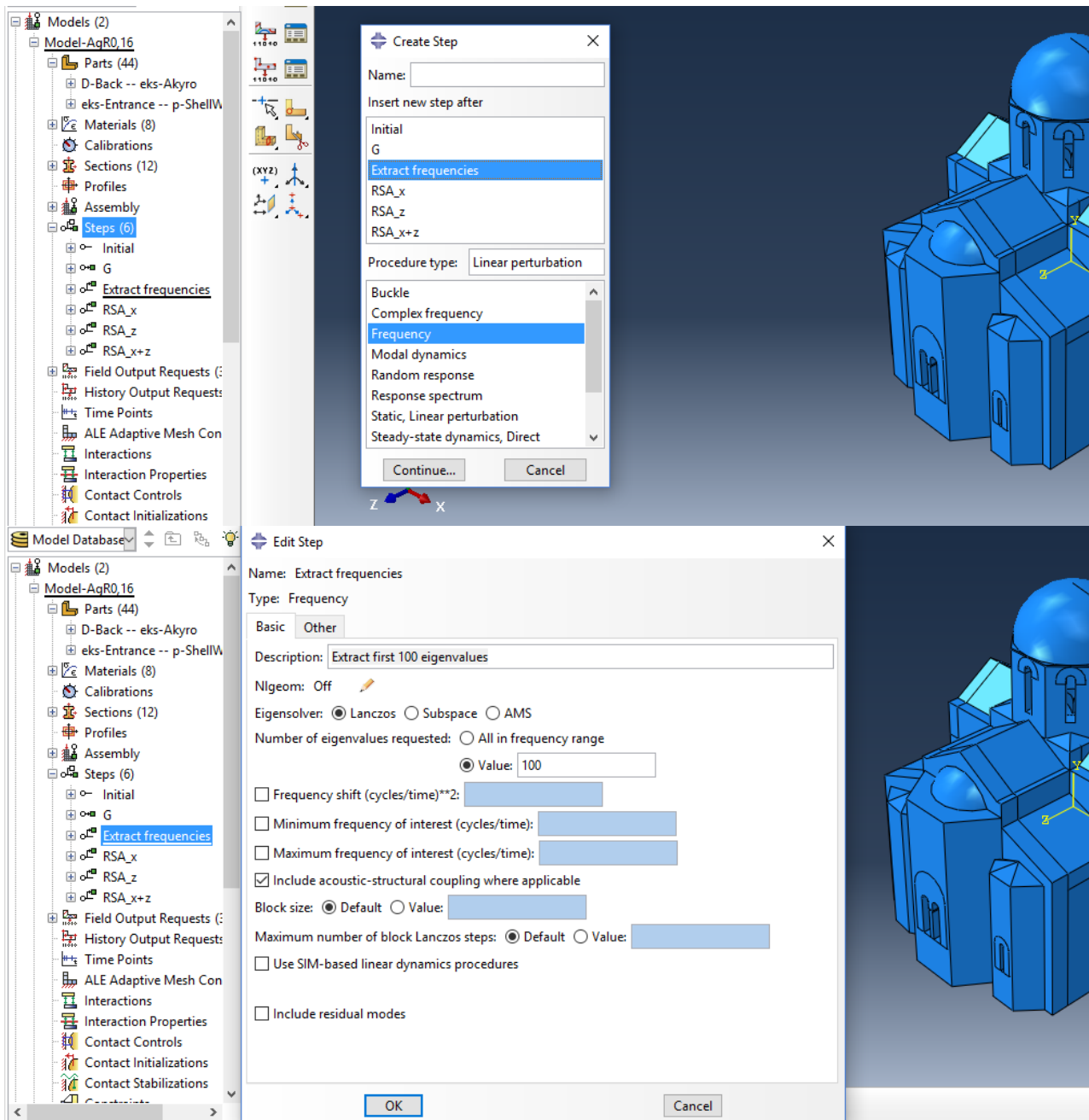
Η δυναμική ανάλυση ενός φορέα προϋποθέτει, ως στοιχειώδες βήμα της, την ιδιομορφική του ανάλυση. Σκοπός αυτής είναι η εύρεση των ιδιομορφών ταλάντωσης του φορέα, οι οποίες εκφράζουν ποιοτικά γνωρίσματα της δυναμικής του συμπεριφοράς, καθώς και απαραίτητα ποσοτικά στοιχεία για τη διεξαγωγή κάποιων διαδεδομένων ειδών δυναμικών αναλύσεων, όπως η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης (I.A.Φ.A.) που εκτελείται σε αυτήν την εργασία.

Το πλήθος των ιδιομορφών ενός φορέα είναι πρακτικά ισάριθμο με τους βαθμούς ελευθερίας του υπολογιστικού του προσομοιώματος, οι οποίοι κατά κανόνα είναι ιδιαίτερος πολλοί και στην περίπτωση των υπό παρουσίαση αναλύσεων ανέρχονται σε εκατοντάδες χιλιάδες. Είναι λοιπόν προφανές, ότι η ιδιομορφική ανάλυση περιορίζεται στην εξαγωγή των σημαντικότερων ιδιομορφών που καθορίζουν την δυναμική απόκριση του φορέα. Για την επιλογή των σημαντικών αυτών ιδιομορφών η εργασία αυτή ακολουθεί τον υπό ανάπτυξη κανονισμό αποτίμησης και δομικών επεμβάσεων τοιχοποιίας (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.). Σύμφωνα με αυτόν θα πρέπει να συμβαίνει κάτι από τα ακόλουθα:

- i) το άθροισμα των δρωσών ιδιομορφικών μαζών για τις ιδιομορφές που λαμβάνονται υπόψη είναι τουλάχιστον το 75% της συνολικής μάζας του φορέα.
- ii) λαμβάνονται υπόψη όλες οι ιδιομορφές με δρώσες ιδιομορφικές μάζες μεγαλύτερες από το 5% της συνολικής μάζας.
- Όταν χρησιμοποιείται χωρικό προσομοίωμα, οι παραπάνω συνθήκες πρέπει να ελέγχονται σε κάθε απαιτούμενη διεύθυνση.

Σε κτίρια με συνεχή καθ' ύψος κατανομή της μάζας και πολύπλοκη γεωμετρία, η δυναμική τους συμπεριφορά τείνει να κυριαρχείται από την συμβολή πολλών ιδιομορφών. Δεν αποτελεί λοιπόν έκπληξη το γεγονός ότι για την ικανοποίηση του πρώτου όρου του Κ.Α.Δ.Ε.Τ. απαιτείται η εξαγωγή των πρώτων περίπου **100** ιδιομορφών.

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 $(-\omega^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\phi\} = 0$. 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.



Εικόνα 6-1

Ιδιομορφές - Προσομοίωμα "1"

Για τις ανάγκες της ιδιομορφικής ανάλυσης το κωδωνοστάσιο αφαιρείται από το προσομοίωμα, διότι ως εύκαμπτο στοιχείο που είναι τείνει να προκαλεί την εμφάνιση πολλών ιδιομορφών, με σχετικώς υψηλές ιδιοπεριόδους στις οποίες ουσιαστικά θα συμμετέχει μόνο η μάζα του, με αποτέλεσμα να απαιτείται δυσανάλογα μεγάλος αριθμός ιδιομορφών ώστε το άθροισμα των δρυσών ιδιομορφικών μαζών τους να ξεπερνά το επιθυμητό όριο (75% της συνολικής μάζας του φορέα κατά Κ.Α.Δ.Ε.Τ.).

Η ύπαρξή του υποκαθίσταται από ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα που ισοδυναμεί με τη μάζα του κωδωνοστασίου, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

- Πυκνότητα αργολιθοδομής: $\rho_{\text{αργ}}=2240 \text{ kg/m}^3$
- Όγκος κωδωνοστασίου (υπολογισμένος από το AutoCAD 2015): $\rho_{\text{αργ}}=3,48 \text{ m}^3$

- Επιφάνεια εφαρμογής της κατανεμημένης μάζας (=επιφάνεια έδρασης κωδωνοστασίου, υπολογισμένη στο AutoCAD): $A=1,025 \text{ kg/m}^3$
- $\rightarrow m= \rho_{\text{αργ}} *V/A= 7700 \text{ kg/m}^2$

Για τη διακριτοποίηση του φορέα χρησιμοποιήθηκαν:

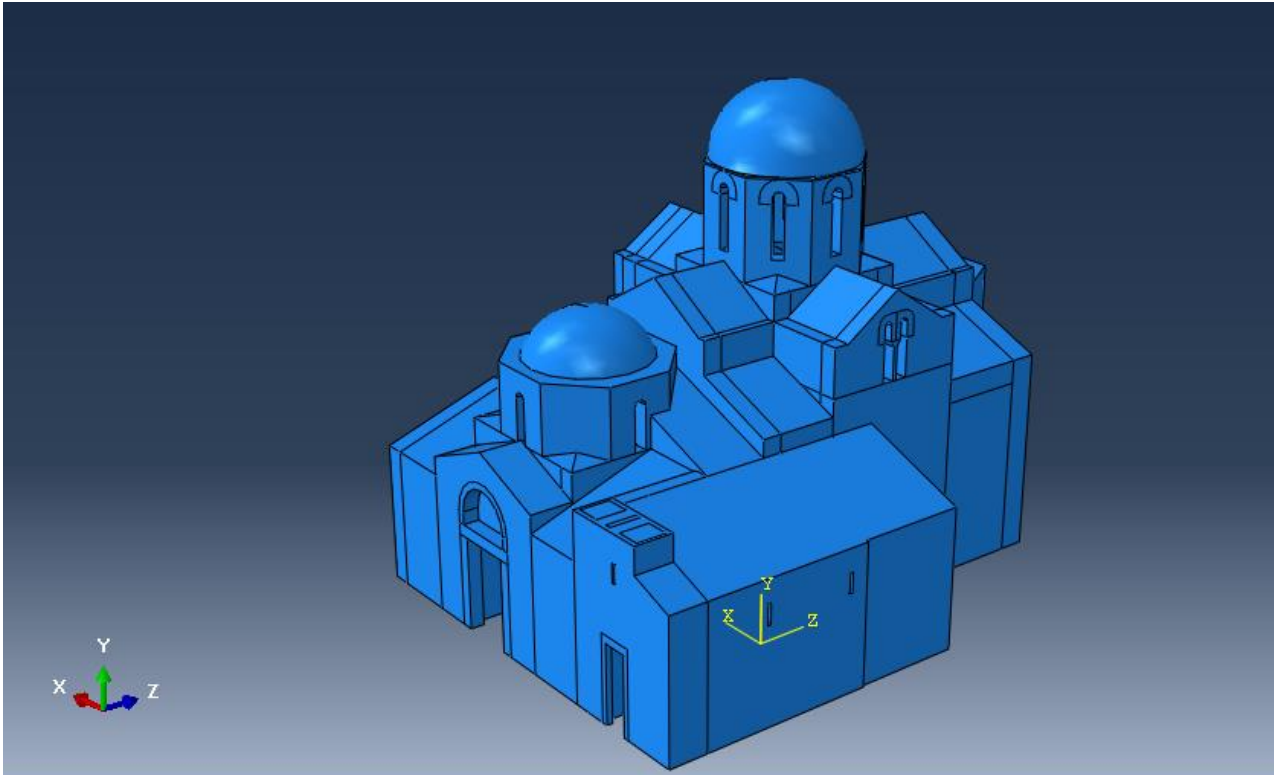
- Στοιχεία τύπου **C3D10** (κύριος όγκος του φορέα)
- Στοιχεία τύπου **T3D2** (αμφιαρθρωτές ράβδοι που αντιπροσωπεύουν τους ξύλινους ελκυστήρες)
- Στοιχεία τύπου **SFM3D6** (κατανεμημένες μάζες)

Μέγεθος υπολογιστικού προσομοιώματος:

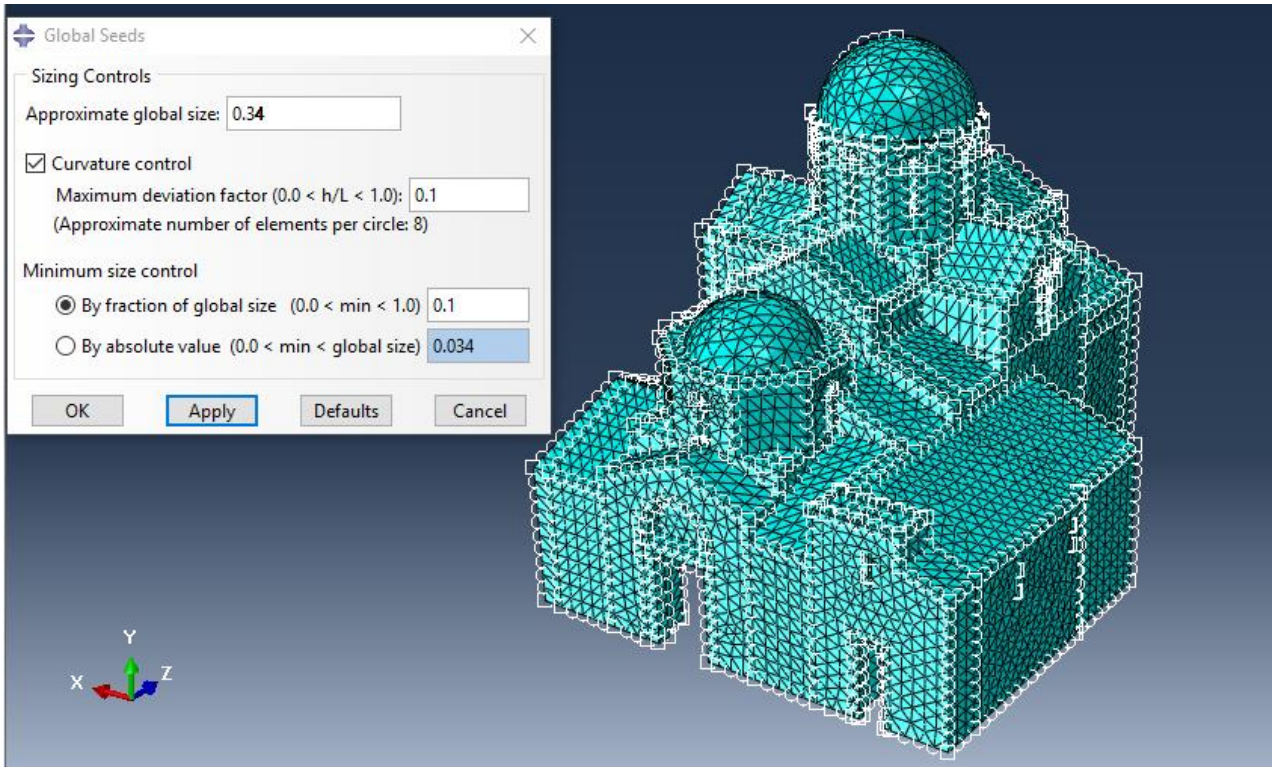
- Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων: 95816
- Πλήθος κόμβων: 136417
- Βαθμοί ελευθερίας: 409251
- **Συνολική μάζα του φορέα: 682774,4 kg**

Τέλος, ως προς την ποιότητα του προσομοιώματος αναφέρεται ότι:

- Πλήθος στοιχείων ακατάλληλου σχήματος (distorted elements): 540
- Αναλογία ακατάλληλων (distorted) στοιχείων: **0,564 %**.



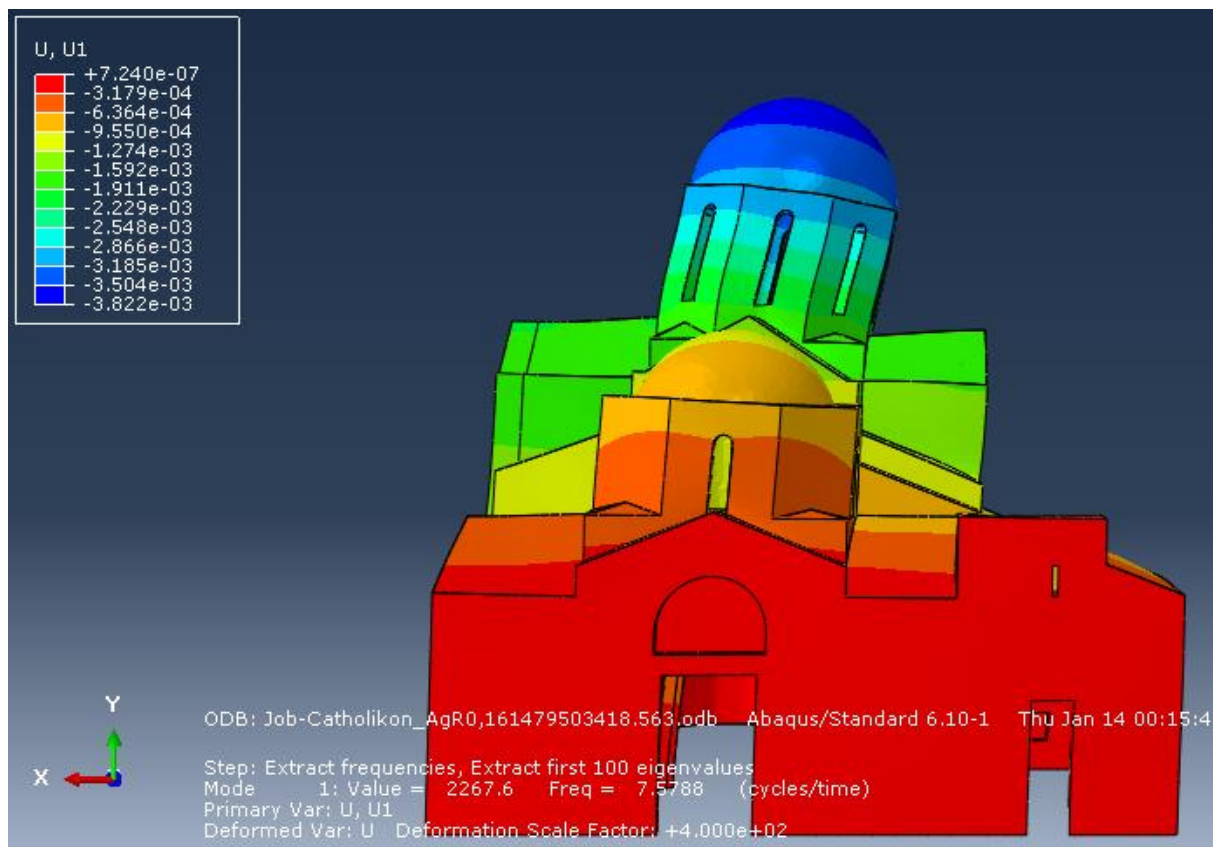
Εικόνα 6-2: Το προσομοίμα "1" τροποποιημένο κατάλληλα για τις ανάγκες της ιδιομορφικής ανάλυσης και εν συνεχεία της ιδιομορφικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης (Ι.Α.Φ.Α.). Όπως φαίνεται, το κωδωνοστάσιο έχει αφαιρεθεί και στην επιφάνεια της βάσης του που διακρίνεται, εφαρμόζεται ισοδύναμη κατανεμημένη μάζα.

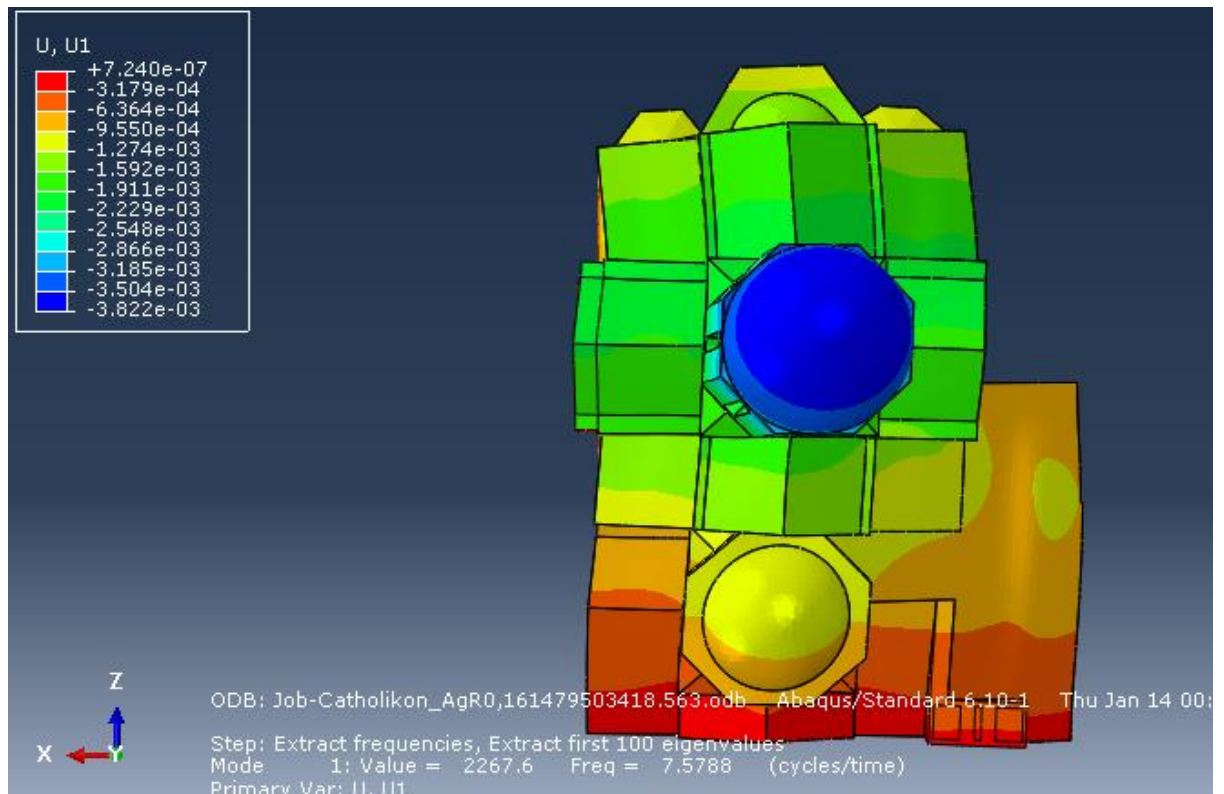


Εικόνα 6-3: Η διακριτοποίηση του φορέα γίνεται με στοιχεία διαστάσεων περίπου ≈ 34 cm.

Ακολουθεί η προβολή των σημαντικότερων ιδιομορφών:

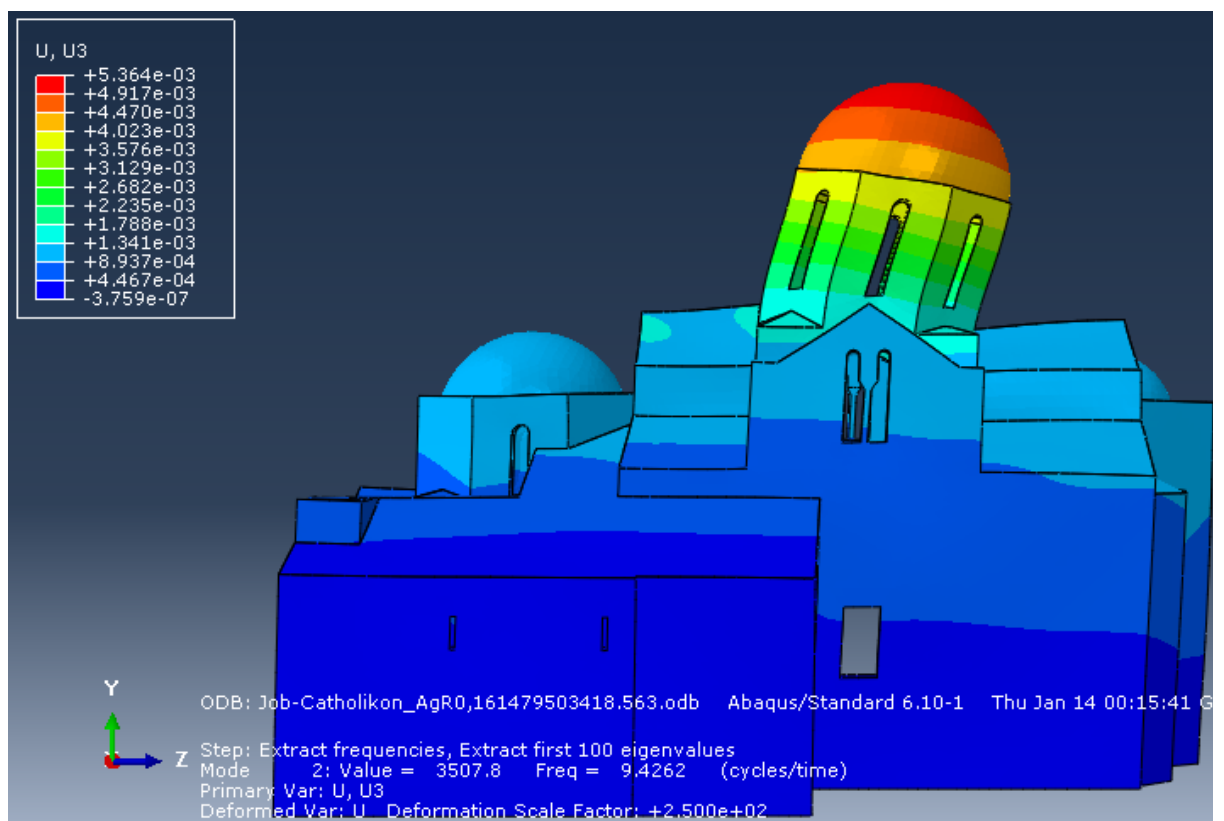
1^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:

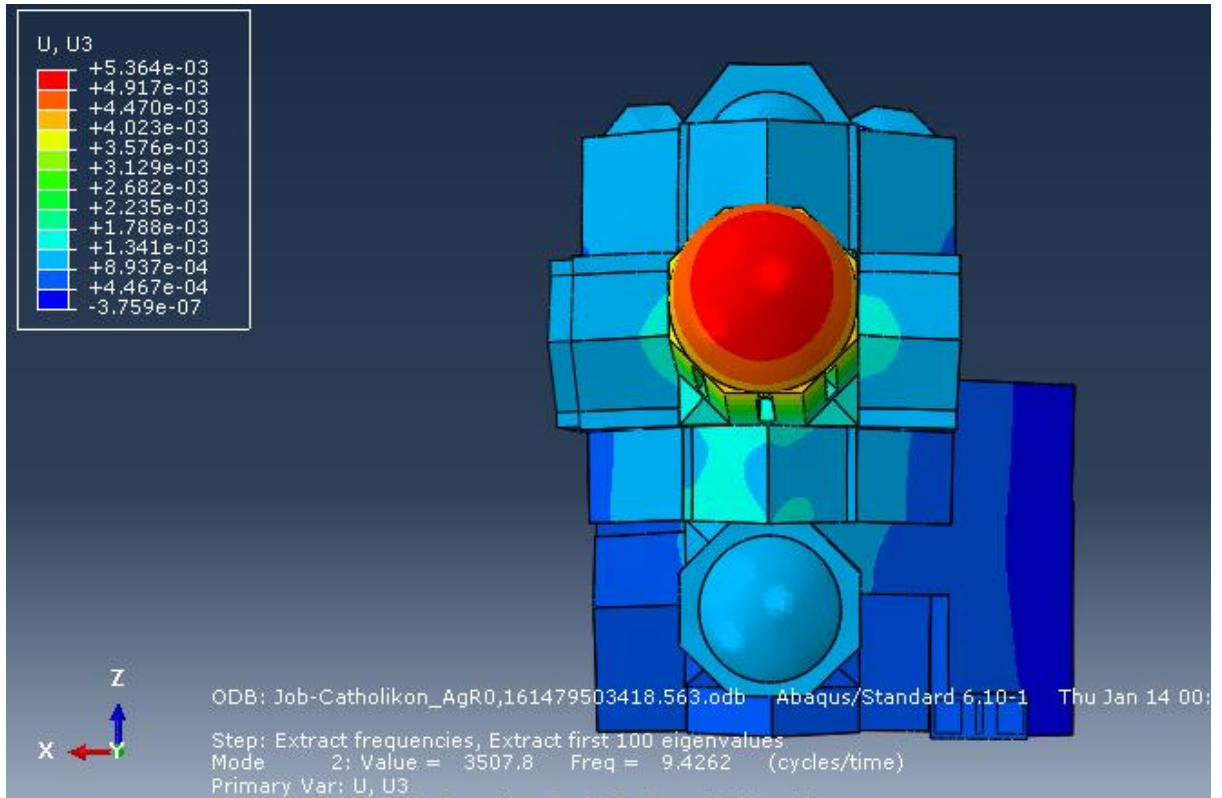




- 1^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση x (B-N).
- Ιδιοπερίοδος: $T_1 = 0,132 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 370.000 \text{ kg}$ (54,19%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 1.149,1 \text{ kg}$ (0,17%)

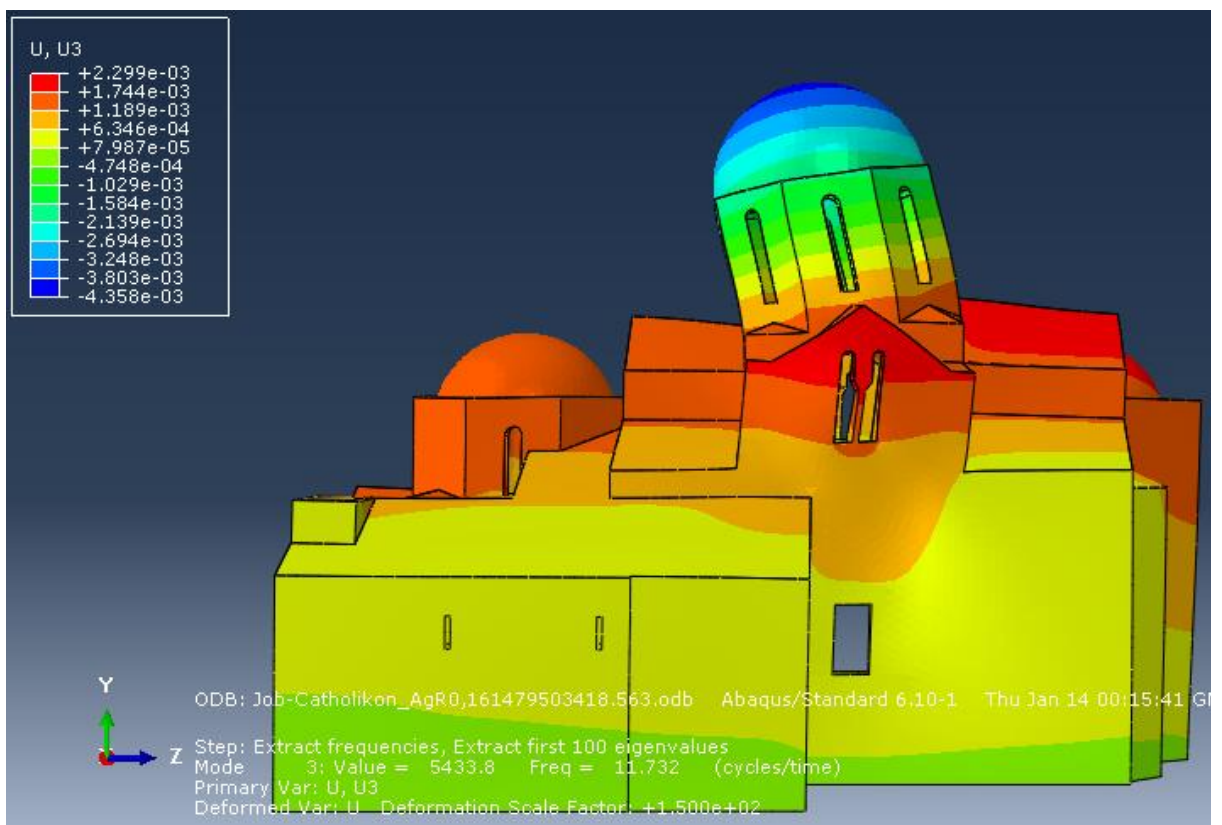
2^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:

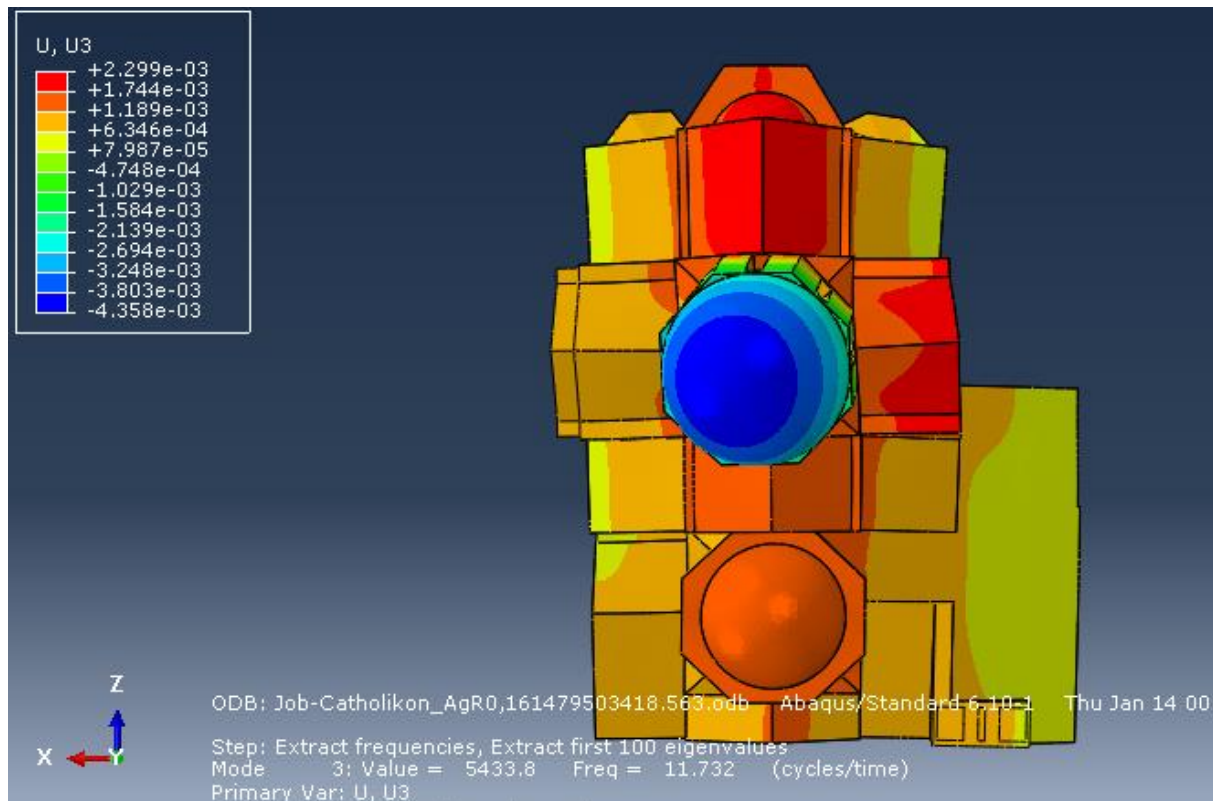




- 1^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση z (A-Δ).
- Ιδιοπερίοδος: $T_2 = 0,106 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 1.819,2 \text{ kg}$ (0,27%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_z = 295.000 \text{ kg}$ (43,21%)

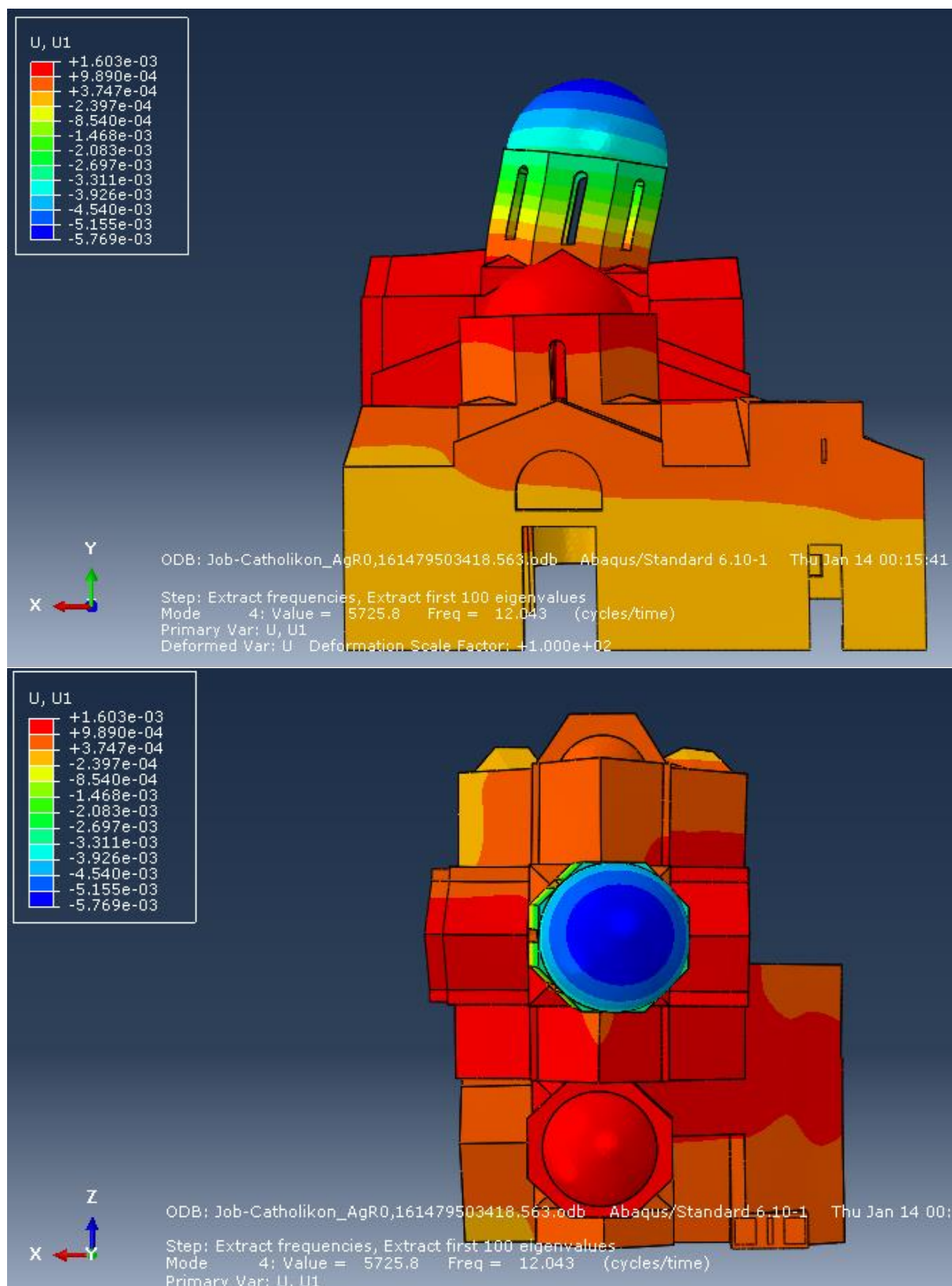
3^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:





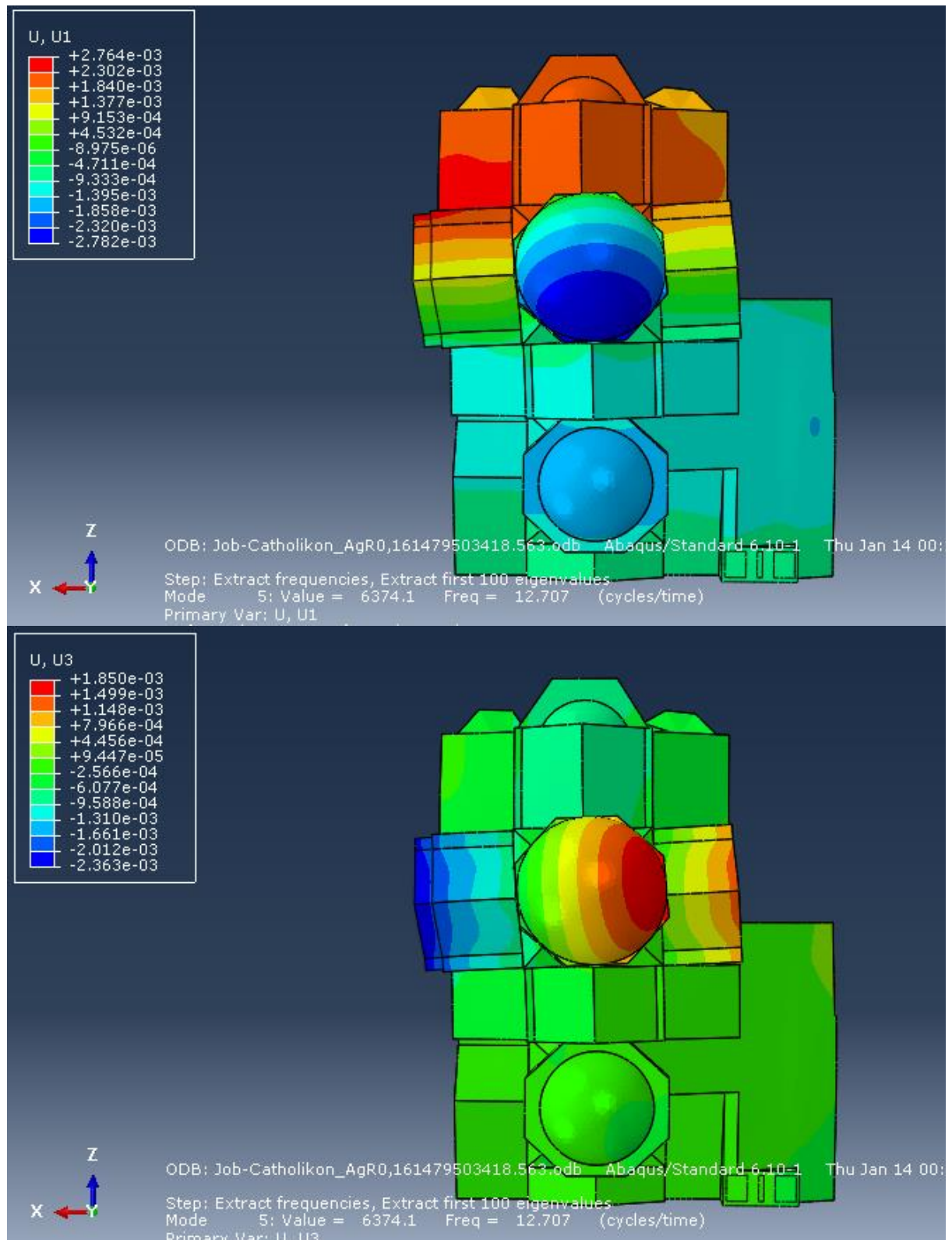
- 2^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση **z**. Τυπική εκδοχή της σε εκκλησίες (μετακίνηση του σχετικώς εύκαμπτου τρούλου με διαφορά φάσης ως προς το υπόλοιπο).
- Ιδιοπερίοδος: **$T_3 = 0,085 \text{ sec}$**
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά **x**: **$M_x = 13.853 \text{ kg}$** (2,03%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά **y**: **$M_z = 137.000 \text{ kg}$** (20,07%)

4^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



- 2^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση **x**. Τυπική εκδοχή της σε εκκλησίες.
- Ιδιοπερίοδος: **$T_4 = 0,083$ sec**
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά **x**: **$M_x = 75.325$ kg (11,03%)**
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά **y**: **$M_z = 17.606$ kg (2,58%)**

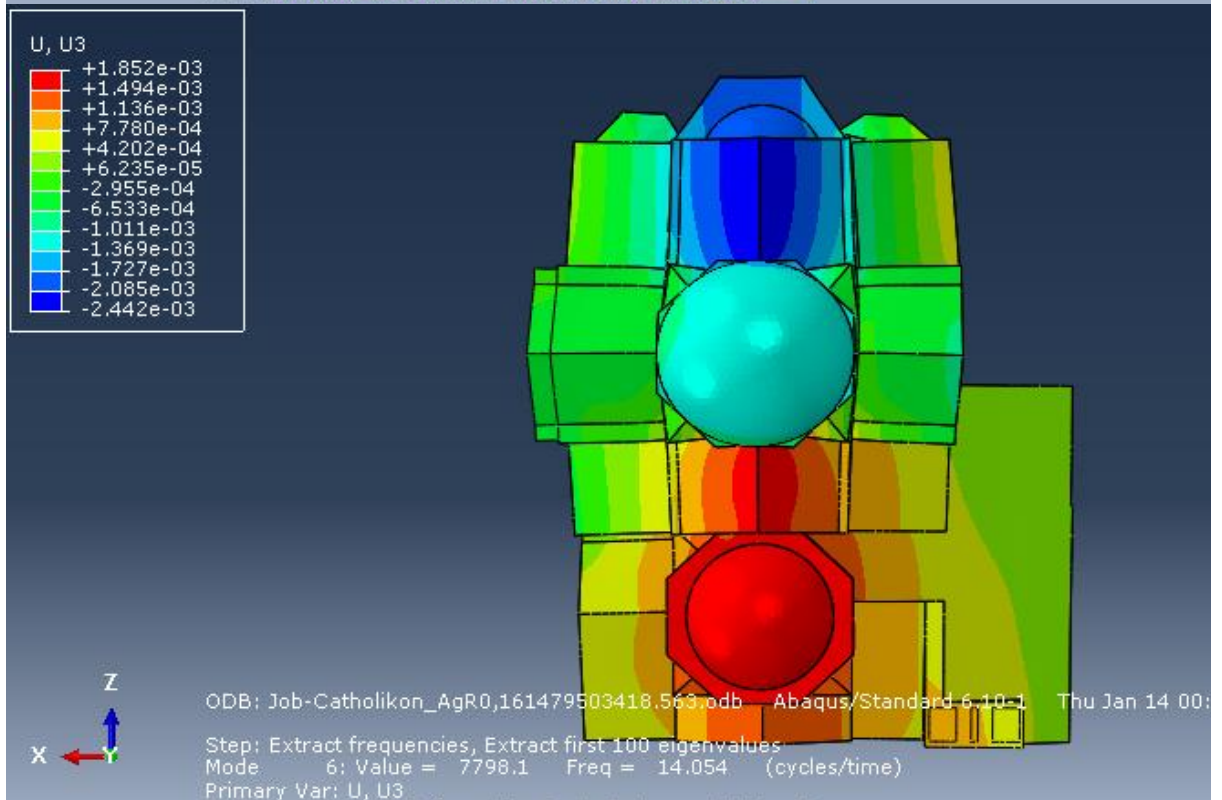
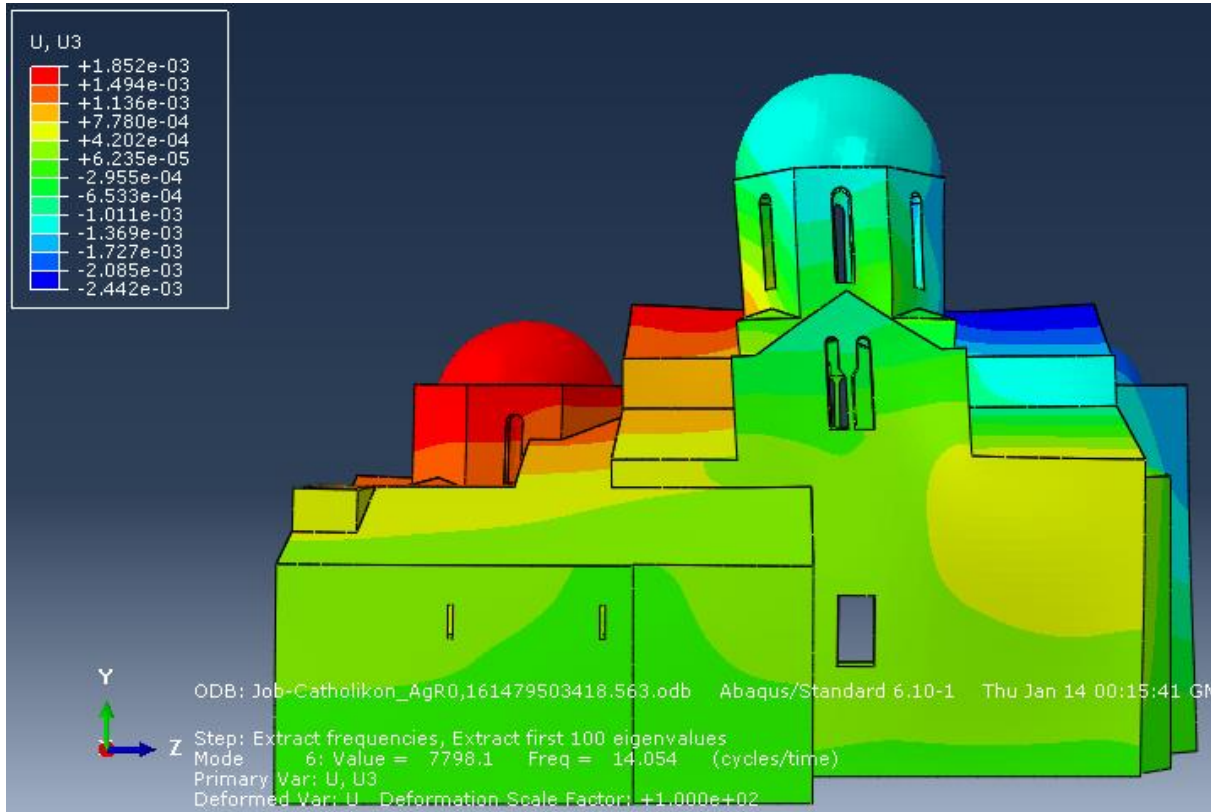
5^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



- 1^η σημαντική περιστροφική ιδιομορφή. Παρατηρείται έντονη ασυμμετρία, με τον σχετικά εύκαμπτο Κυρίως Ναό να παρουσιάζει εντονότερη περιστροφή από τις στιβαρότερες προσθήκες.

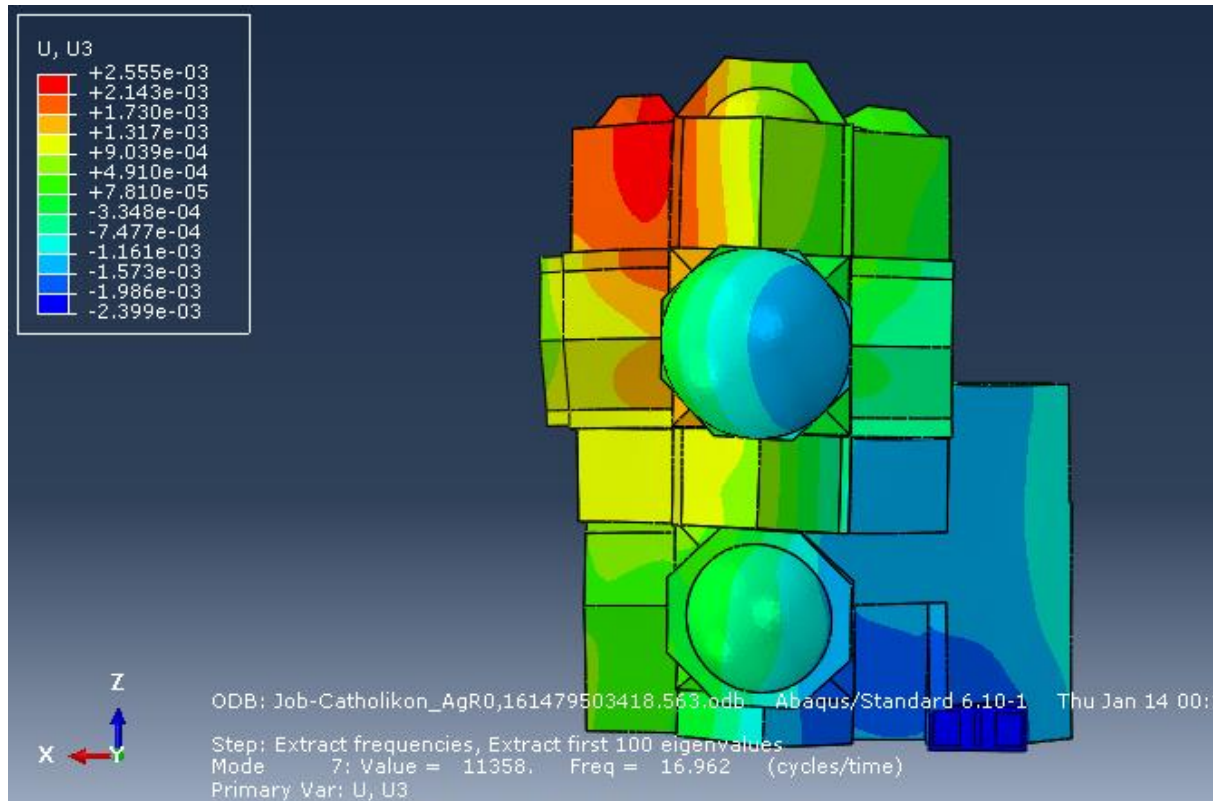
- Ιδιοπερίοδος: $T_5 = 0,079 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 6851,7 \text{ kg}$ (1,00%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_z = 12930 \text{ kg}$ (1,89%)

6^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



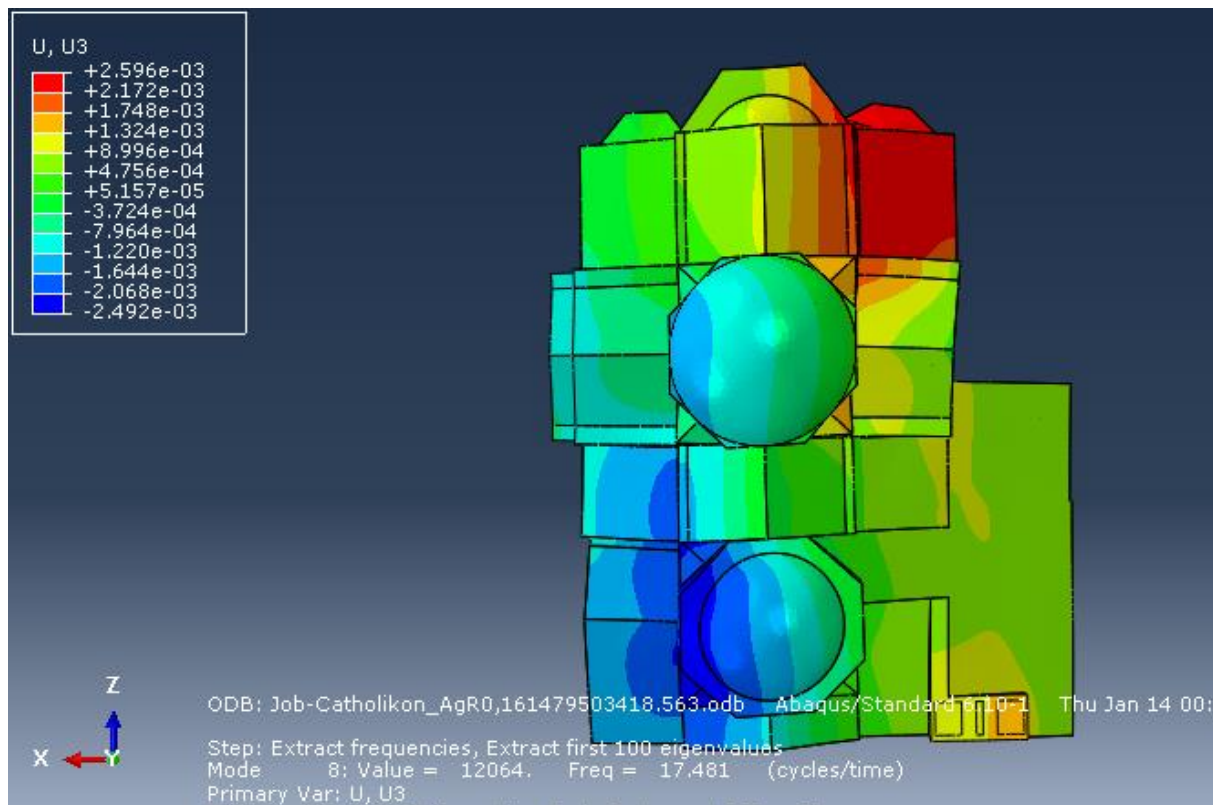
- Τα τμήματα του φορέα εκατέρωθεν του εγκάρσιου κλίτους του Κυρίως Ναού ταλαντώνονται με αντίθεση φάσης.
- Ιδιοπερίοδος: $T_6 = 0,071 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 37,3 \text{ kg}$ (-)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_z = 7690,2 \text{ kg}$ (1,13%)

7^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



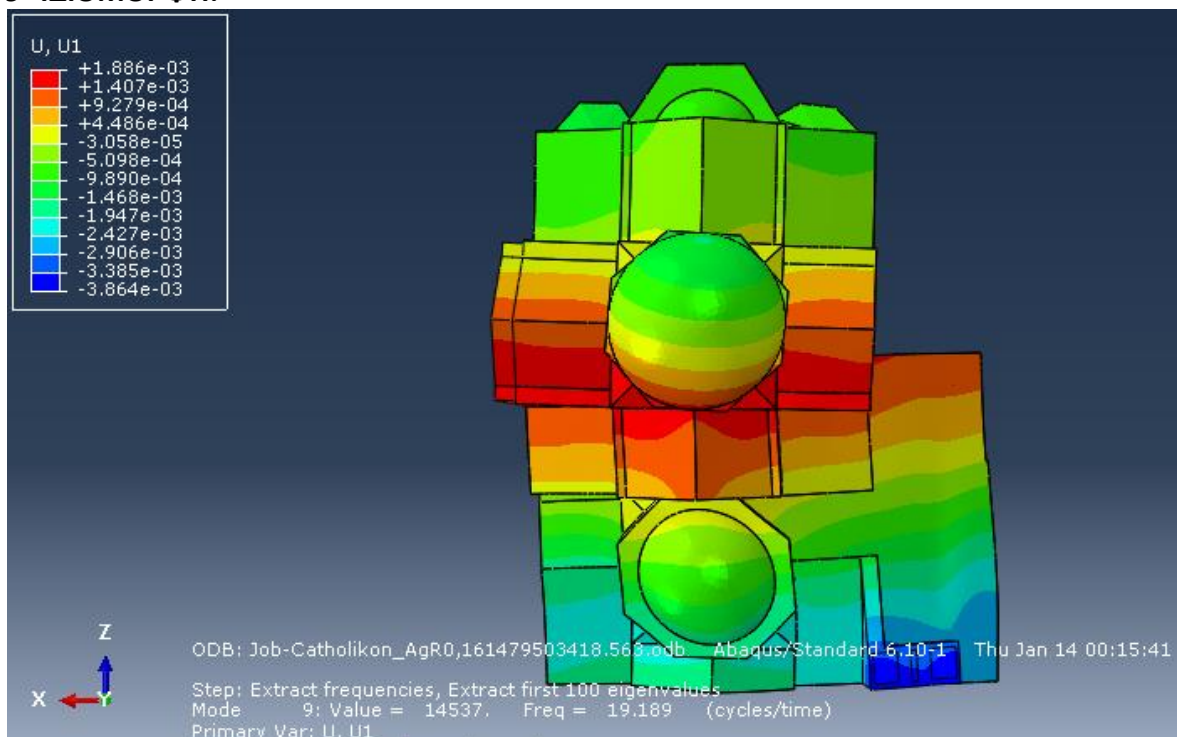
- 1^η ιδιομορφή με αξιόλογη κατακόρυφη ταλάντωση. Παρατηρείται η τάση ώστε τα τμήματα εκατέρωθεν του κύριου διάμηκου κλίτους να κινηθούν με αντίθεση φάσης “εφαπτομενικά” (τείνουν προς “σχετική ολίσθηση”).
- Ιδιοπερίοδος: $T_7 = 0,059 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 2481,4 \text{ kg}$ (0,27%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_z = 4895,2 \text{ kg}$ (0,72%)

8^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



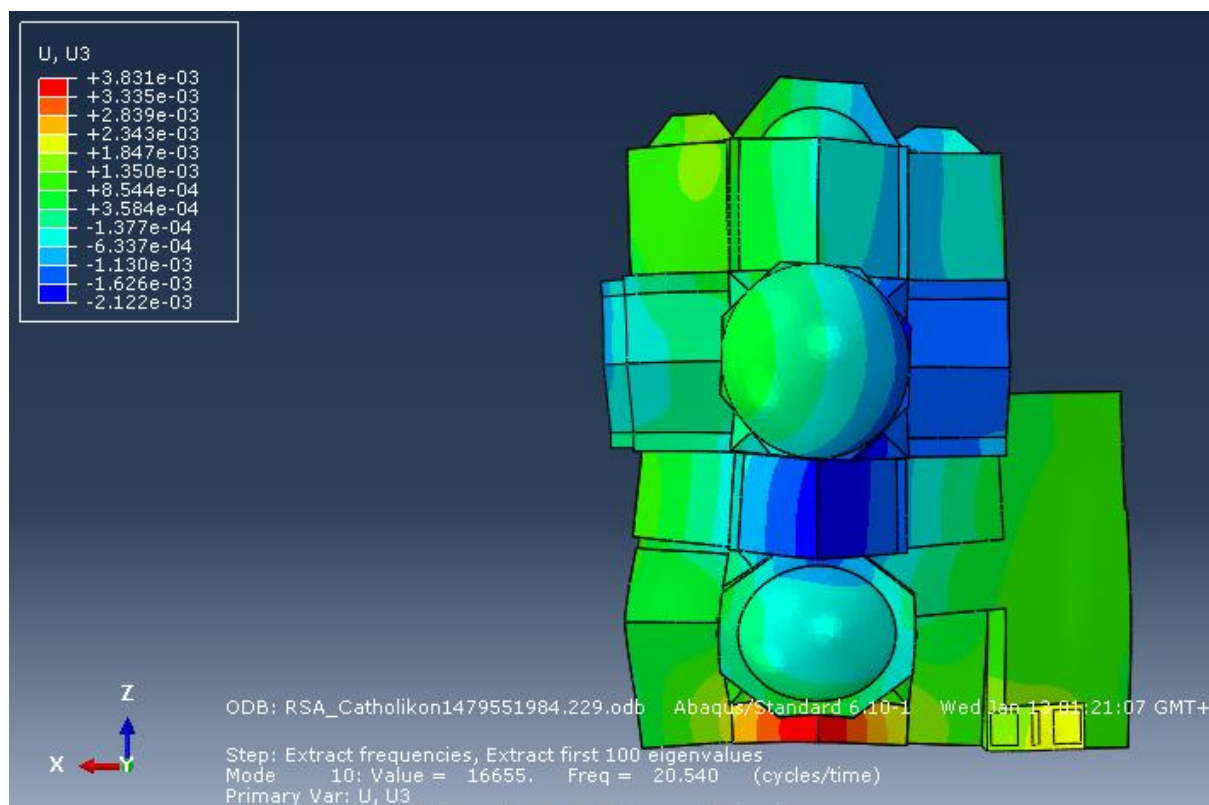
- 1^η ιδιομορφή με αξιόλογη κατακόρυφη ταλάντωση.
- Ιδιοπερίοδος: $T_1 = 0,057 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 293,12 \text{ kg}$ (0,04%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_y = 2409,9 \text{ kg}$ (0,35%)

9^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:

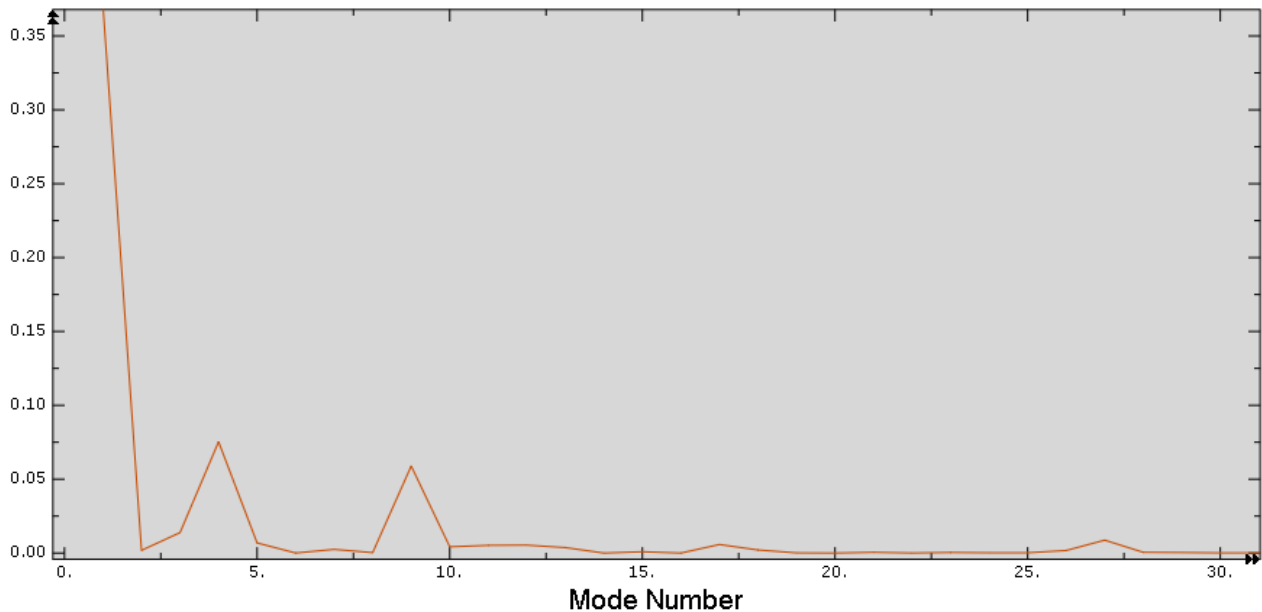


- Τα δυτικά διαμερίσματα του Κυρίως Ναού και ο Νάρθηκας με την πρόσοψη του παρεκκλησίου ταλαντώνονται με αντίθεση φάσης “εφαπτομενικά” (τείνουν προς “σχετική ολίσθηση”).
- Ιδιοπερίοδος: $T_1 = 0,052 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 58.917 \text{ kg}$ (8,63%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_y = 1.819,2 \text{ kg}$ (0,27%)

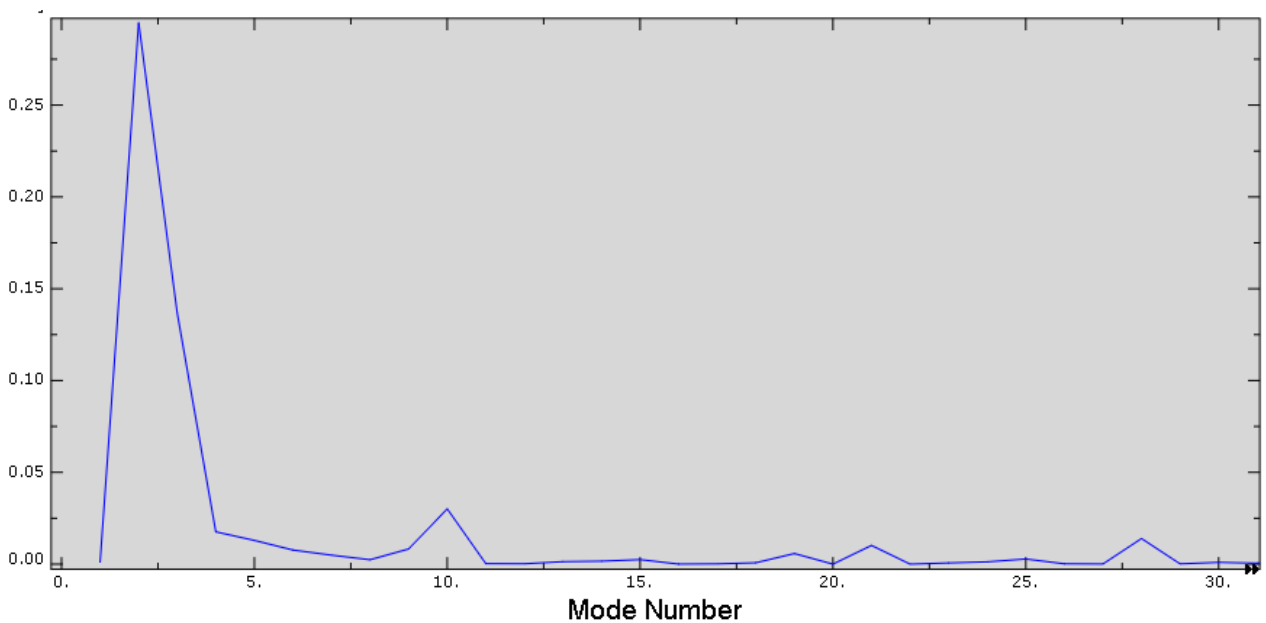
10^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



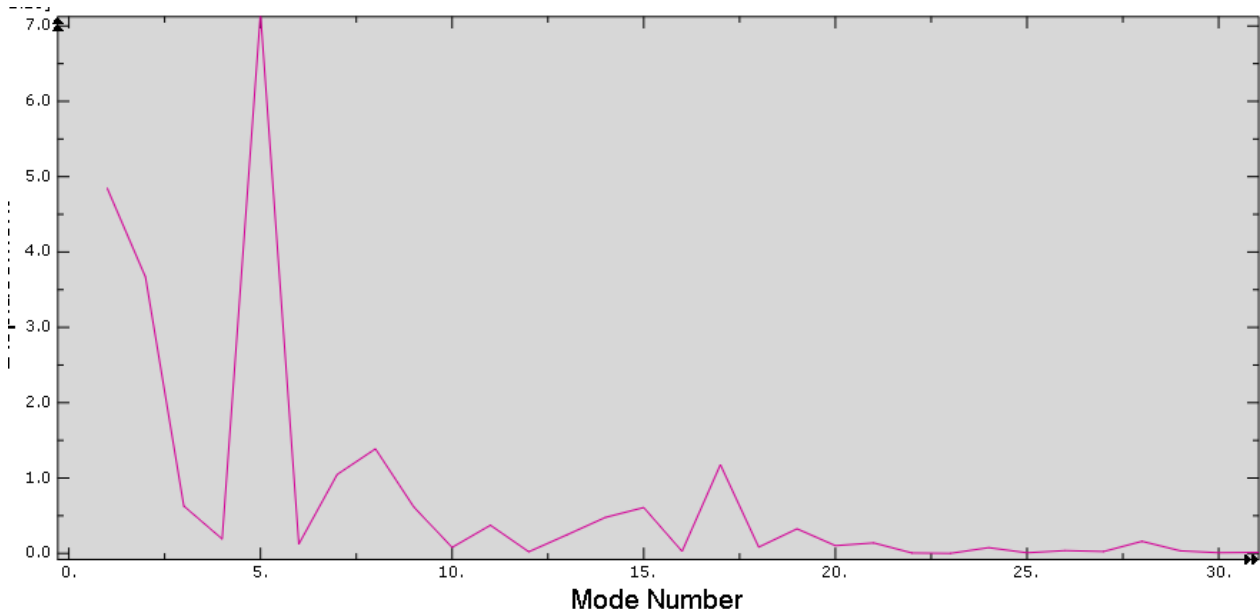
- Η πρόσοψη του Καθολικού και ο υπόλοιπος φορέας ταλαντώνονται με αντίθεση φάσης.
- Ιδιοπερίοδος: $T_1 = 0,052 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 4.234,6 \text{ kg}$ (0,62%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά y: $M_z = 30.109 \text{ kg}$ (4,41%)



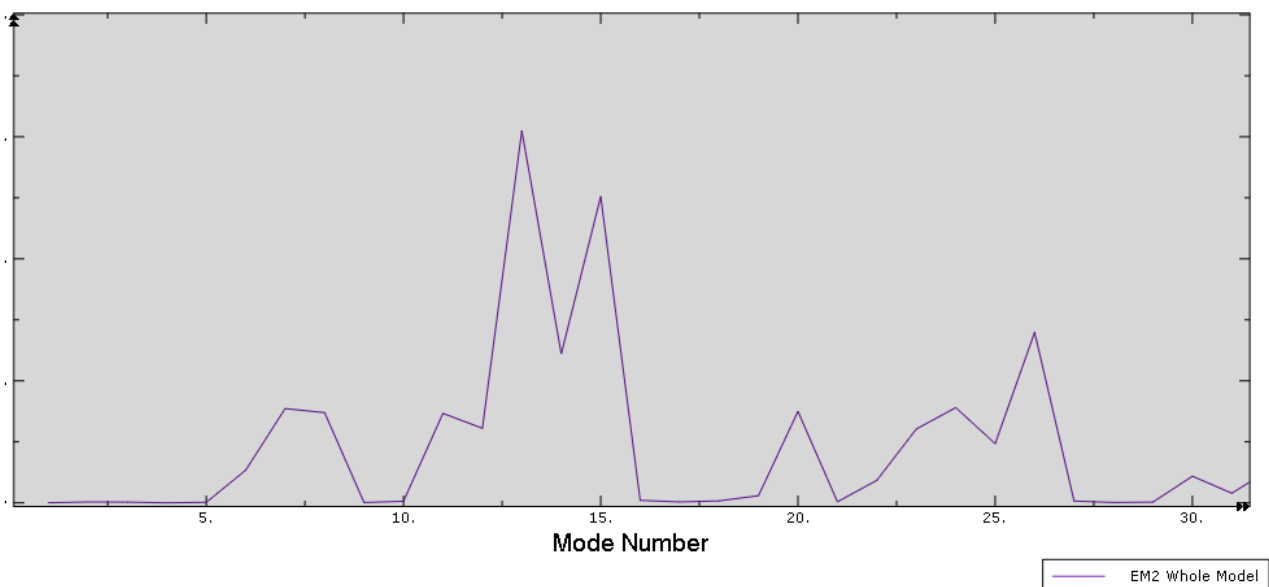
Εικόνα 6-4: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x (διεύθυνση A-Δ) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Όπως φαίνεται, μακράν σημαντικότερη ιδιομορφή είναι η 1^η με δρώσα ιδιομορφική μάζα ($M_{eff,x}$) το 54,19% της συνολικής (βλέπε παραπάνω) και ακολουθούν η 4^η ($M_{eff,x}$ =11,03% της συνολικής) και η 9^η ($M_{eff,x}$ =8,63%)



Εικόνα 6-5: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z (διεύθυνση Β-Ν) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Εδώ, μακράν σημαντικότερη ιδιομορφή είναι η 2^η ($M_{eff,x}$ =43,21%) και ακολουθεί η 3^η ($M_{eff,x}$ =20,07%) και η 10^η ($M_{eff,x}$ =4,41%).



Εικόνα 6-6: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική (γενικευμένη) μάζα για περιστροφική κίνηση. Όπως φαίνεται, σημαντικότερη περιστροφική ιδιομορφή είναι η 5^η και ακολουθούν η 1^η, η 2^η, η 8^η και άλλες.



Εικόνα 6-7: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά την κατακόρυφο (γ) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Διακρίνεται ότι η πρώτη σημαντική κατακόρυφη ιδιομορφή είναι η 7^η, ακολουθεί η 8^η αλλά, όπως είναι αναμενόμενο, οι πλέον σημαντικές ιδιομορφές συγκαταλέγονται μεταξύ των ανωτέρων.

Ιδιομορφές-Προσομοίωμα "2", Κυρίως Ναός

Για τη διακριτοποίηση του φορέα χρησιμοποιήθηκαν:

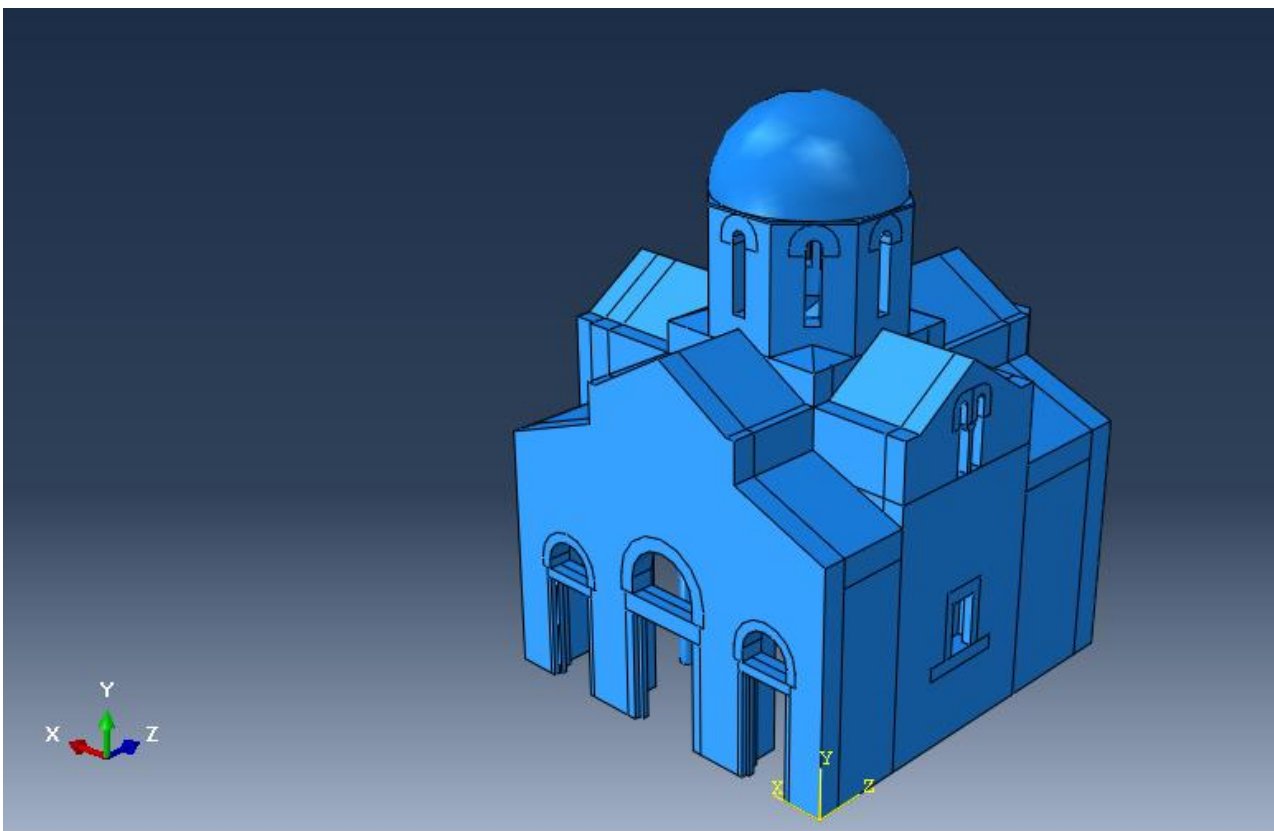
- Στοιχεία τύπου **C3D10** (κύριος όγκος του φορέα)
- Στοιχεία τύπου **T3D2** (αμφιαρθρωτές ράβδοι που αντιπροσωπεύουν τους ξύλινους ελκυστήρες)
- Στοιχεία τύπου **SFM3D6** (κατανεμημένες μάζες)

Μέγεθος υπολογιστικού προσομοιώματος:

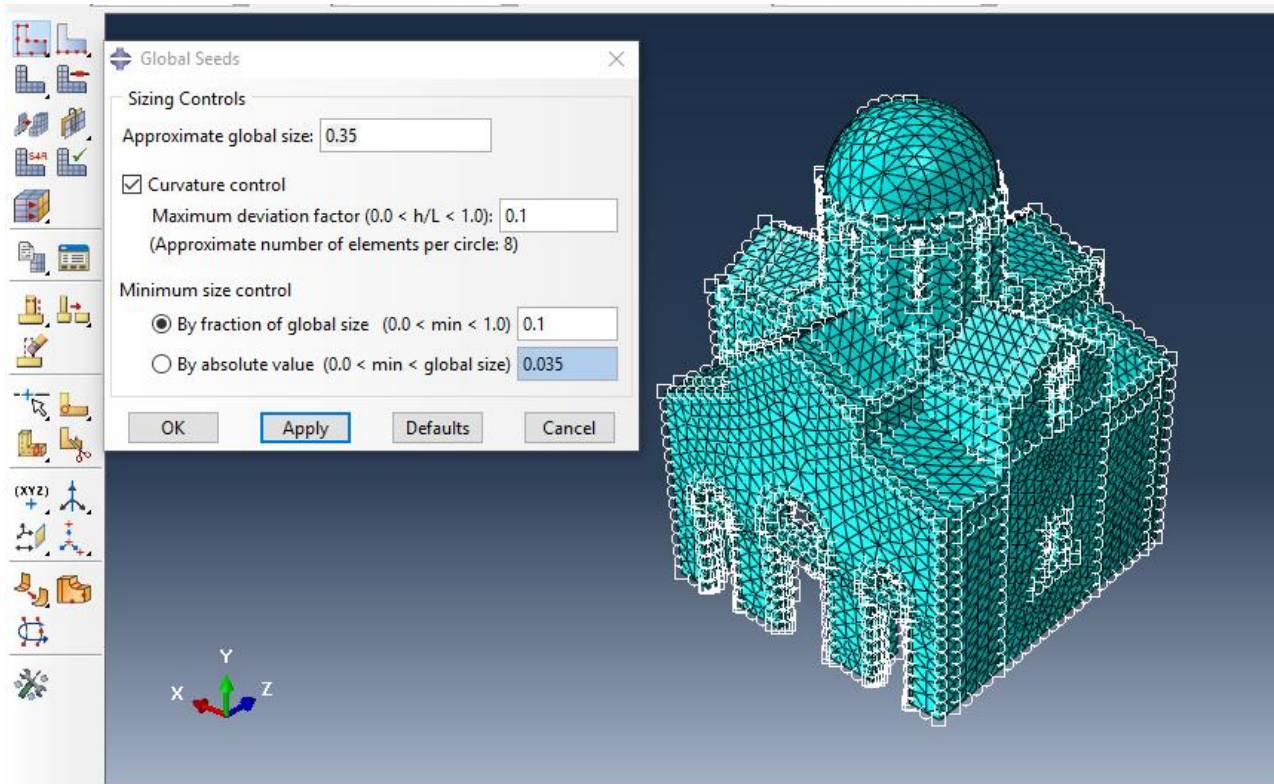
- Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων: 61.477
- Πλήθος κόμβων: 87.565
- Βαθμοί ελευθερίας: 262.695
- **Συνολική μάζα του φορέα: 384.192,5 kg**

Τέλος, ως προς την ποιότητα του προσομοιώματος αναφέρεται ότι:

- Πλήθος στοιχείων ακατάλληλου σχήματος (distorted elements): 471
- Αναλογία ακατάλληλων (distorted) στοιχείων: **0,766%**.



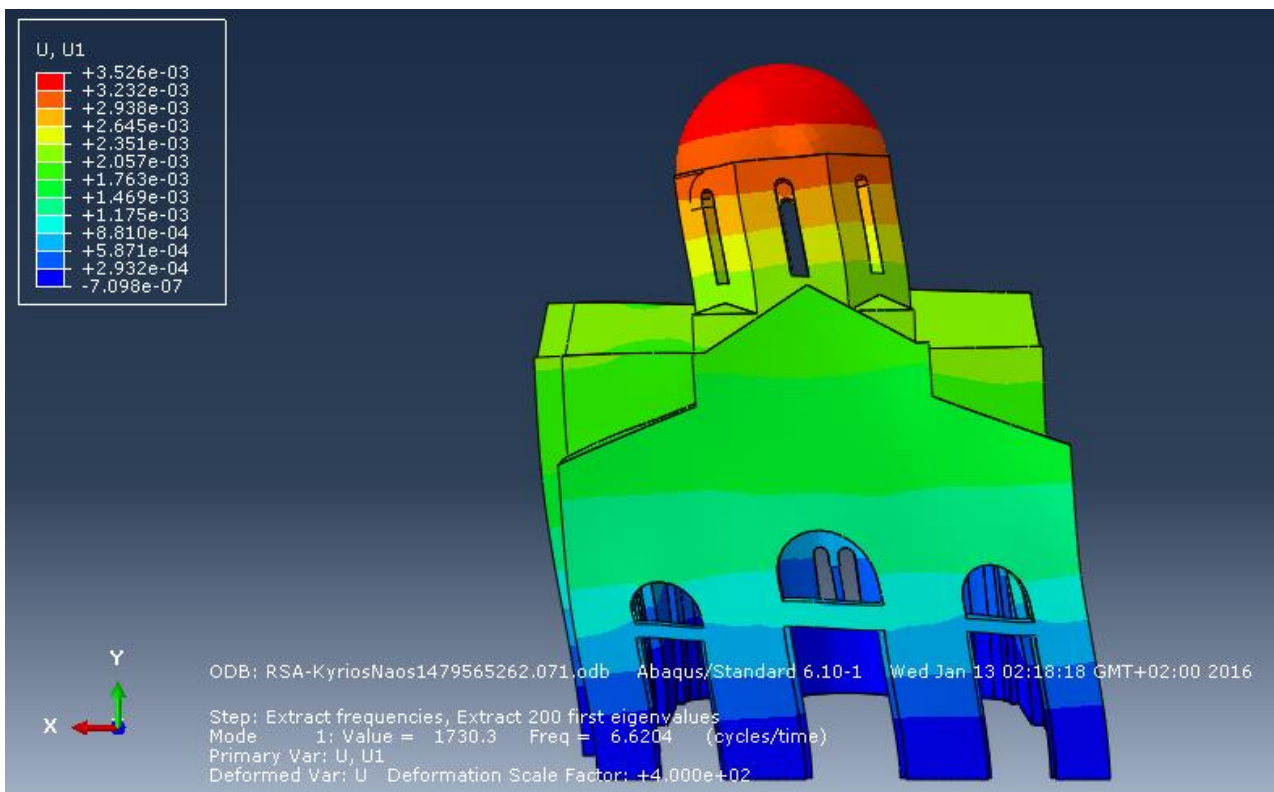
Εικόνα 6-8: Προσομοίωμα "2", Κυρίως Ναός.

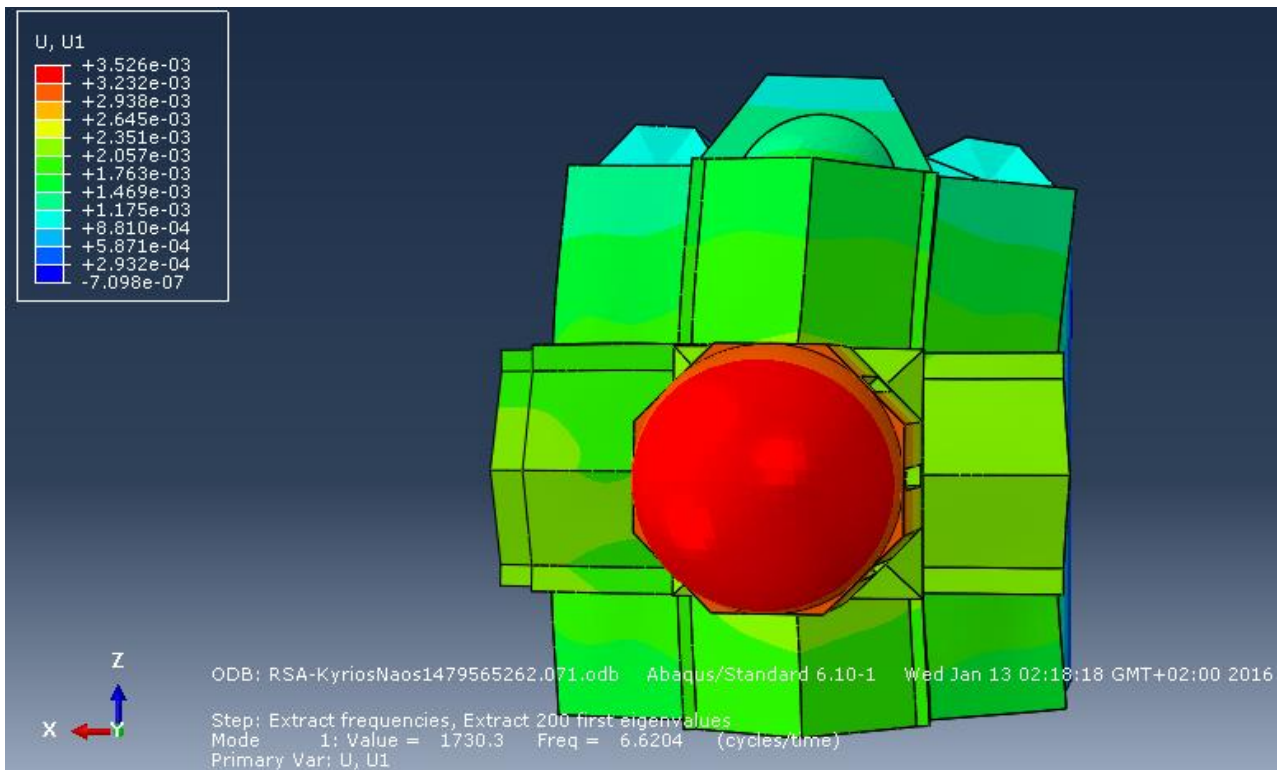


Εικόνα 6-9: Η διακριτοποίηση του φορέα γίνεται με στοιχεία διαστάσεων περίπου ≈ 35 cm.

Ακολουθεί η προβολή των σημαντικότερων ιδιομορφών:

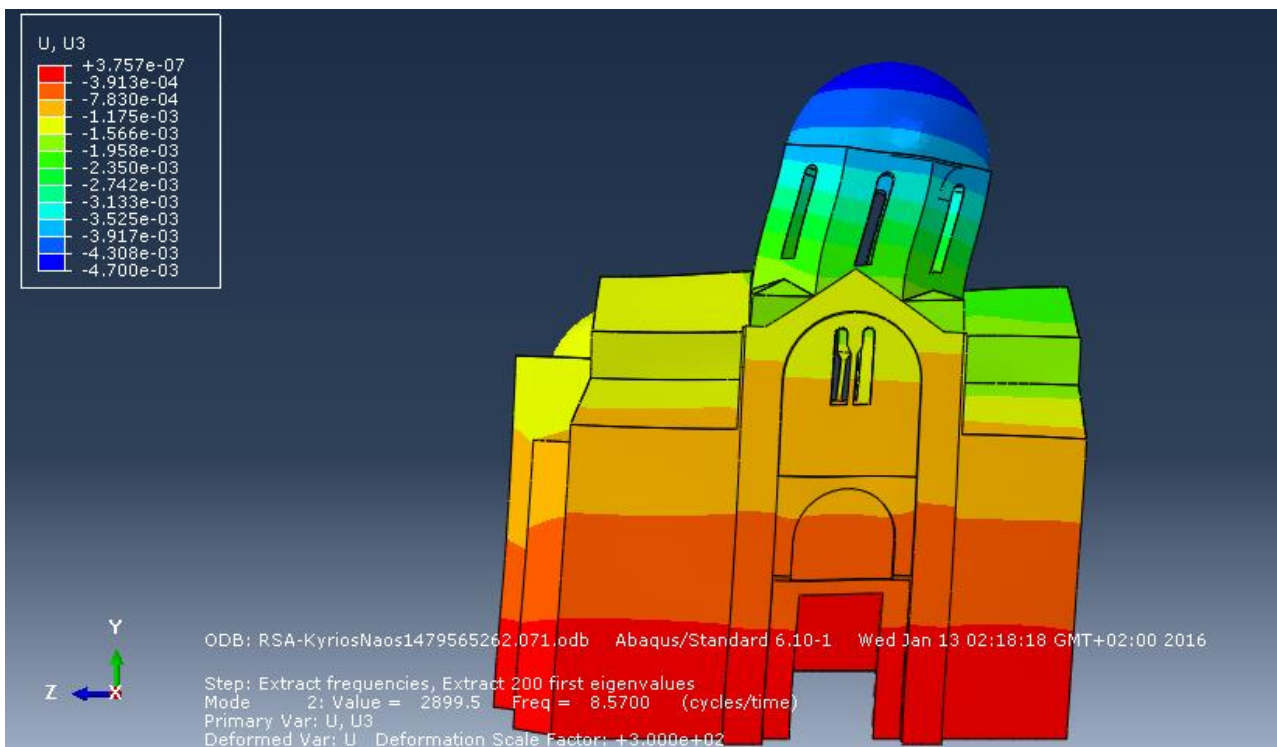
1η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:





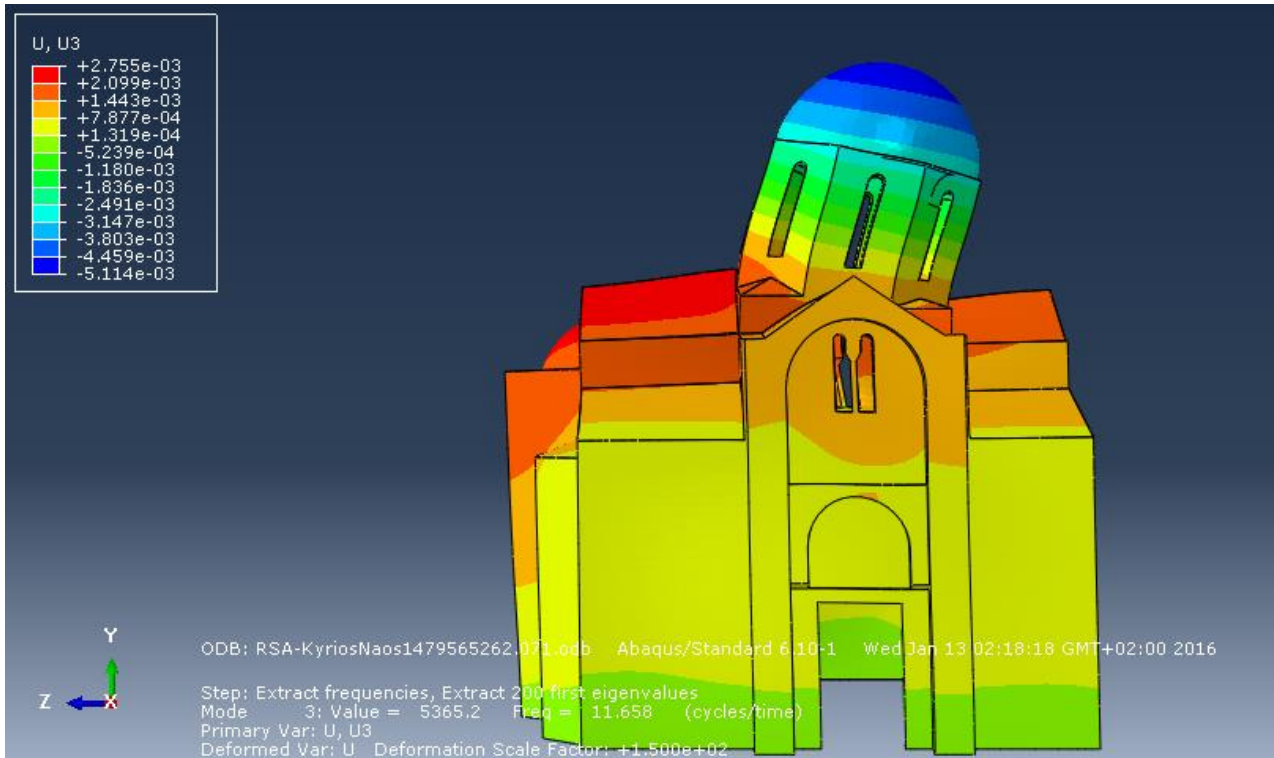
- 1^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση x (B-N)
- Ιδιοπερίοδος: $T_1 = 0,151 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 271.000 \text{ kg}$ (73,54%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 7,75 \text{ kg}$ (-)

2η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



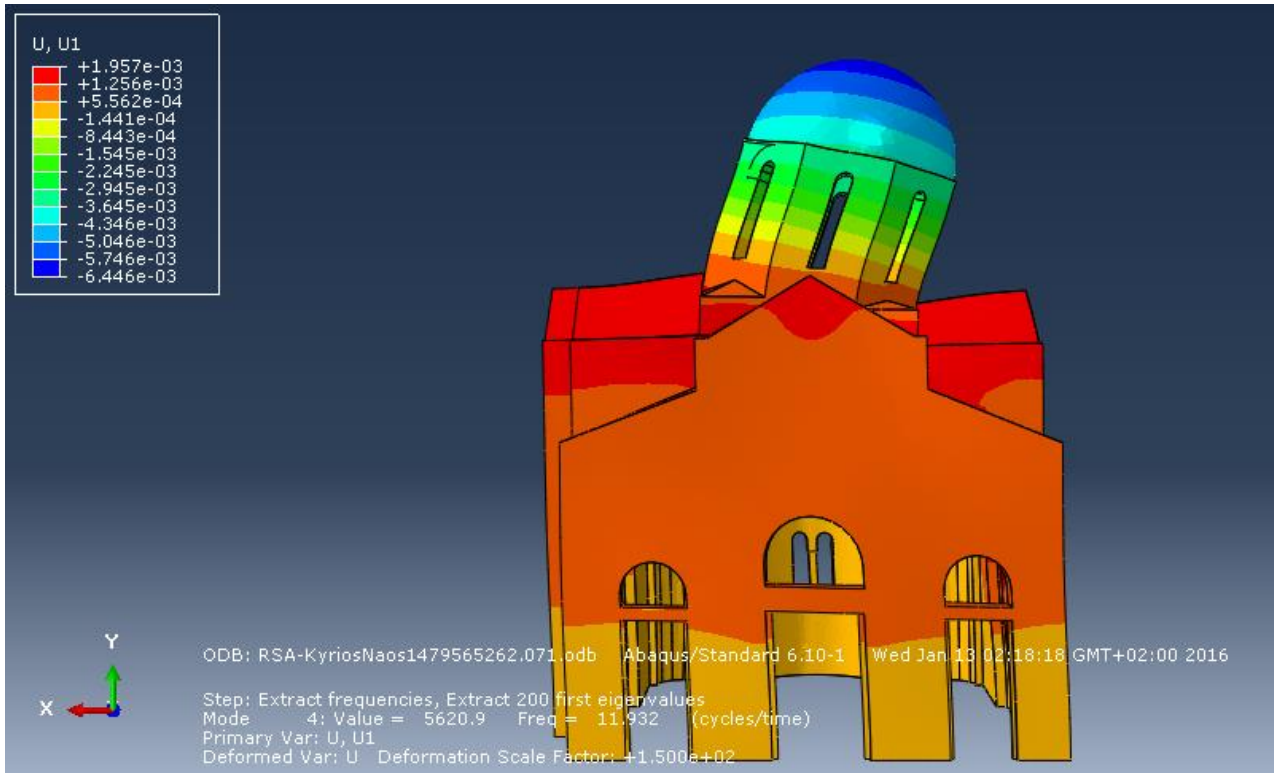
- 1^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση z (Α-Δ).
- Ιδιοπερίοδος: $T_2 = 0,117 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 20,99 \text{ kg}$ (-)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 231000 \text{ kg}$ (60,13%)

3^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



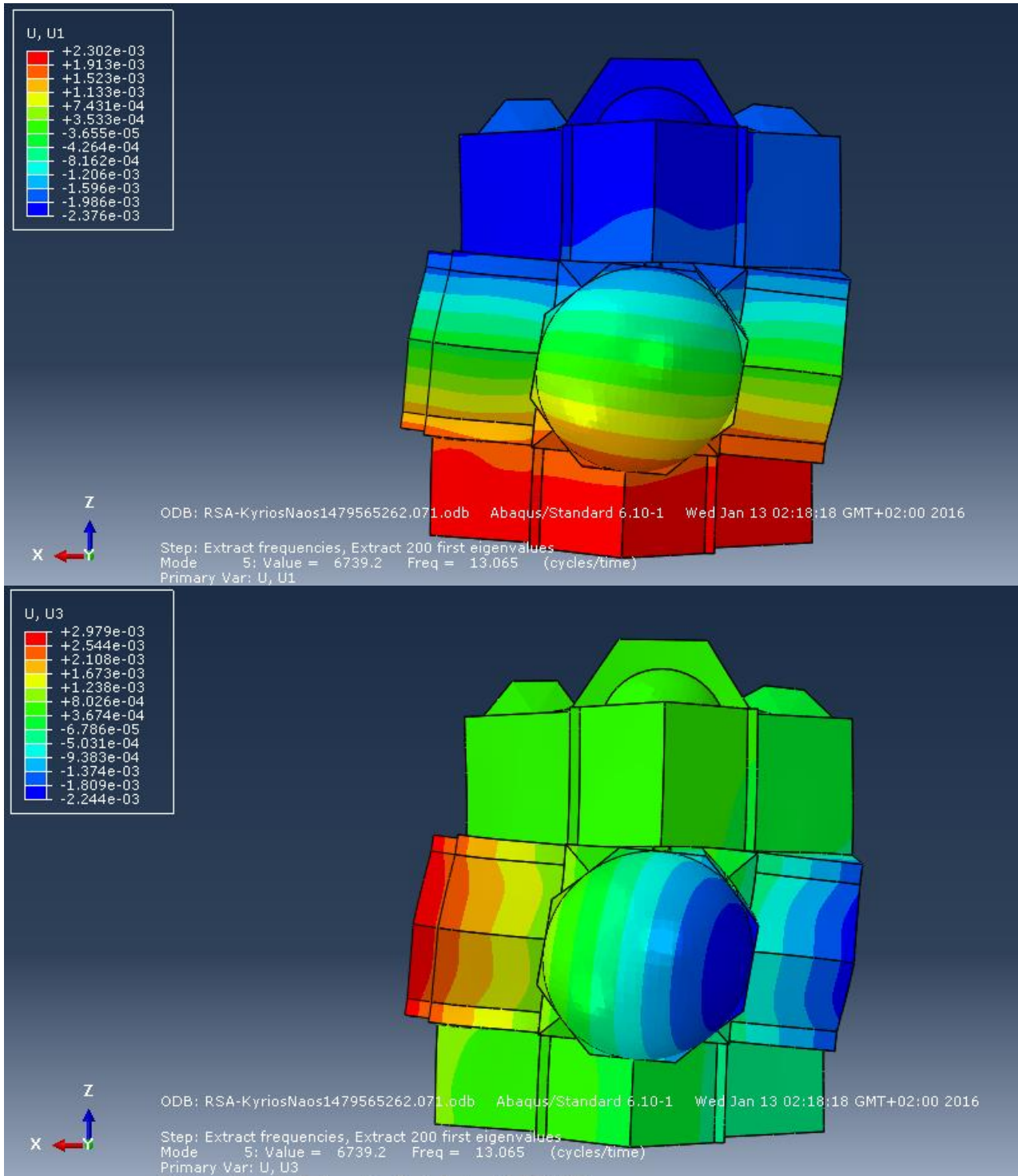
- 2^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση z. Τυπική εκδοχή της σε εκκλησίες (μετακίνηση του σχετικώς εύκαμπτου τρούλου με αντίθεση φάσης ως προς το υπόλοιπο).
- Ιδιοπερίοδος: $T_3 = 0,086 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 63,27 \text{ kg}$ (0,02%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 50810 \text{ kg}$ (13,23%)

4^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



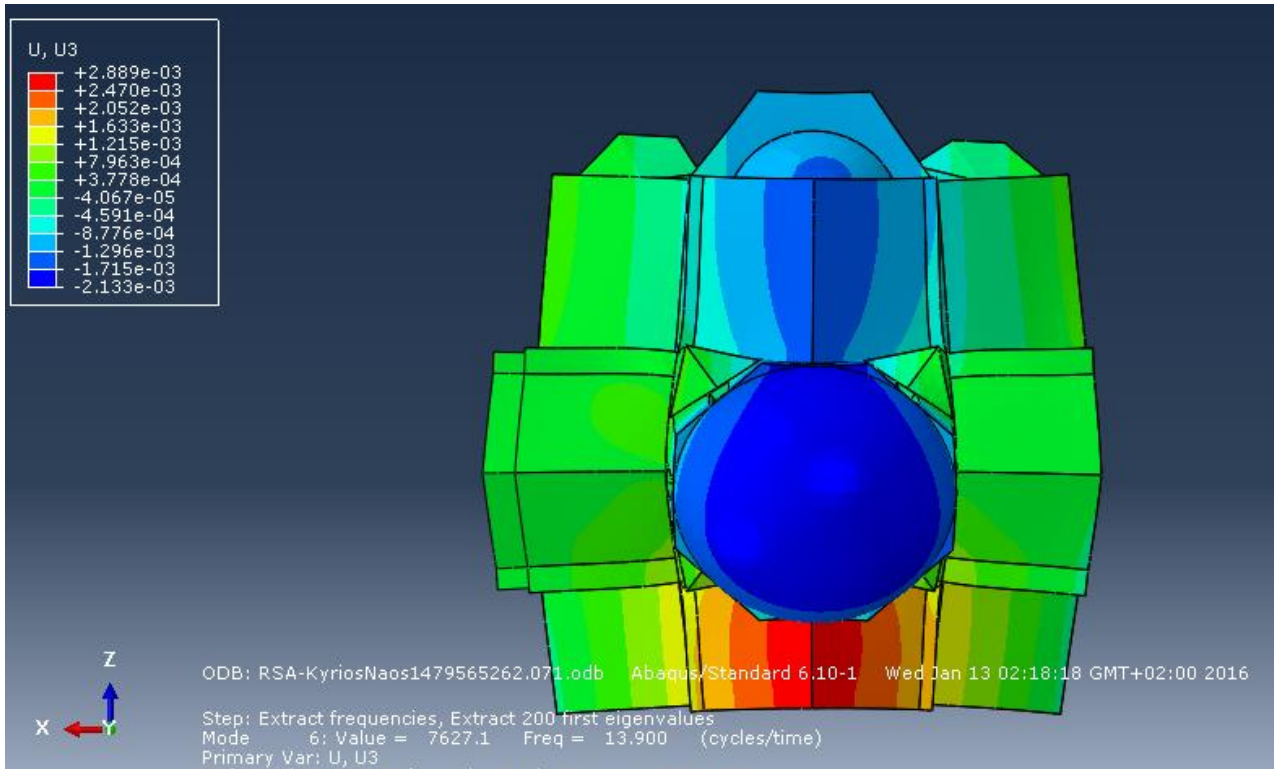
- 2^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση **x**.
- Ιδιοπερίοδος: **$T_4 = 0,084 \text{ sec}$**
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά **x**: **$M_x = 321873 \text{ kg}$** (5,69%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά **z**: **$M_z = 10,2 \text{ kg}$** (-)

5^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



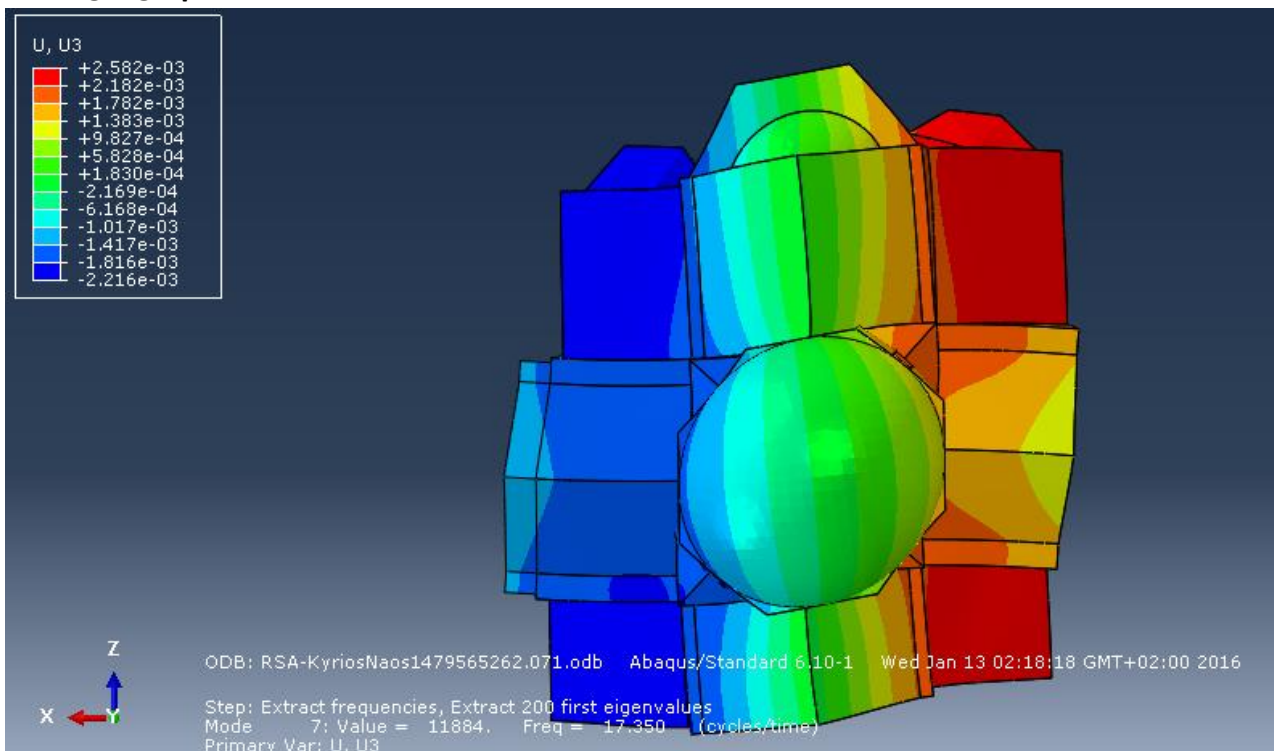
- 1^η σημαντική στρεπτική ιδιομορφή.
- Ιδιοπερίοδος: $T_5 = 0,079 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 2967,7 \text{ kg}$ (0,77%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 5955,7 \text{ kg}$ (1,55%)

6^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



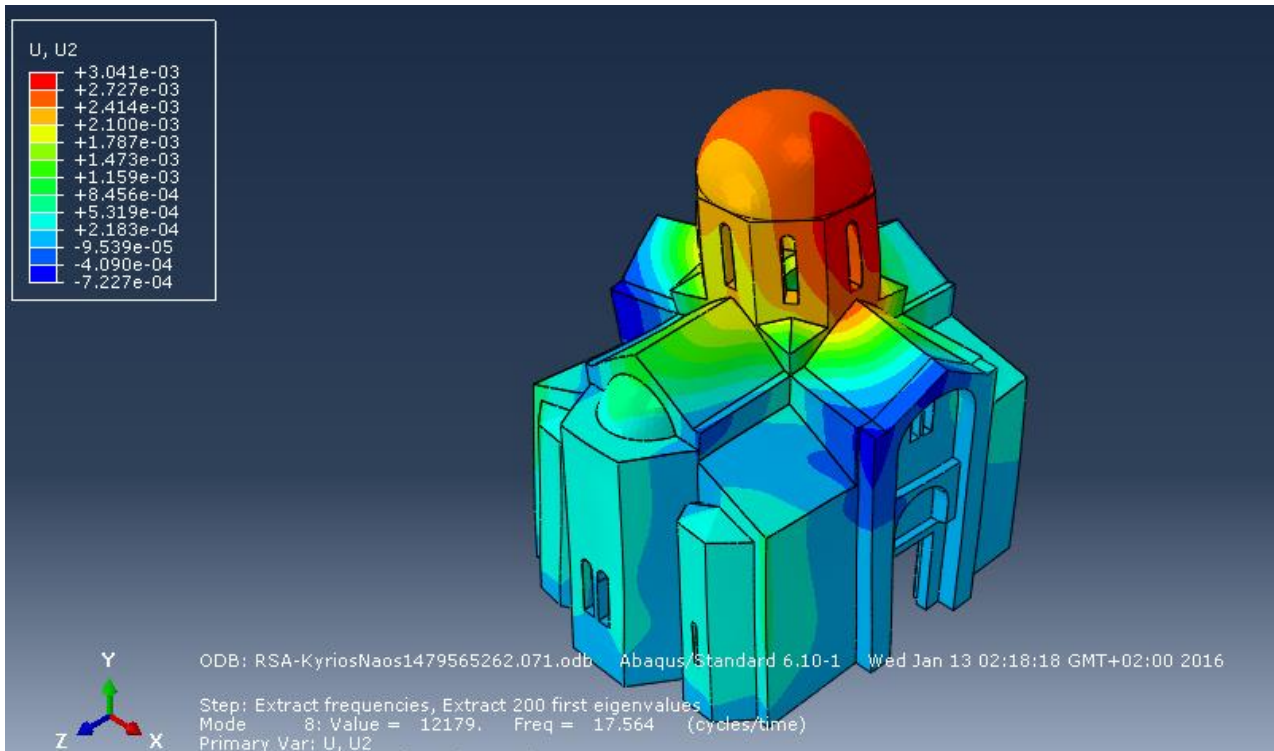
- Η ιδιομορφή αυτή χαρακτηρίζεται από ταλάντωση της δυτικής κεραίας σε αντίθεση φάσης με τον τρούλο και την ανατολική κεραία.
- Ιδιοπερίοδος: $T_6 = 0,072 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 1,44 \text{ kg}$ (-)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 488,15 \text{ kg}$ (0,13%)

7^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:

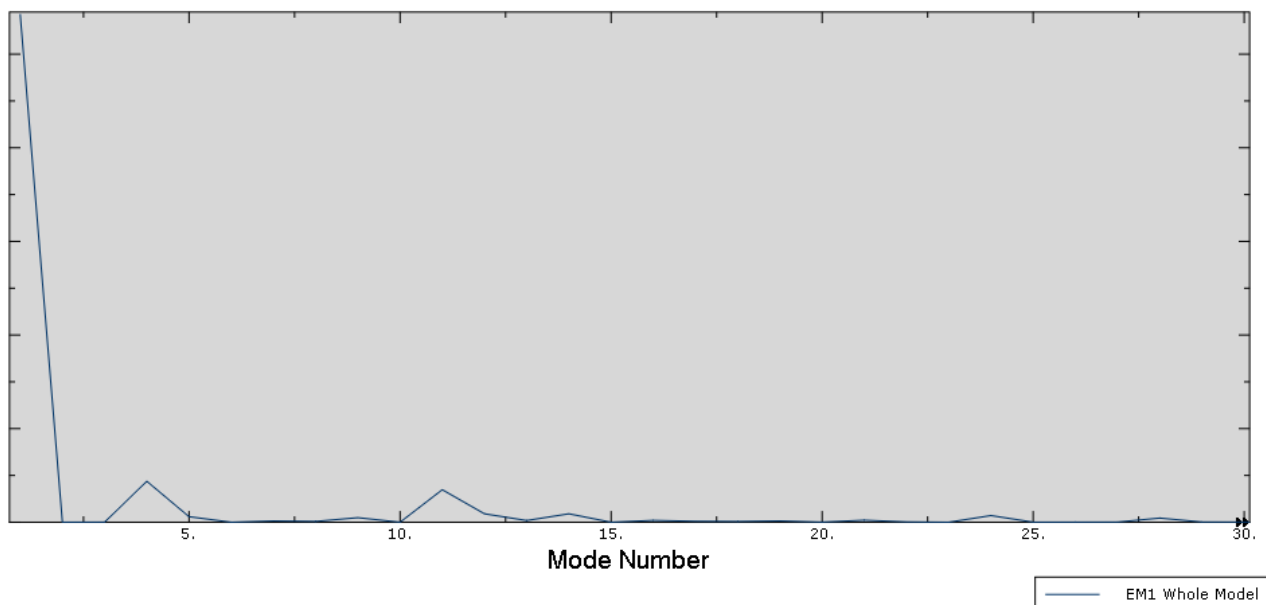


- Ταλάντωση των δυτικών και των ανατολικών διαμερισμάτων με αντίθεση φάσης σε “εφαπτομενική” διεύθυνση.
- Ιδιοπερίοδος: $T_7 = 0,058 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 680,07 \text{ kg}$ (0,18%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 34,82 \text{ kg}$ (-)

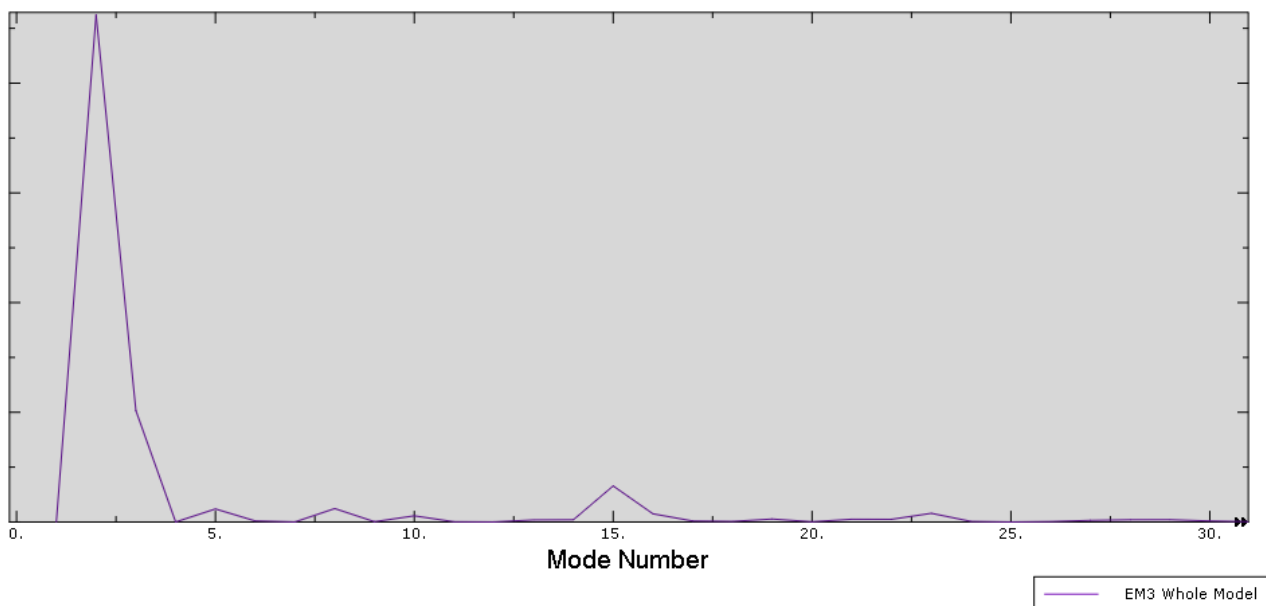
8^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



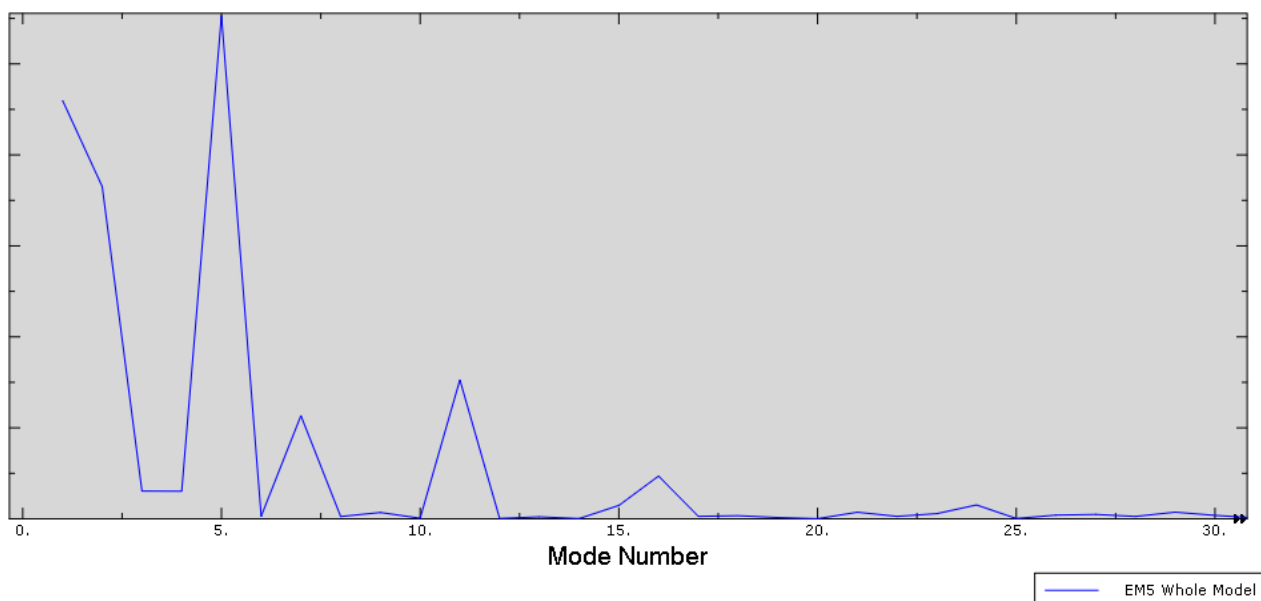
- 1^η σημαντική κατακόρυφη ιδιομορφή.
- Ιδιοπερίοδος: $T_8 = 0,057 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 444,79 \text{ kg}$ (0,12%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 6127,1 \text{ kg}$ (1,59%)



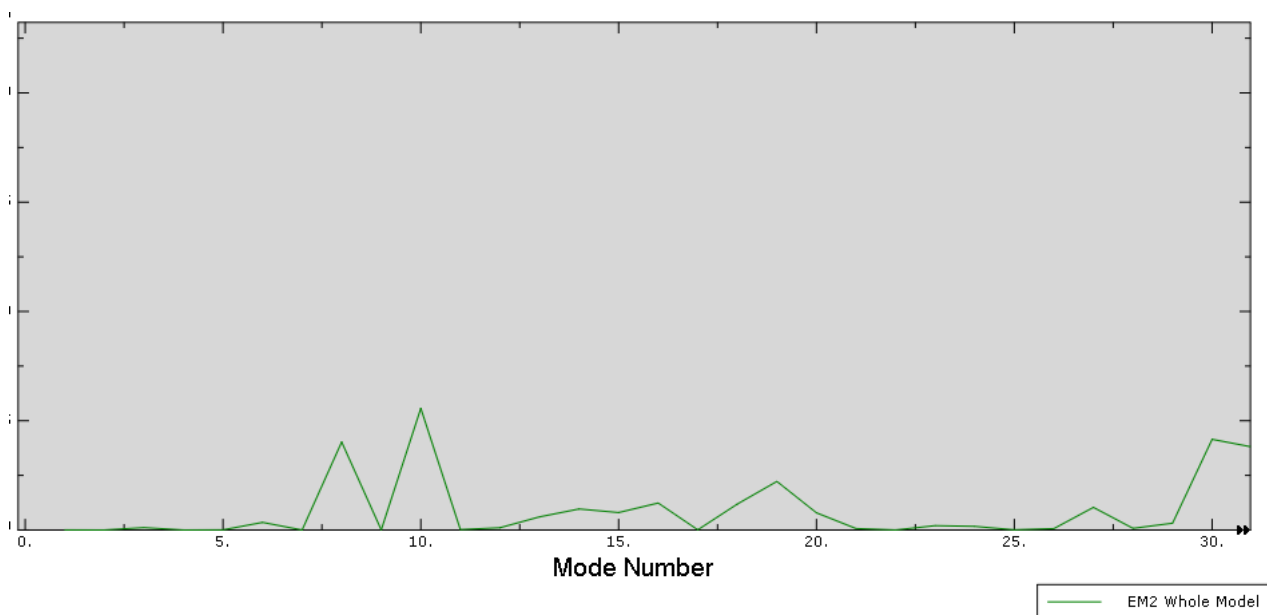
Εικόνα 6-10: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x (διεύθυνση A-Δ) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Όπως φαίνεται, μακράν σημαντικότερη ιδιομορφή είναι η 1^η με δρώσα ιδιομορφική μάζα ($M_{eff,x}$) το 73,54% της συνολικής (βλέπε παραπάνω) και ακολουθούν η 4^η ($M_{eff,x}$ =5,69% της συνολικής) και η 11^η με παρεμφερή συμμετοχή.



Εικόνα 6-11: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z (διεύθυνση Β-Ν) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Εδώ, μακράν σημαντικότερη ιδιομορφή είναι η 2^η ($M_{eff,x}$ =43,21%) και ακολουθεί η 3^η ($M_{eff,x}$ =13,23%) και η 15^η.



Εικόνα 6-12: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική (γενικευμένη) μάζα για περιστροφική κίνηση. Όπως φαίνεται, σημαντικότερη περιστροφική ιδιομορφή είναι η 5^η ενώ σημαντικές είναι και η 1^η, η 2^η, η 7^η και η 11^η.



Εικόνα 6-13: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά την κατακόρυφο (γ) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Διακρίνεται ότι η πρώτη σημαντική κατακόρυφη ιδιομορφή είναι η 8^η, ακολουθεί η 10^η αλλά, όπως είναι αναμενόμενο, οι πλέον σημαντικές ιδιομορφές συγκαταλέγονται μεταξύ των ανωτέρων.

Ιδιομορφικές-Προσομοίωμα "2", Προσθήκες

Οι ανάγκες της ιδιομορφικής ανάλυσης επιβάλλουν τροποποίηση του προσομοιώματος των προσθηκών αντίστοιχη με την τροποποίηση του προσομοιώματος "1", δηλαδή το κωδωνοστάσιο αφαιρείται και υποκαθίσταται από κατανεμημένη μάζα = **7700 kg/m²**. Για τη διακριτοποίηση του φορέα χρησιμοποιήθηκαν:

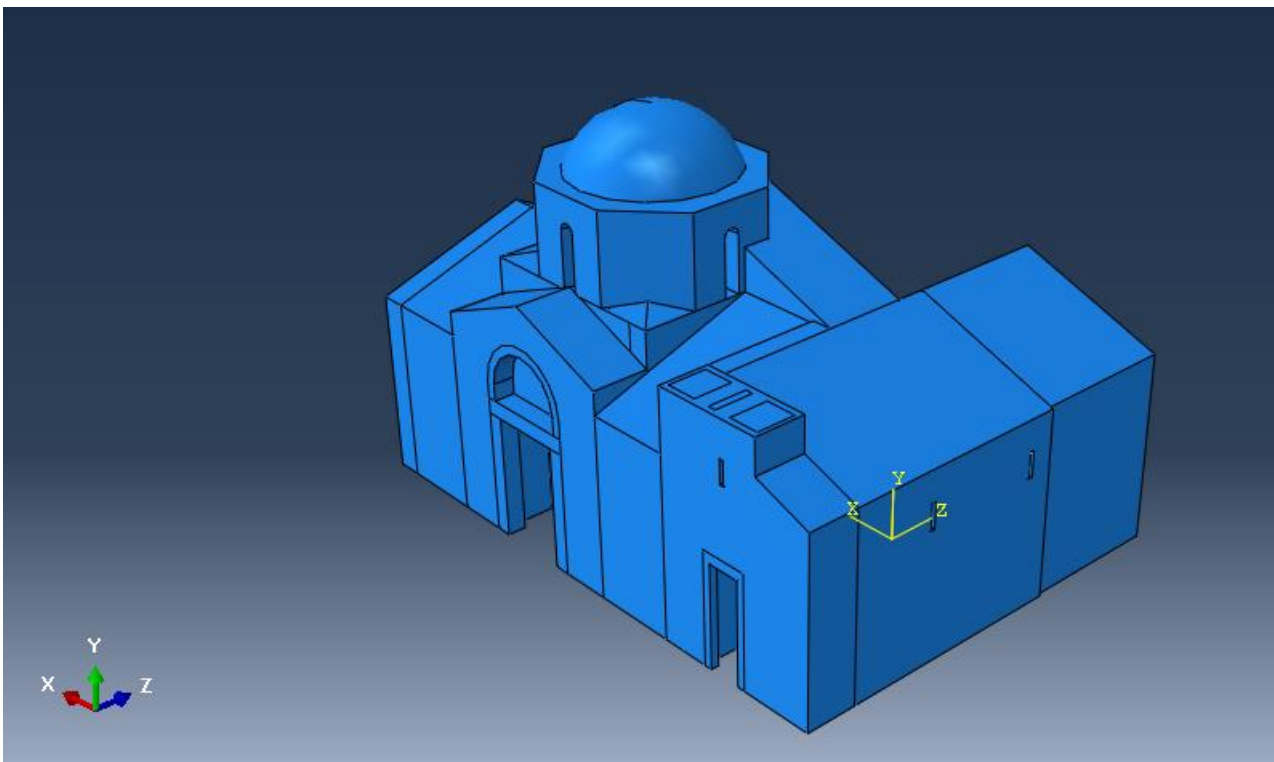
- Στοιχεία τύπου **C3D10** (κύριος όγκος του φορέα)
- Στοιχεία τύπου **T3D2** (αμφιαρθωτές ράβδοι που αντιπροσωπεύουν τους ξύλινους ελκυστήρες)
- Στοιχεία τύπου **SFM3D6** (κατανεμημένες μάζες)

Μέγεθος υπολογιστικού προσομοιώματος:

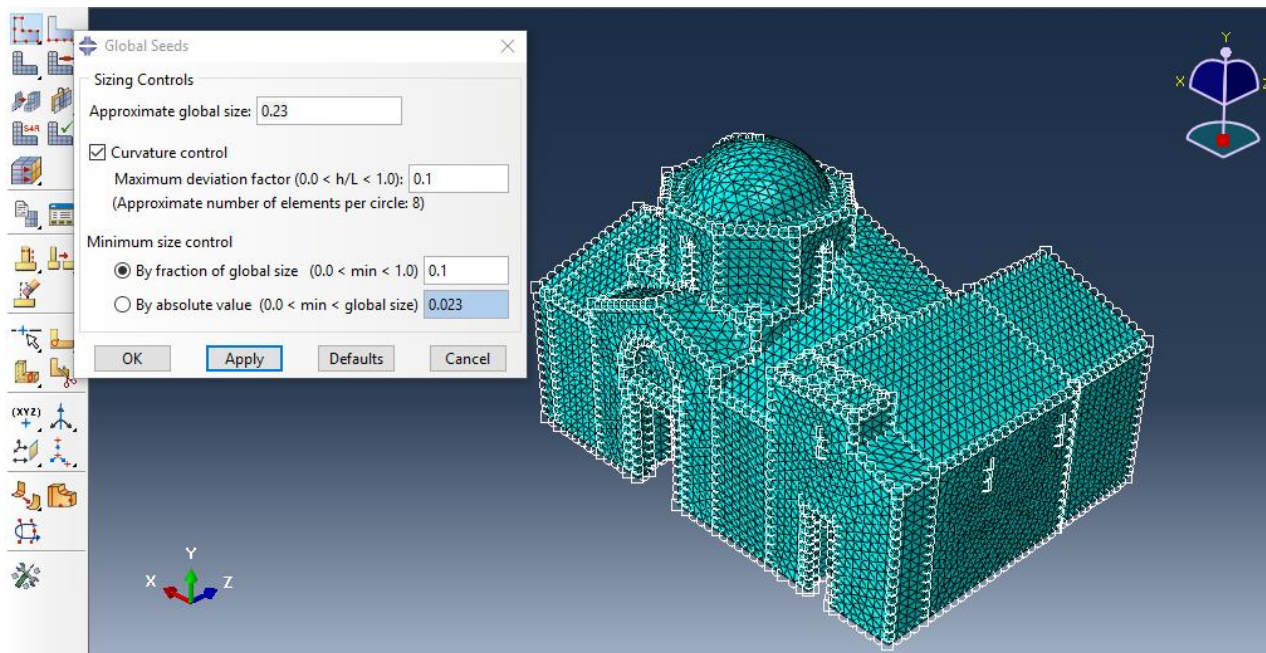
- Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων: 89.286
- Πλήθος κόμβων: 127.732
- Βαθμοί ελευθερίας: 383.196
- **Συνολική μάζα του φορέα: 298.634,2kg**

Τέλος, ως προς την ποιότητα του προσομοιώματος αναφέρεται ότι:

- Πλήθος στοιχείων ακατάλληλου σχήματος (distorted elements): 118
- Αναλογία ακατάλληλων (distorted) στοιχείων: **0,132%**.



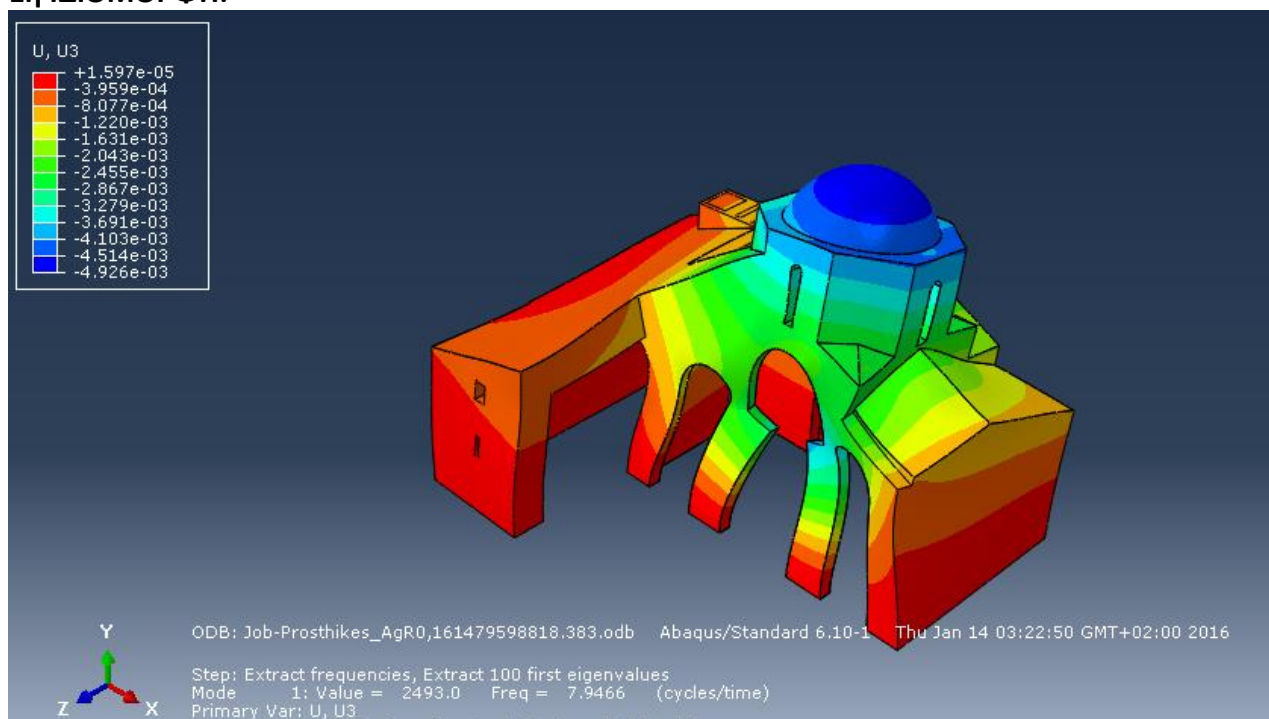
Εικόνα 6-14: Προσομοίωμα "2", προσθήκες.



Εικόνα 6-15: Η διακριτοποίηση του φορέα γίνεται με στοιχεία διαστάσεων περίπου ≈ 23 cm.

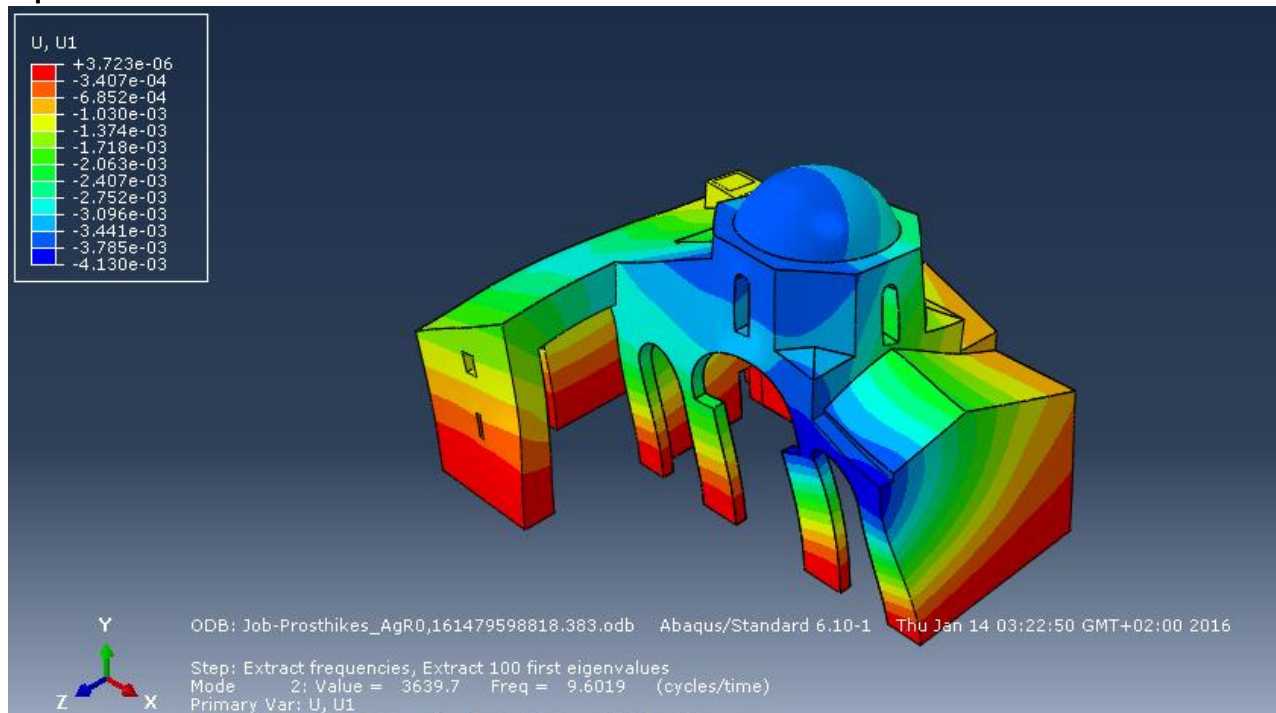
Ακολουθεί η προβολή των σημαντικότερων ιδιομορφών:

1η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



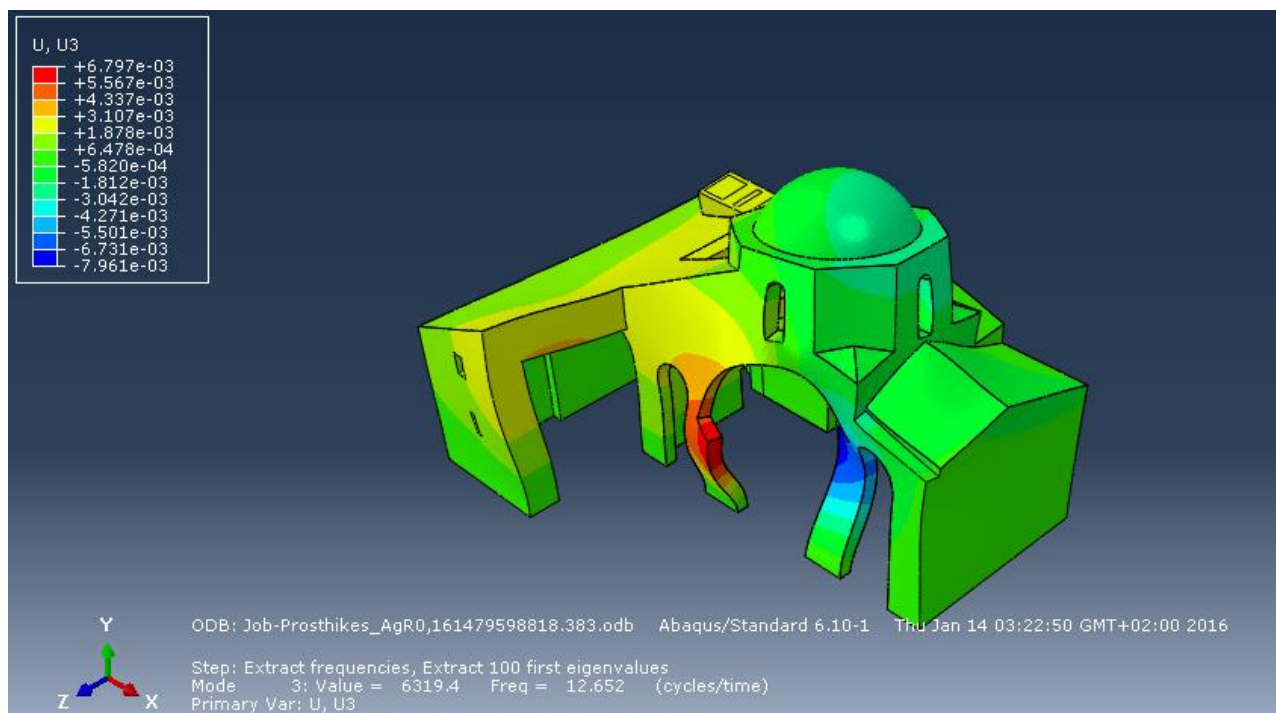
- 1^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση z (A-Δ)
- Ιδιοπερίοδος: $T_1 = 0,126$ sec
- Δρῶσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 6.741,8$ kg (2,26%)
- Δρῶσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 98.472$ kg (32,97%)

2η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



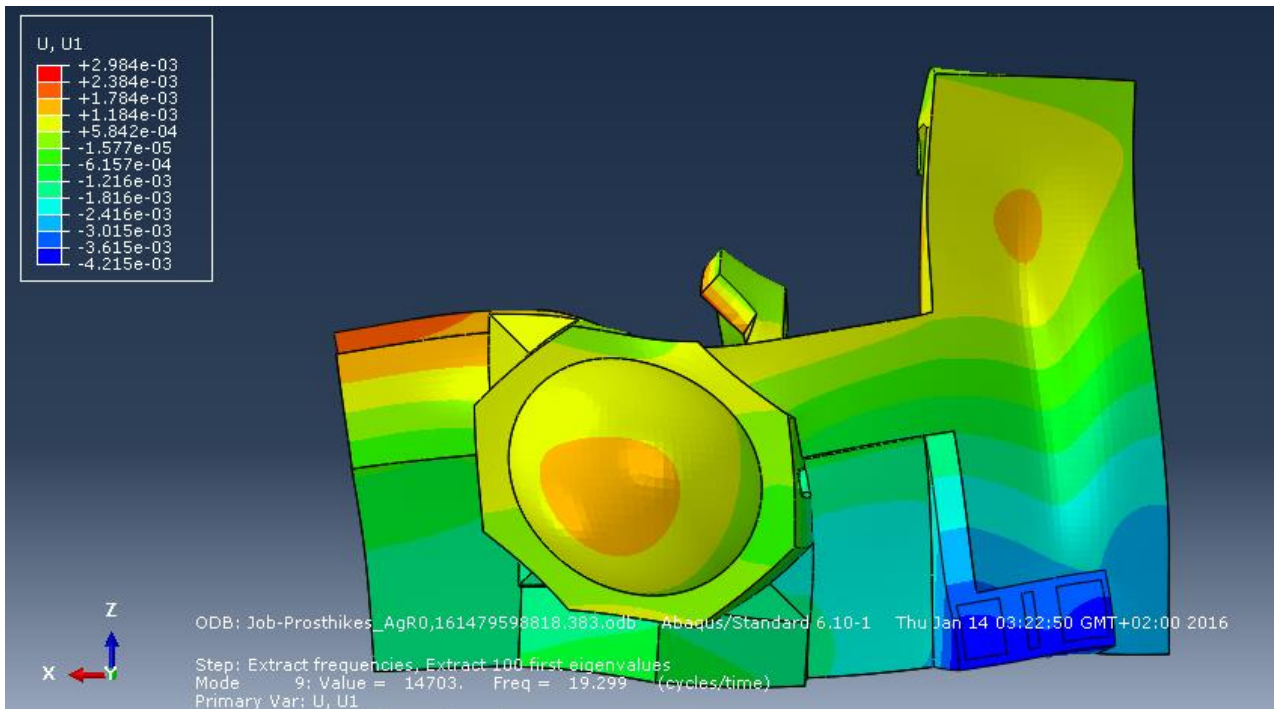
- 1^η μεταφορική ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση x (B-N).
- Ιδιοπερίοδος: $T_2 = 0,104 \text{ sec}$
- Δρῶσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 169.000 \text{ kg}$ (56,59%)
- Δρῶσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 3.604,8 \text{ kg}$ (1,21%)

3^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:

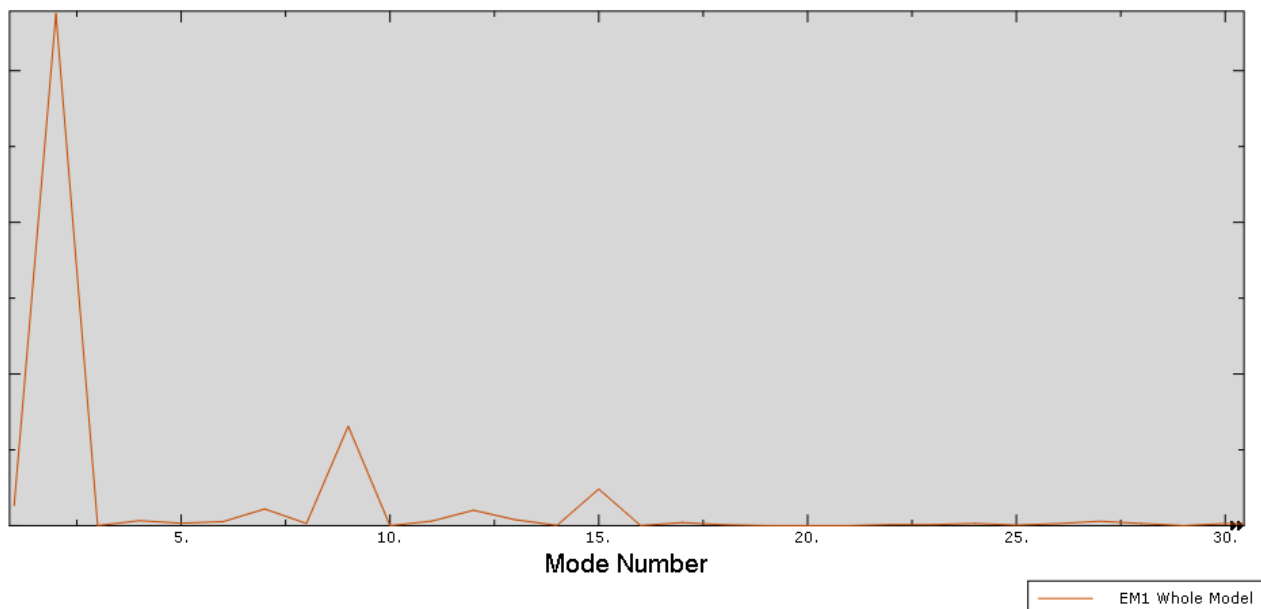


- Η ιδιομορφή αυτή είναι η πρώτη η οποία ενεργοποιεί τους εύκαμπτους δυτικούς πεσσούς του Νάρθηκα. Λόγω της ευκαμψίας τους, η συμμετοχή τους κυριαρχεί σε πολλές από τις πρώτες ιδιομορφές.
- Ιδιοπερίοδος: $T_3 = 0,079 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 7,7 \text{ kg}$ (-)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 48.426 \text{ kg}$ (16,22%)

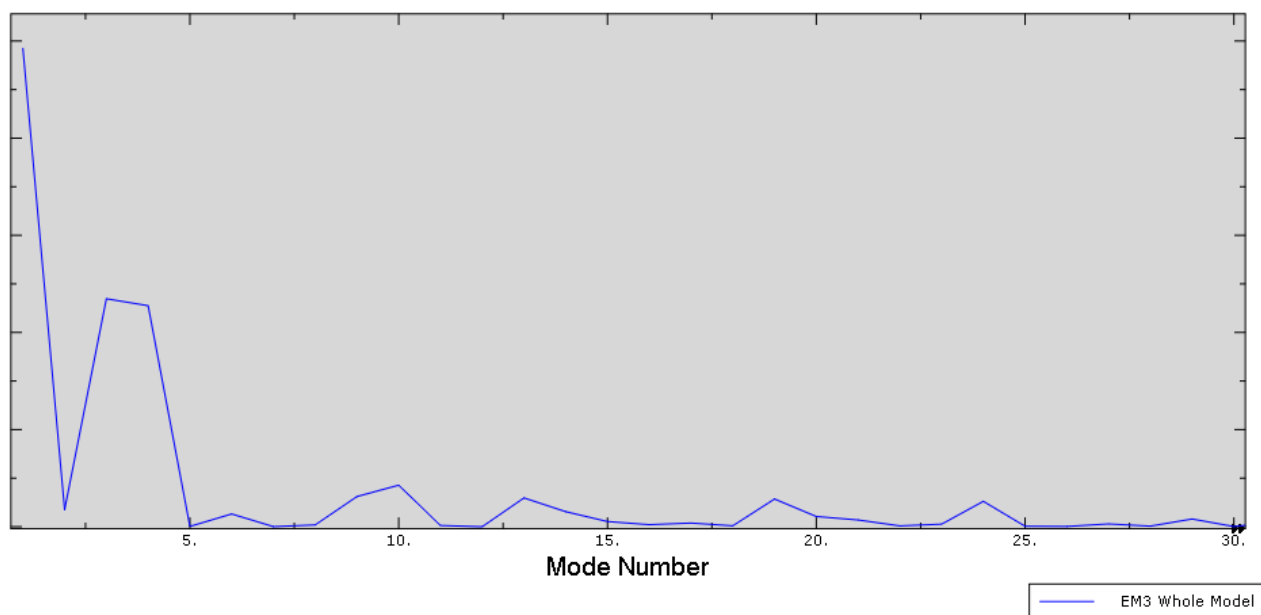
9^η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ:



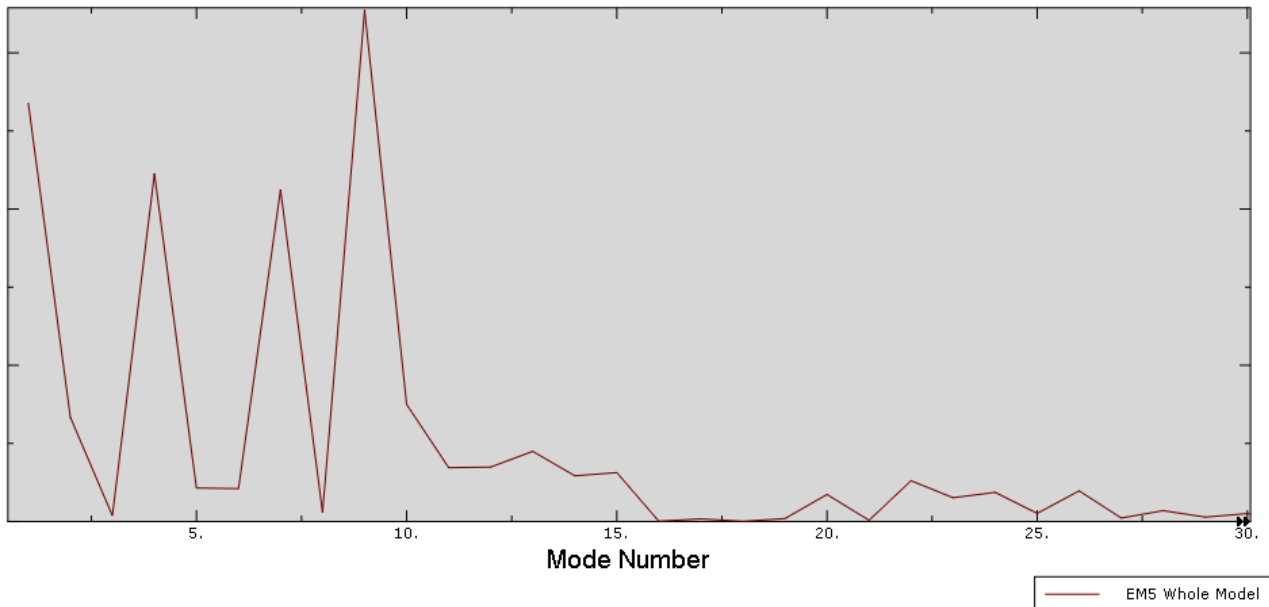
- 1^η σημαντική περιστροφική ιδιομορφή. Η ασάφεια και η ασυμμετρία της περιστροφικής κίνησης είναι έντονη.
- Ιδιοπερίοδος: $T_4 = 0,052 \text{ sec}$
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x: $M_x = 32.967 \text{ kg}$ (11,04%)
- Δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z: $M_z = 6.935,8 \text{ kg}$ (2,32%)



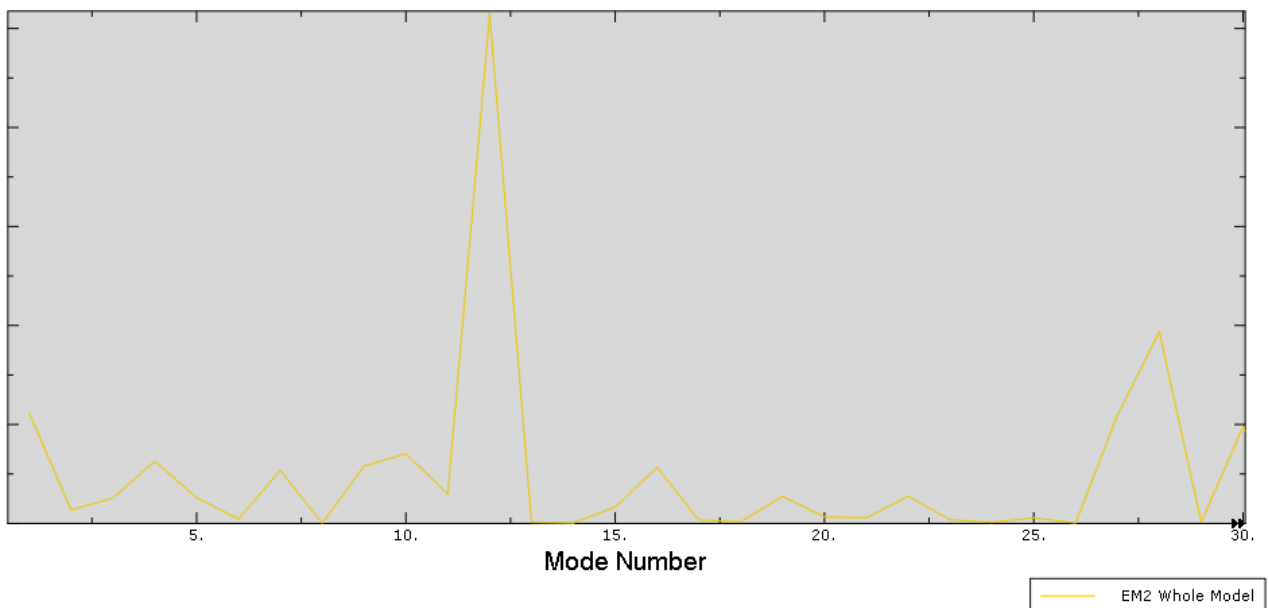
Εικόνα 6-16: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά x (διεύθυνση Β-Ν) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Όπως φαίνεται, μακράν σημαντικότερη ιδιομορφή είναι η 2^η με δρώσα ιδιομορφική μάζα ($M_{eff,x}$) το 56,59% της συνολικής (βλέπε παραπάνω) και ακολουθούν η 9^η ($M_{eff,x} = 11,04\%$ της συνολικής) και η 15^η.



Εικόνα 6-17: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά z (διεύθυνση Α-Δ) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Εδώ, μακράν σημαντικότερη ιδιομορφή είναι η 1^η ($M_{eff,z} = 32,97\%$) και ακολουθεί η 3^η ($M_{eff,z} = 16,22\%$) και 4^η.



Εικόνα 6-18: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική (γενικευμένη) μάζα για περιστροφική κίνηση. Όπως φαίνεται, σημαντικότερη περιστροφική ιδιομορφή είναι η 9^η ενώ σημαντικές είναι και η 1^η, η 4^η, η 7^η και άλλες.



Εικόνα 6-19: Στο διάγραμμα εικονίζεται η δρώσα ιδιομορφική μάζα κατά την κατακόρυφο (γ) για τις 30 πρώτες ιδιομορφές. Διακρίνεται ότι η πρώτη σημαντική κατακόρυφη ιδιομορφή είναι η 12^η, όμως οι σημαντικότερες βρίσκονται μεταξύ των ανωτέρων ιδιομορφών.

Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των ιδιομορφών γίνεται εμφανές ότι ο φορέας, σε όλες του τις εκδοχές, είναι δύσκαμπτος και η δυναμική του συμπεριφορά καθορίζεται από πολλές ιδιομορφές, γεγονός που αποδίδεται στην απουσία οροφής διαφραγματικής λειτουργίας, στην συνεχή κατανομή της μάζας στο σύνολο του φορέα και στην περίπλοκη μη-συμμετρική μορφολογία του.

Ο Κυρίως Ναός:

- Είναι ο πλέον εύκαμπτος φορέας ($T_1 = 0,151 \text{ sec}$), πράγμα που οφείλεται στο μεγάλο ύψος του και στην, εν σχέση προς τις προσθήκες, λεπτότοιχη τοιχοποιία του.
- Όπως αναμένεται, η 1^η του ιδιομορφή είναι μεταφορική κατά την εγκάρσια διεύθυνσή του (B-N) και η 2^η μεταφορική κατά την διαμήκη (A-Δ). Και οι δύο ενεργοποιούν μεγάλο μέρος της μάζας του φορέα (73,54% και 60,13% αντίστοιχα), γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην σχετική "κανονικότητα" της μορφολογίας του και ίσως και στη δυσκαμψία του κελύφους οροφής (πλην τρούλου).
- Οι επόμενες 2 ιδιομορφές είναι επίσης μεταφορικές και χαρακτηρίζονται από την ταλάντωση του τρούλου σε αντίθεση φάσης με τον υπόλοιπο ναό.
- Η πρώτη σημαντική στρεπτική ιδιομορφή είναι η 5^η (η περιμετρική τοιχοποιία κυριαρχεί και καθιστά τον φορέα δύστρεπτο).

Η προσθήκη στον Κυρίως Ναό των μεταβυζαντινών προσθηκών περιπλέκει την μορφολογία του και όπως αναμένεται περιπλέκει και τη δυναμική του συμπεριφορά. Έτσι, για το Καθολικό θεωρούμενο ως ενιαίο σώμα (προσομοίωμα "2") ισχύουν τα παρακάτω:

- Οι προσθήκες καθιστούν το Καθολικό κατά τι δυσκαμπτότερο από τον Κυρίως Ναό ($T_1 = 0,132 \text{ sec}$ έναντι $0,151 \text{ sec}$).
- Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των 5 πρώτων ιδιομορφών του Καθολικού είναι κοινά με αυτά των αντιστοιχών ιδιομορφών του Κυρίως Ναού, όμως διακρίνονται από μεγαλύτερη ασάφεια.
- Οι πρώτες ιδιομορφές στις 2 διευθύνσεις ενεργοποιούν μάζα της τάξης του 50% του συνόλου της.
- Εμφανίζονται σημαντικές ιδιομορφές στις οποίες τα συστατικά μέρη του Καθολικού (Κυρίως Ναός και προσθήκες) τείνουν να κινηθούν διαφορετικά (πχ 9^η ιδιομορφή).

Τέλος, οι προσθήκες μόνες τους έχουν μία παράδοξη μορφολογία που οδηγεί σε αντίστοιχα αποτελέσματα:

- Αποτελούν τον στιβαρότερο σχηματισμό ($T_1 = 0,126 \text{ sec}$) πράγμα που αποδίδεται στην ογκώδη εξωτερική τους τοιχοποιία.
- Οι πρώτες δύο ιδιομορφές είναι μεταφορικές. Η 1^η κατά την εγκάρσια του Νάρθηκα διεύθυνση και η 2^η κατά τη διαμήκη και οι δρώσες ιδιομορφικές τους μάζες είναι αντίστοιχα το 32,97% και το 56,59% της συνολικής μάζας.
- Οι επόμενες ιδιομορφές, κατά κανόνα έχουν ασαφή χαρακτήρα ή κυριαρχούνται από την κίνηση των, δυσανάλογα προς την εξωτερική τοιχοποιία, εύκαμπτων δυτικών πεσσών του Νάρθηκα.

7 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

7.1 Διαδικασία της ανάλυσης

Η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης, γνωστή και ως *δυναμική φασματική ανάλυση* είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους δυναμικής ανάλυσης κατασκευών στη μελετητική πράξη, καθώς σκοπός της είναι ο υπολογισμός της μέγιστης τιμής των εντατικών μεγεθών, βασιζόμενη στα μέγιστα των ιδιομορφικών αποκρίσεων.

Για το λόγο αυτό, επιλέγεται να είναι το πρώτο βήμα των δυναμικών αναλύσεων αυτής της εργασίας και εφαρμόζεται σε όλα τα γραμμικά προσομοιώματα (**προσομοίωμα "1" και προσομοίωμα "2"**).

Η διαδικασία που τηρείται είναι η ακόλουθη: Αρχικά ο φορέας υποβάλλεται σε στατική ανάλυση υπό το ίδιο βάρος του. Στη συνέχεια έπεται η εξαγωγή του απαιτούμενου αριθμού ιδιομορφών, η ανάλυση των οποίων λαμβάνει χώρα στο προηγούμενο κεφάλαιο, και με βάση αυτές εκτελείται η Ι.Α.Φ.Α. Τέλος, γίνεται η επαλληλία των εντάσεων της στατικής ανάλυσης (ένταση από το ίδιο βάρος) και της Ι.Α.Φ.Α. (σεισμική ένταση), ώστε να προκύψει η "πραγματική" ένταση του φορέα και ακολουθεί η προβολή των αποτελεσμάτων που θεωρούνται αντιπροσωπευτικότερα, σε όρους τάσεων και τροπών, και ο σχολιασμός τους.

Τα αποτελέσματα προβάλλονται μέσω κατάλληλων γραφικών απεικονίσεων, στις οποίες εικονίζεται η μέγιστη κύρια τάση (με τις εφελκυστικές τάσεις να προσημαίνονται θετικά). Οι περιοχές του φορέα όπου η τάση ξεπερνά την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας (όπως ορίστηκε στο υποκεφάλαιο 5.3) είναι χρωματισμένες γκρι. Όσον αφορά στη θλιπτική αστοχία, παρατηρείται ότι σπανίζει οπότε δεν της δίνεται ιδιαίτερη έμφαση (με την προβολή και της ελάχιστης κύριας θλίψης) όμως, σε περίπτωση ανάπτυξης τάσεων με χαμηλότερη τιμή από τη θλιπτική αντοχή ο χρωματισμός γίνεται μαύρος.

Σε κάθε προσομοίωμα (Καθολικό, Κυρίως Ναός και προσθήκες) γίνονται **3 Ι.Α.Φ.Α.**:

- Μια με σεισμική επιτάχυνση κατά **x**.
- Μια με σεισμική επιτάχυνση κατά **y**.
- Μια και κατά τις 2 διευθύνσεις (**x+y**).

Οι απαιτούμενες ιδιομορφές έχουν επιλεγεί και έχουν υπολογιστεί ήδη για τις ανάγκες της ιδιομορφικής ανάλυσης που προηγείται και το πλήθος τους, που είναι **100**, είναι επαρκές ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του Κ.Α.Δ.Ε.Τ. όπως αυτές παρατίθενται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το άθροισμα των δρωσών ιδιομορφικών μαζών για κάθε φορέα είναι συγκεκριμένα:

▪ **Καθολικόν:**

- $\Sigma M_{\text{eff},x} = 609.000 \text{ kg}$ σε σύνολο $M_{\text{tot}} = 682.774,4 \text{ kg}$ **(89%)**
- $\Sigma M_{\text{eff},y} = 598.000 \text{ kg}$ >> >> **(88%)**

▪ **Καθολικόν:**

- $\Sigma M_{\text{eff},x} = 353.000 \text{ kg}$ σε σύνολο $M_{\text{tot}} = 682.774,4 \text{ kg}$ **(92%)**
- $\Sigma M_{\text{eff},y} = 353.000 \text{ kg}$ >> >> **(92%)**

▪ **Καθολικόν:**

- $\Sigma M_{\text{eff},x} = 267.755,4 \text{ kg}$ σε σύνολο $M_{\text{tot}} = 682.774,4 \text{ kg}$ **(89%)**

$$- \Sigma M_{\text{eff},y} = 268.438,6 \text{ kg} \quad \gg \quad \gg \quad (90\%)$$

Ο συνδυασμός των μέγιστων ιδιομορφικών αποκρίσεων γίνεται με τον κανόνα της τετραγωνικής επαλληλίας (SRSS). Ο ίδιος κανόνας (SRSS) ακολουθείται και για την χωρική επαλληλία στην περίπτωση 3.

Στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψιν η απόσβεση κατά Rayleigh. Σύμφωνα με αυτήν τη θεώρηση, η απόσβεση που αντιστοιχεί σε κάθε ιδιομορφή είναι:

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} * \frac{1}{\omega_j} + \frac{a_1}{2} * \omega_j, j=0 \text{ αύξων αριθμός της ιδιομορφής.}$$

Για τα a_0 και a_1 (στην ορολογία του Abaqus α_{R} και β_{R} αντίστοιχα) ισχύει:

$$a_0 = \zeta * \frac{2 * \omega_1 * \omega_n}{\omega_1 + \omega_n}$$

Και

$$a_1 = \zeta * \frac{2}{\omega_1 + \omega_n}, \text{ όπου } n \text{ η τελευταία ιδιομορφή.}$$

▪ Για το Καθολικό είναι:

- $T_1 = 0,132 \text{ sec} \rightarrow \omega_1 = 47,619 \text{ sec}^{-1}$
- $T_{100} = 0,0174 \text{ sec} \rightarrow \omega_{100} = 361,18 \text{ sec}^{-1}$
- Συνεπώς:
- $a_0 = 4,2072$
- $a_1 = 2,446 * 10^{-4}$

▪ Για τον Κυρίως Ναό είναι:

- $T_1 = 0,151 \text{ sec} \rightarrow \omega_1 = 41,597 \text{ sec}^{-1}$
- $T_{100} = 0,0139 \text{ sec} \rightarrow \omega_{100} = 451,99 \text{ sec}^{-1}$
- Συνεπώς:
- $a_0 = 3,809$
- $a_1 = 2,026 * 10^{-4}$

▪ Για τις προσθήκες είναι:

- $T_1 = 0,126 \text{ sec} \rightarrow \omega_1 = 49,964 \text{ sec}^{-1}$
- $T_{100} = 0,0134 \text{ sec} \rightarrow \omega_{100} = 469,22 \text{ sec}^{-1}$
- $a_0 = 4,516$
- $a_1 = 1,926 * 10^{-4}$

7.2 Φάσμα απόκρισης

Η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης έγινε βάση του Ευρωκώδικα 8. Ο χώρος του μνημείου εντάσσεται στην σεισμική **Ζώνη 1**, θεμελιώνεται σε βραχώδες έδαφος που εντάσσεται στον **εδαφικό τύπο Α**, και το μνημείο κατατάσσεται στην **κατηγορία σπουδαιότητας iv**. Επιλέγεται συντελεστής απόσβεσης **$\zeta=5\%$** .

Τα παραπάνω παρατίθενται αναλυτικότερα στους κατωτέρω πίνακες:

Z1_A_Σ4_ζ2		ζ= 5	η= 1				
			dg,max 0,0392				
			= 4 m				
		$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D$					
	Z	a _{gR/g}					
Ζώνη	1	0,160					
		S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)	T _E (s)	T _F (s)
Εδαφικός Τύπος	a	1	0,15	0,4	2,5	4,5	10

Πίνακας 7-1: Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων, χαρακτηριστικά σημεία.

Κατηγορία Σπουδαιότητας	I	II	III	IV
Συντελεστής Σπουδαιότητας γ _I	0,8	1	1,2	1,4

Πίνακας 7-2: Τιμές του συντελεστή σπουδαιότητας γ_I σύμφωνα με το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα.

Εδαφικός Τύπος	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1	0,15	0,4	2,5
B	1,2	0,15	0,5	2,5
C	1,15	0,2	0,6	2,5
D	1,35	0,2	0,8	2,5
E	1,4	0,15	0,5	2,5

Πίνακας 3: Τιμές των παραμέτρων για τα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 (M_s > 5.5) σύμφωνα με το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα.

Πίνακας 7-3: Συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης και χαρακτηριστικών ιδιοπεριόδων αναλόγως του εδαφικού τύπου.

$$0 \leq T \leq T_B : S_{\varepsilon}(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

Εξίσωση 7-1: Ανιόν κλάδος του φάσματος απόκρισης.

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

Εξίσωση 7-2: "Πλατώ" του φάσματος.

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

Εξίσωση 7-3: Κλάδος "ίσων ταχυτήτων".

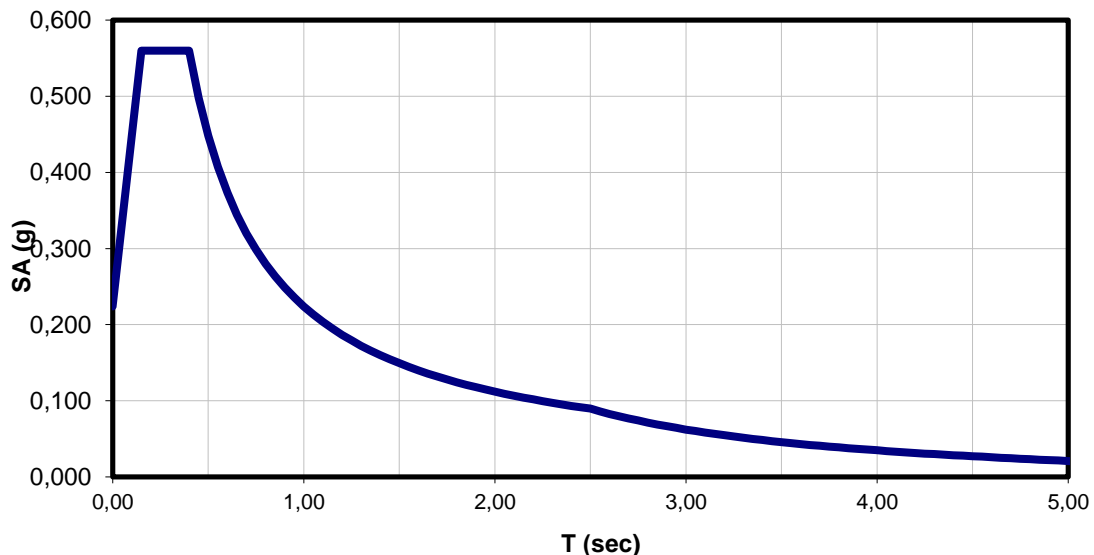
$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

Εξίσωση 7-4: Κλάδος "ίσων μετακινήσεων".

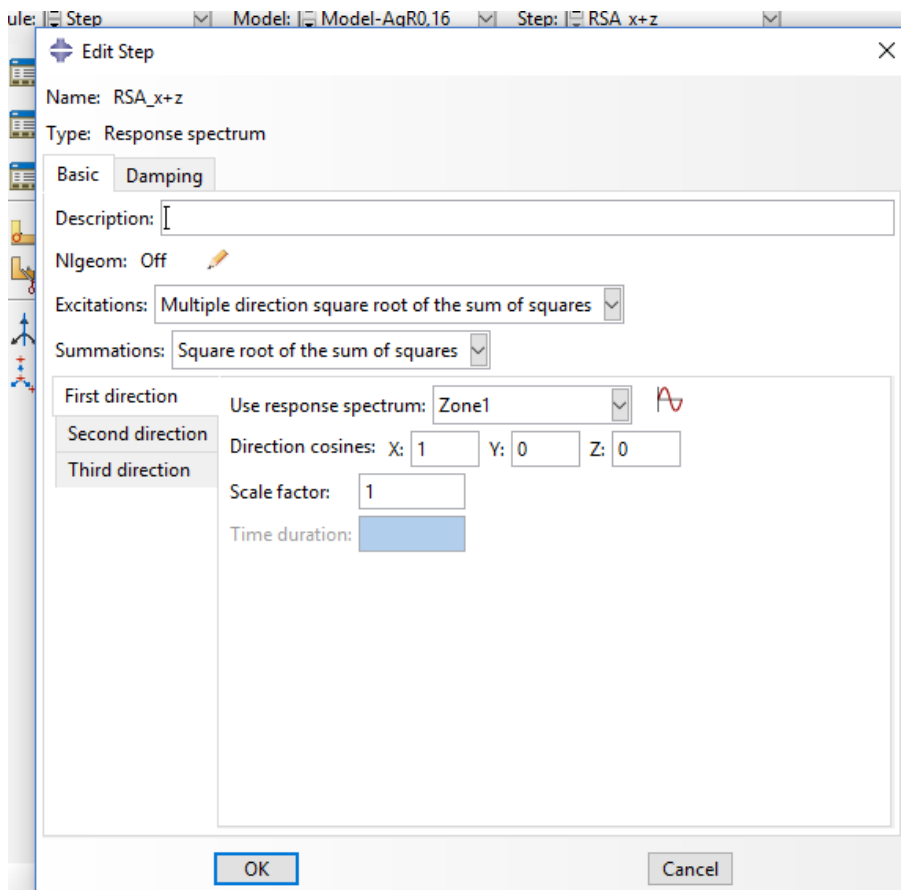
T	SAel (g)	SAel (m/sec ²)
0,00	0,224	2,197
0,05	0,336	3,296
0,10	0,448	4,395
0,15	0,560	5,494
0,20	0,560	5,494
0,25	0,560	5,494
0,30	0,560	5,494
0,35	0,560	5,494
0,40	0,560	5,494

Πίνακας 7-4: Οι τιμές του φάσματος απόκρισης για ιδιοπεριόδους μέχρι την $T_c (=0,40 \text{ sec})$

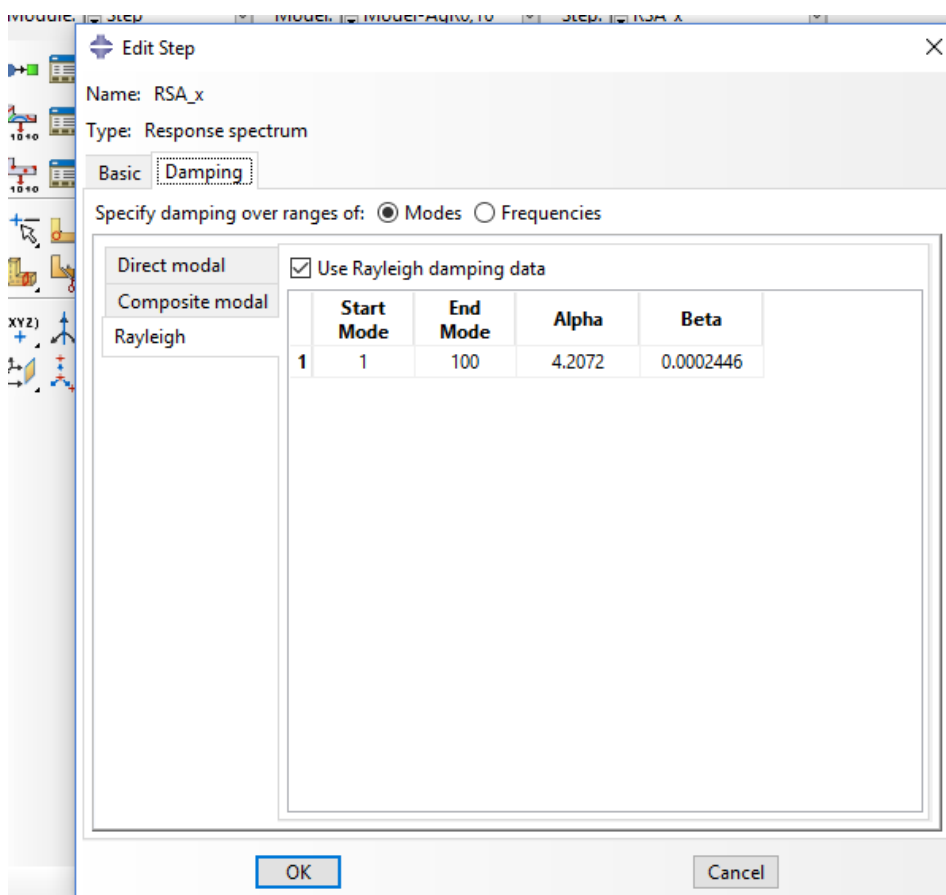
Z1_A_Σ4_ζ2



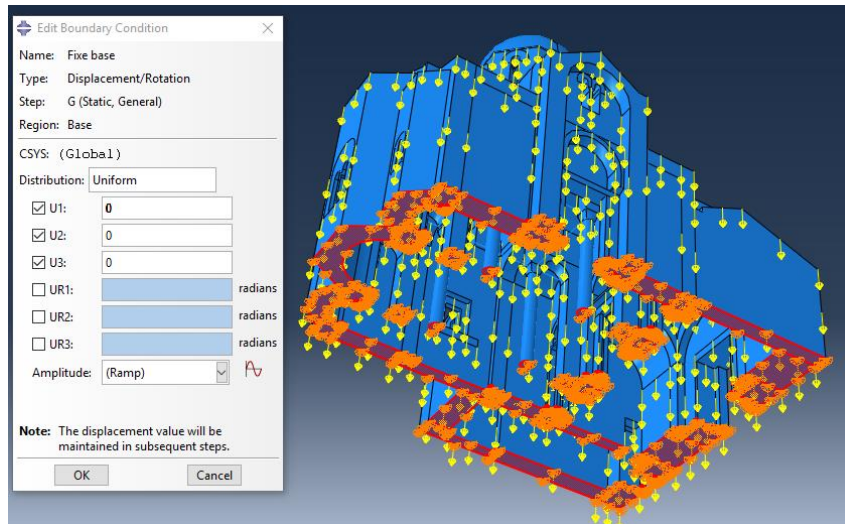
Πίνακας 7-5: Το σεισμικό φάσμα απόκρισης του EC8 για τα επιλεγέντα χαρακτηριστικά.



Εικόνα 7-1: Επιλογή Ι.Α.Φ.Α. και προσδιορισμός των βασικών χαρακτηριστικών της στο ABAQUS.



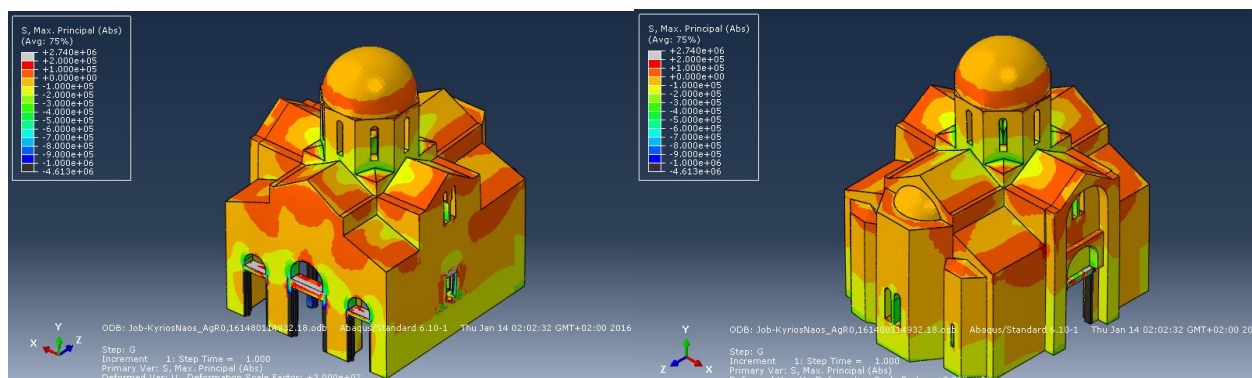
Εικόνα 7-2: Προσδιορισμός της απόσβεσης στο Abaqus.



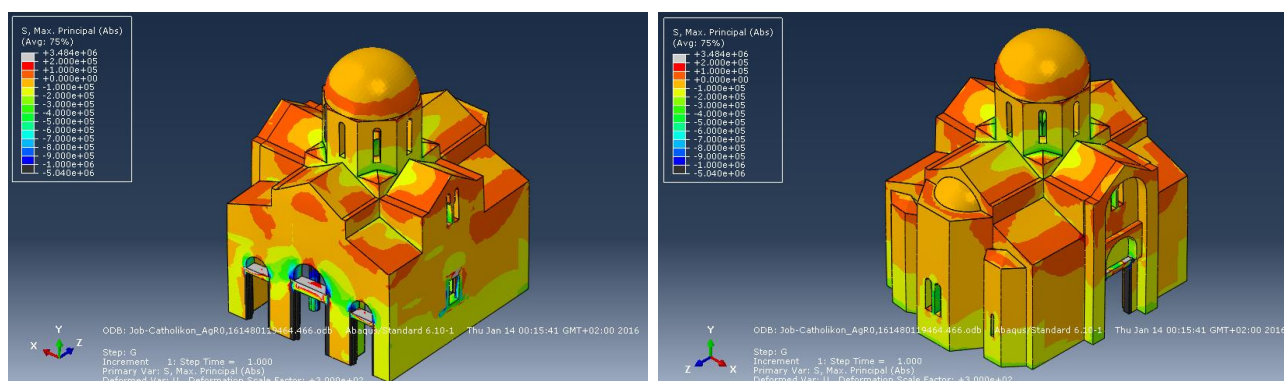
Εικόνα 7-3: Εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών και της φόρτισης στο περιβάλλον του ABAQUS. Το ίδιο βάρος του φορέα εισάγεται ως κατακόρυφο πεδίο επιταχύνσεων με τιμή $=g=9,81 \text{ m/sec}^2$. Η πάκτωση της βάσης του υλοποιείται με την δέσμευση των μετακινήσεων των σημείων της.

7.3 Αποτελέσματα για τον Κυρίως Ναό.

Ανάλυση για το ίδιο βάρος



Εικόνα 7-4: Εικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στο Κυρίως Ναό βάσει του “προσομοιώματος 2”. Δεν παρατηρείται πουθενά υπέρβαση των αντοχών της τοιχοποιίας. Οι μοναδικές περιοχές που εικονίζονται γκρι ανήκουν σε μαρμάρινα στοιχεία που διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή.



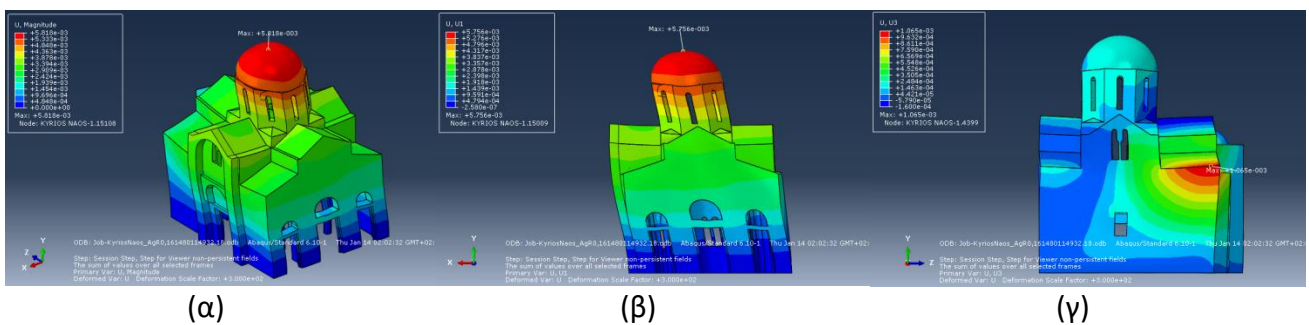
Εικόνα 7-5: Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης βάσει του “προσομοιώματος 1”. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι παρεμφερή με αυτά της εναλλακτικής προσομοίωσης που εικονίζονται παραπάνω. Εξάιρεση αποτελούν οι πεσσοί της δυτικής πλευράς οι οποίοι φαίνεται να παραλαμβάνουν και μέρος του φορτίου της ογκόδους οροφής του Νάρθηκα.

Σεισμική επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση x (Βορράς-Νότος)

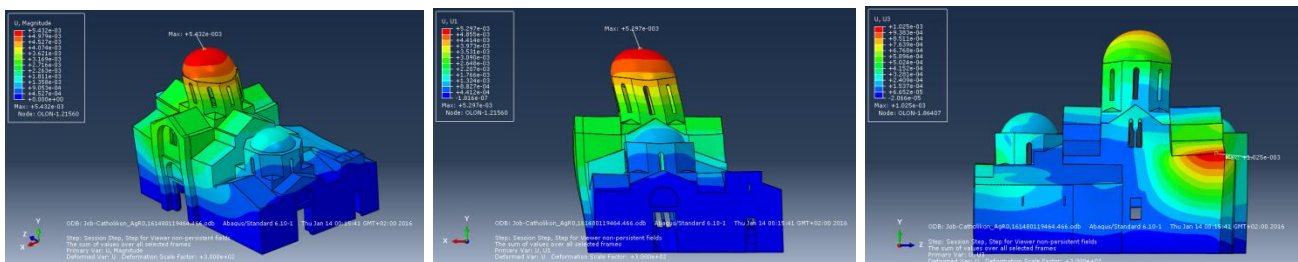
- Σε μια ανάλυση τοιχοποιίας με πεπερασμένα στοιχεία, ένα από τα πλέον αξιόπιστα αλλά και επαρκές για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του φορέα αποτέλεσμα είναι οι μετακινήσεις. Μια από τις χαρακτηριστικότερες μετακινήσεις είναι η σχετική μετακίνηση της κορυφής του τρούλου και για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία, αποτελεί ένα από τα επίκεντρα της εξέτασης των αποτελεσμάτων.
- Με την επιβολή της σεισμικής επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση x (B-N), ο Κυρίως Ναός αναπτύσσει μετακινήσεις κυρίως κατά την ίδια διεύθυνση, σύμφωνα και με τις 2 εναλλακτικές προσομοιώσεις, πράγμα που αναμένεται από το γεγονός που κατέδειξε η ιδιομορφική ανάλυση, ότι και για τα 2 εναλλακτικά προσομοιώματα που αφορούν τον Κυρίως Ναό (Κυρίως Ναός μεμονωμένος και ενιαίο συνεχές Καθολικό) οι 4 πρώτες

ιδιομορφές είναι μεταφορικές και κινητοποιούν συνολικά μεγάλο ποσοστό της μάζας του φορέα.

- Οι μετακινήσεις που αναπτύσσει το προσομοίωμα 2 είναι κατά τι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από το προσομοίωμα 1. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η πρώτη ιδιομορφή του Κυρίως Ναού, θεωρούμενου ανεξάρτητου από τις προσθήκες (προσομοίωμα 2), είναι μεταφορική κατά τη διεύθυνση x με ιδιοπερίοδο $T_1=0,151 \text{ sec} \approx T_A=0,15 \text{ sec}$ (έναρξη του πλατώ του φάσματος απόκρισης του Ευρωκώδικα 8 για έδαφος τύπου A) και κινητοποιεί περί το 70% της συνολικής μάζας του φορέα, ενώ η αντίστοιχη ιδιομορφή του προσομοιώματος 1 έχει χαμηλότερη ιδιοπερίοδο και κινητοποιεί λιγότερη μάζα (περί το 50%).
- Οι μετακινήσεις του προσομοιώματος 2 (κατά x) υπερέχουν έναντι των αντίστοιχων μετακινήσεων του προσομοιώματος 1, περίπου κατά 8%.



Εικόνα 7-6: Μετακινήσεις του Ναού για σεισμική επιτάχυνση κατά x σύμφωνα με το προσομοίωμα 2: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 5,8 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον τρούλο και είναι 5,75 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 1 mm.

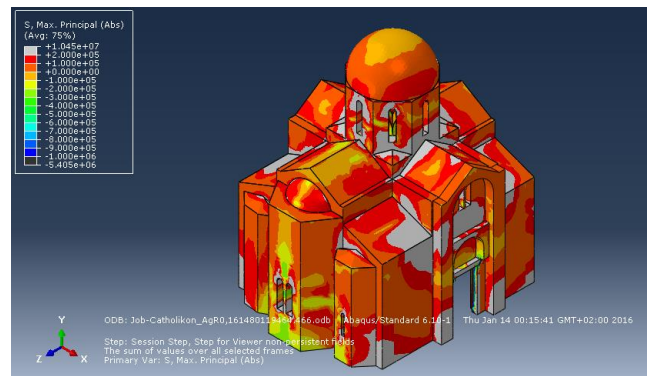
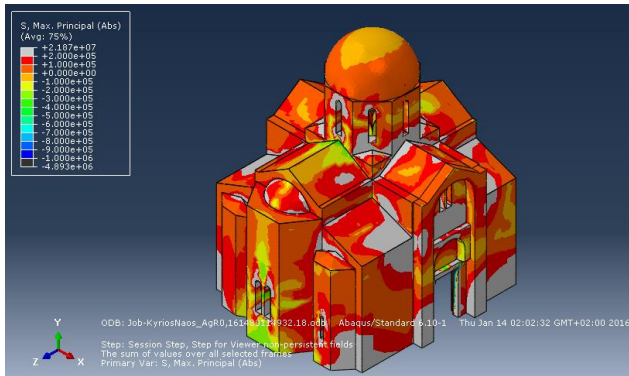
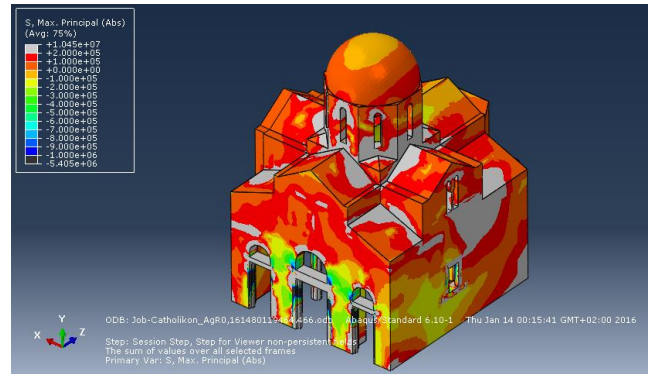
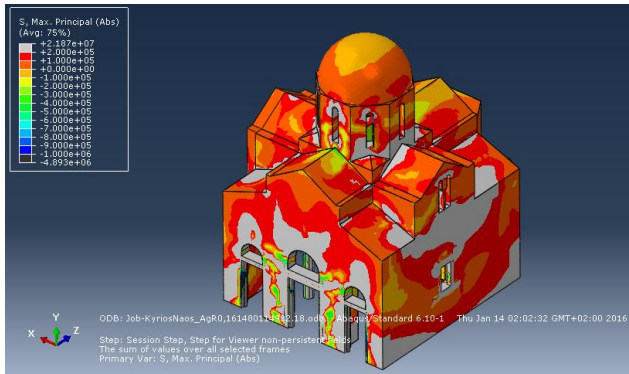


Εικόνα 7-7: Μετακινήσεις του Ναού για σεισμική επιτάχυνση κατά x σύμφωνα με το προσομοίωμα 1: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 5,43 mm, δηλαδή κατά τι κατώτερη αυτής που προκύπτει από το προσομοίωμα 2. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 5,3 mm, αντίστοιχα μικρότερη αυτής που προκύπτει από το προσομοίωμα 2. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z, με μέγιστη τιμή το 1 mm.

- Κατανομή κυρίων τάσεων:
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν χαρακτηρίζονται από εκτεταμένες υπερβάσεις τάσεως ιδίως στο προσομοίωμα 2.
- Οι υπερβάσεις τάσεως εντοπίζονται κατά κύριο λόγο κατά μήκος των εξωτερικών τοιχοποιιών, στη σύνδεση των ημικυλινδρικών καμαρών με τον τρούλο, ιδίως των

εγκάρσιων (βόρεια και νότια) καθώς και στη βάση του τρούλου και συγκεκριμένα στο βόρειο και νότιο τμήμα του.

- Η κυριότερη διαφοροποίηση ανάμεσα στα 2 προσομοιώματα είναι ότι στο "1", οι περιμετρικές τοιχοποιίες του δυτικού τμήματος είναι κατά πολύ πιο ανακουφισμένες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην υποστήριξή τους από την ιδιαίτερα δύσκαμπτη εξωτερική τοιχοποιία των προσθηκών.



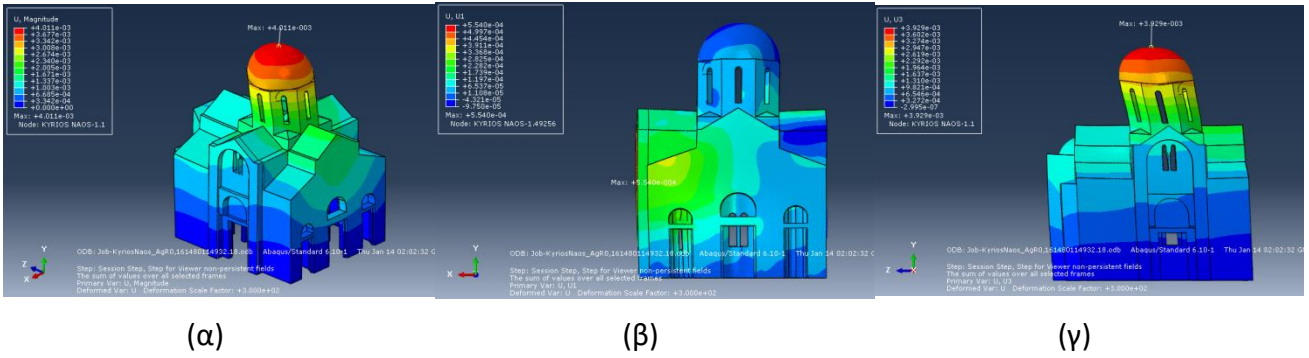
(α)

(β)

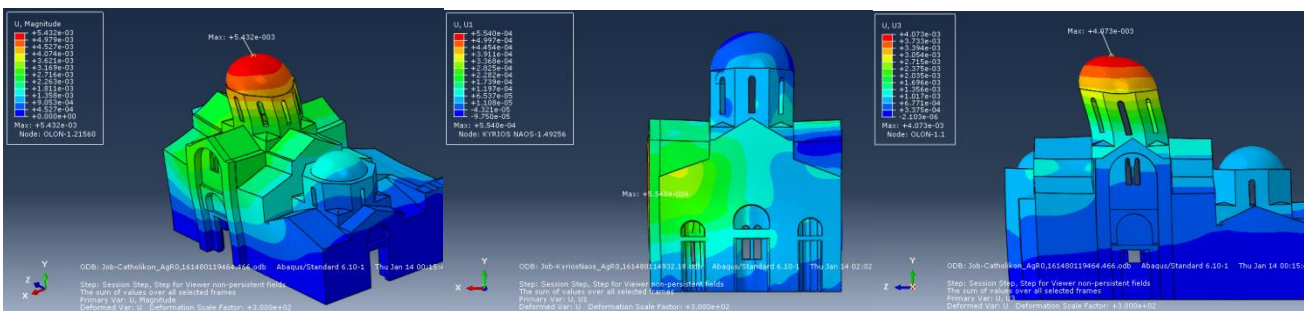
Εικόνα 7-8: Μέγιστος κύριος εφελκυσμός: (α) Προσομοίωμα 2: Παρατηρούνται εκτεταμένες υπερβάσεις τάσεως σε όλες τις όψεις με εξαίρεση την ανατολική, στις οροφές των γωνιαίων διαμερισμάτων, στη σύνδεση της βόρειας και νότιας ημικυλινδρικής καμάρας με τον τρούλο καθώς και στο βόρειο και νότιο τμήμα της βάσης του τρούλου. (β) Προσομοίωμα 1: Ποιοτικά ίδιες βλάβες με το προσομοίωμα 2 με εξαίρεση το δυτικό τμήμα που είναι εμφανώς πιο ανακουφισμένο.

Σεισμική επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση z (Ανατολή-Δύση)

- Οι μετακινήσεις αναπτύσσονται κυρίως κατά τη z διεύθυνση, γεγονός που οφείλεται στην κυριαρχία των μεταφορικών ιδιομορφών.
- Σε αντίθεση με παραπάνω που ο φορέας αναπτύσσει μεγαλύτερες μετακινήσεις κορυφής σύμφωνα με το προσομοίωμα 2, η άσκηση της σεισμικής επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση z οδηγεί σε μεγαλύτερες μετακινήσεις κορυφής του τρούλου στο προσομοίωμα 1 (περίπου 5% μεγαλύτερες).

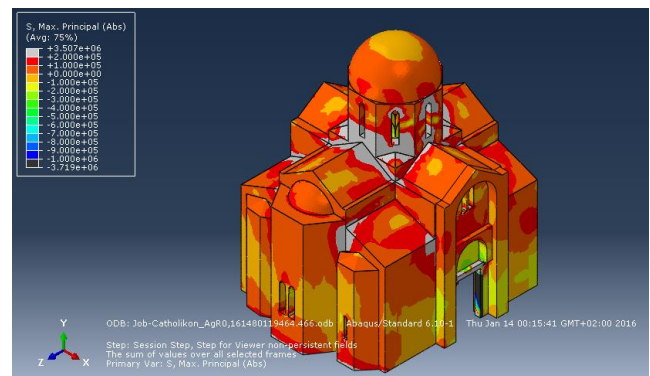
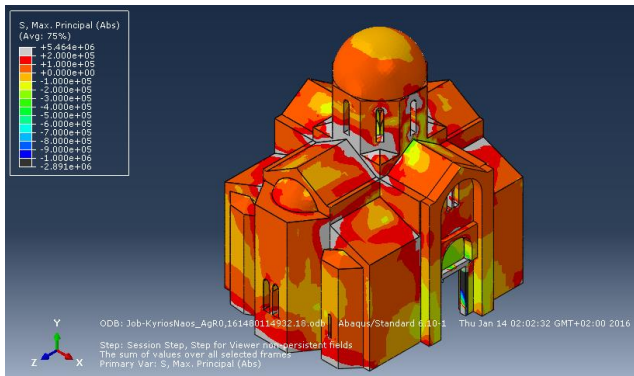
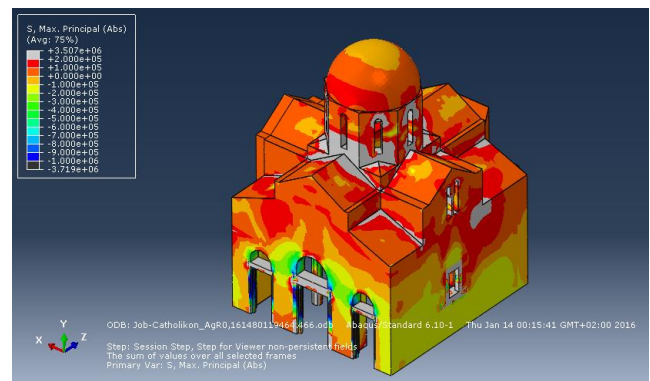
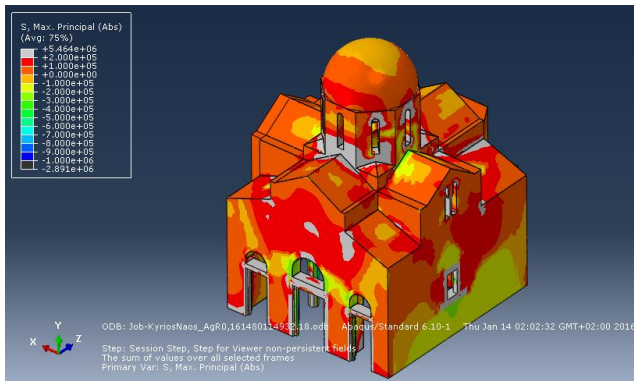


Εικόνα 7-9: Μετακινήσεις του Ναού για σεισμική επιτάχυνση κατά z σύμφωνα με το προσομοίωμα 2: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 4 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x με μέγιστη τιμή τα 0,55 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή αναπτύσσεται στον τρούλο και είναι 3,9 mm.



Εικόνα 7-10: Μετακινήσεις του Ναού για σεισμική επιτάχυνση κατά z σύμφωνα με το προσομοίωμα 1: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 4,2 mm, δηλαδή κατά 5% ανώτερη αυτής που προκύπτει από το προσομοίωμα 2. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x με μέγιστη τιμή τα 0,8 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z, με μέγιστη τιμή που εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 4,07 mm, δηλαδή κατά 4,35% μεγαλύτερη αυτής που προκύπτει από το προσομοίωμα 2.

- Κατανομή κυρίων τάσεων:
- Και τα δύο προσομοιώματα συντείνουν στο ότι η επιβολή της σεισμικής επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση z (Α-Δ) που είναι και η διαμήκης του Ναού, είναι σαφώς ευνοϊκότερη από την επιβολή της κατά την διεύθυνση x (εγκάρσια διεύθυνση).
- Οι σημαντικότερες υπερβάσεις τάσεως εντοπίζονται στο ανατολικό και δυτικό τμήμα της βάσης του τρούλου και στη σύνδεσή του με τις αντίστοιχες (ανατολική και δυτική) ημικυλινδρικές καμάρες.
- Εξακολουθεί να παρατηρείται η “ανακούφιση” στην δυτική όψη, στην περίπτωση του προσομοιώματος 1, όμως με λιγότερη ένταση. Ο μέγιστος κύριος εφελκυσμός στη δυτική όψη σύμφωνα με το προσομοίωμα 2, είναι μεν υψηλός αλλά υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας σε περιορισμένη έκταση.



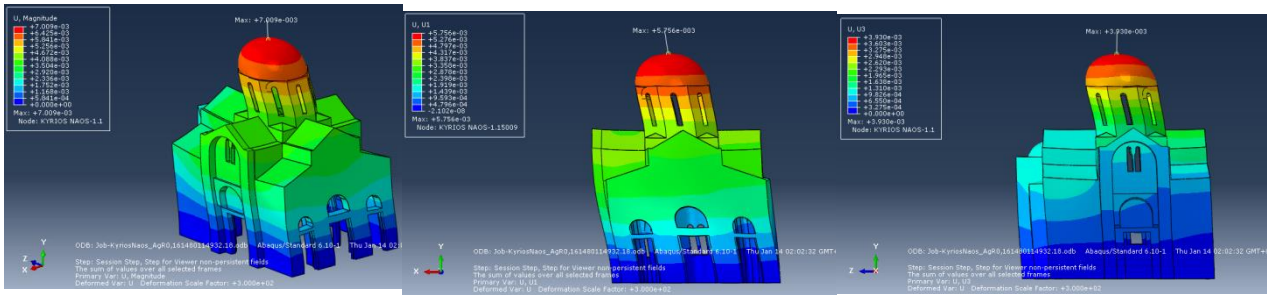
(α)

(β)

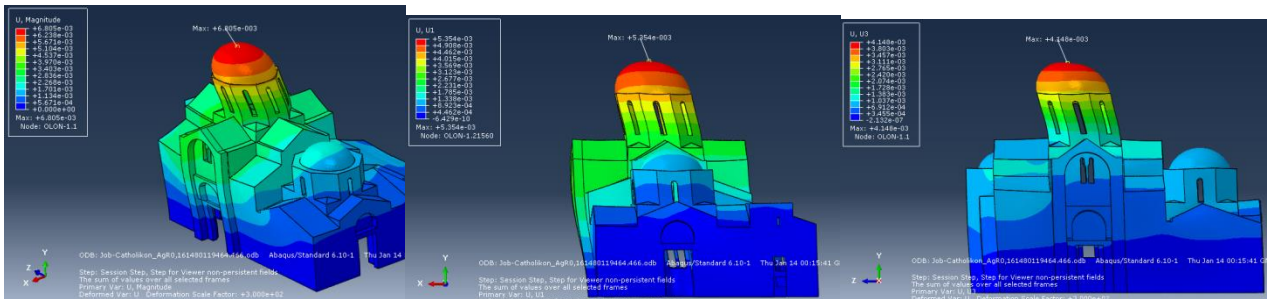
Εικόνα 7-11: (α) Προσομοίωμα 2: Οι κυριότερες υπερβάσεις τάσεως εντοπίζονται στο ανατολικό και δυτικό τμήμα της βάσης του τρούλου και στη σύνδεσή του με τις αντίστοιχες (ανατολική και δυτική) ημικυλινδρικές καμάρες. Έντονη καταπόνηση, αλλά σε ασφαλείς ως επί το πλείστον τιμές, παρατηρείται επίσης στη δυτική όψη, στην ανατολική όψη και στη σύνδεση των γωνιαίων διαμερισμάτων με το εγκάρσιο κλίτος. (β) Προσομοίωμα 1: Παρεμφερή αποτελέσματα με προσομοίωμα 2, με εξαίρεση την δυτική τοιχοποιία που εμφανίζεται πιο “ανακουφισμένη”. Λίγο πιο εκτεταμένες υπερβάσεις τάσεων στη βάση του τρούλου και στη σύνδεση με τις αντίστοιχες ημικυλινδρικές καμάρες, που με μια διεξοδικότερη εξέταση συνδέεται με τις κατά 4,3% μεγαλύτερες μετακινήσεις της κορυφής του τρούλου που δίνει το προσομοίωμα 1.

Σεισμική επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση x+z

- Αξιόλογες μετατοπίσεις και κατά τις δύο διευθύνσεις.
- Η χωρική επαλληλία ακολουθεί τον κανόνα του SRSS. Ως εκ τούτου, οι μέγιστες U_x και U_z πρακτικά ταυτίζονται με τις αντίστοιχες μέγιστες που προκύπτουν από εφαρμογή της σεισμικής επιτάχυνσης κατά την αντίστοιχη διεύθυνση, στο ίδιο προσομοίωμα.
- Έτσι λοιπόν, $U_x > U_z$ και για τα δυο προσομοιώματα.
- Το προσομοίωμα 1 έναντι του προσομοιώματος 2 δίνει μικρότερες U_x (-7,5%), μεγαλύτερες U_z (+5,6%) και μικρότερη συνολική (-2,9%).

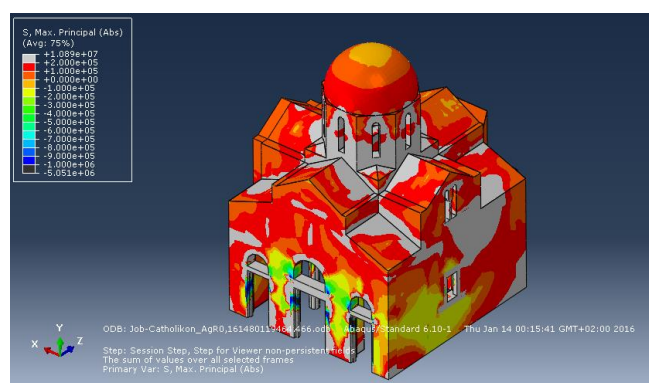
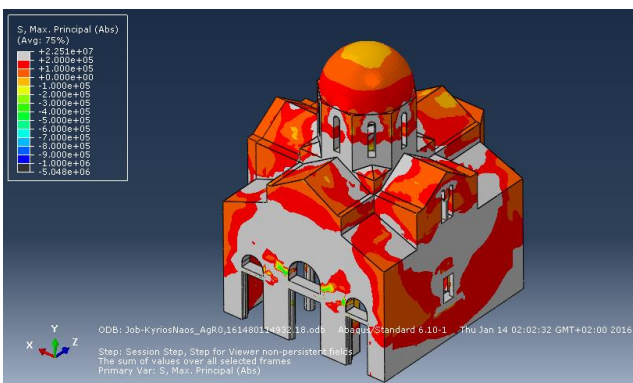


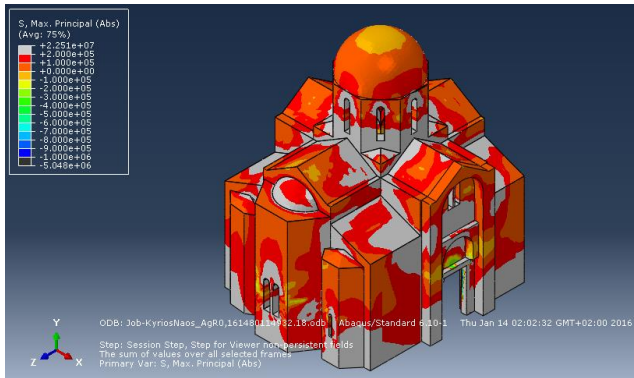
Εικόνα 7-12: Μετακινήσεις του Κυρίως Ναού για σεισμική επιτάχυνση κατά x+z σύμφωνα με το προσομοίωμα 2: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 7,0 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον τρούλο και είναι 5,75 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον τρούλο και είναι 3,93 mm.



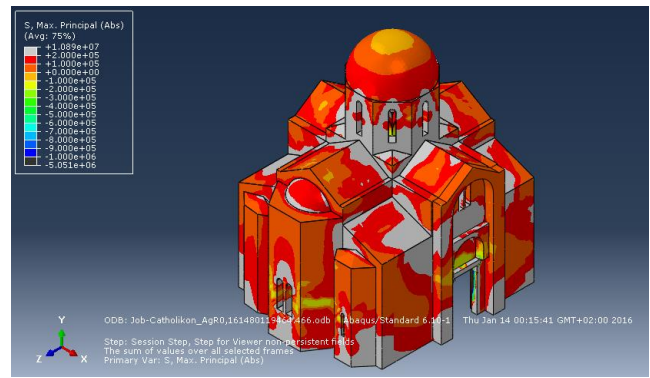
Εικόνα 7-13: Μετακινήσεις του Κυρίως Ναού για σεισμική επιτάχυνση κατά x+z σύμφωνα με το προσομοίωμα 1: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 6,8 mm, δηλαδή σε σχέση με αυτή που προκύπτει από το προσομοίωμα 2 είναι -2,9%. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 5,35 mm, σε σχέση με αυτή που προκύπτει από το προσομοίωμα 2 είναι -7,5%. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 4,15 mm και σε σχέση με αυτή που προκύπτει από το προσομοίωμα 2 είναι +5,6%.

- Κατανομή κυρίων τάσεων:
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα εκτεταμένες υπερβάσεις τάσεως.
- Η κυριότερη διαφοροποίηση ανάμεσα στα 2 προσομοιώματα είναι ότι στο "1", οι περιμετρικές τοιχοποιίες του δυτικού τμήματος είναι κατά πολύ πιο ανακουφισμένες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην υποστήριξή τους από την ιδιαίτερα δύσκαμπτη εξωτερική τοιχοποιία των προσθηκών.
- Προφανώς το δυσμενέστερο σενάριο.





(α)

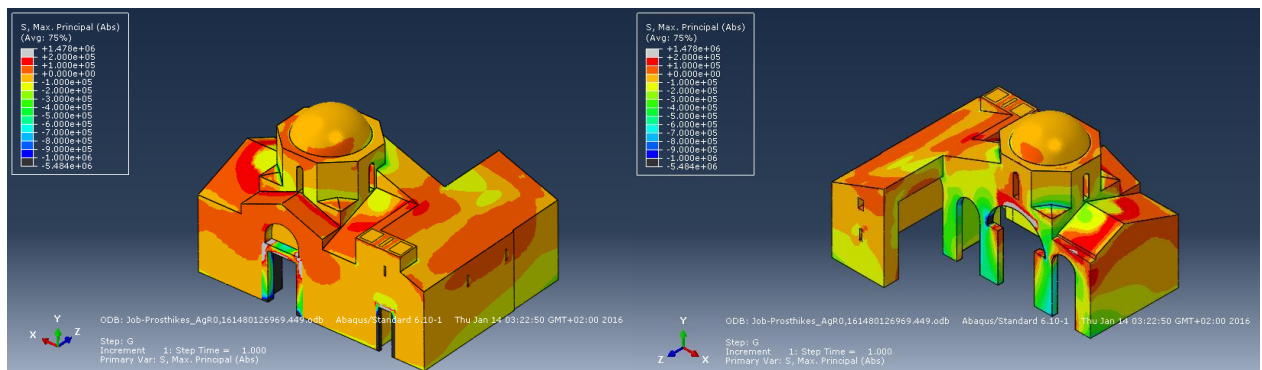


(β)

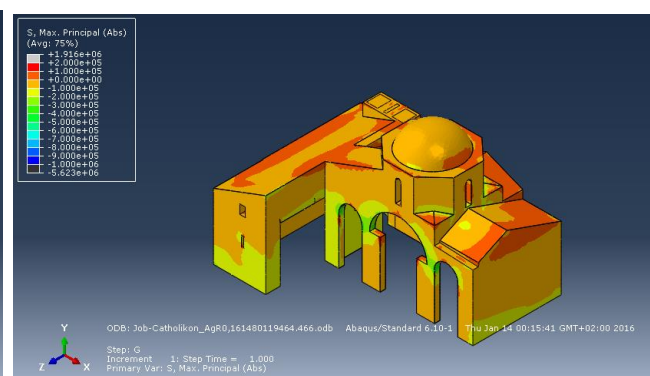
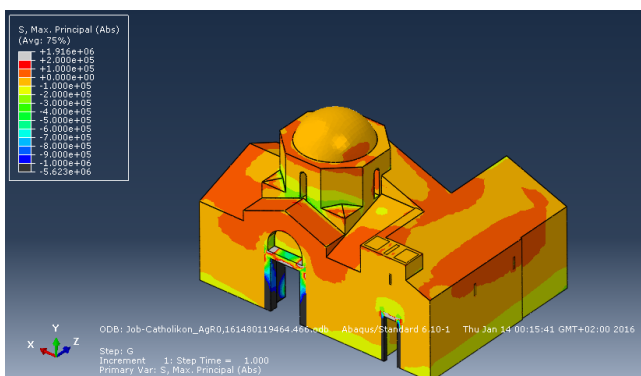
Εικόνα 7-14:

7.4 Αποτελέσματα για τις μεταβυζαντινές προσθήκες.

Ανάλυση για το ίδιο βάρος

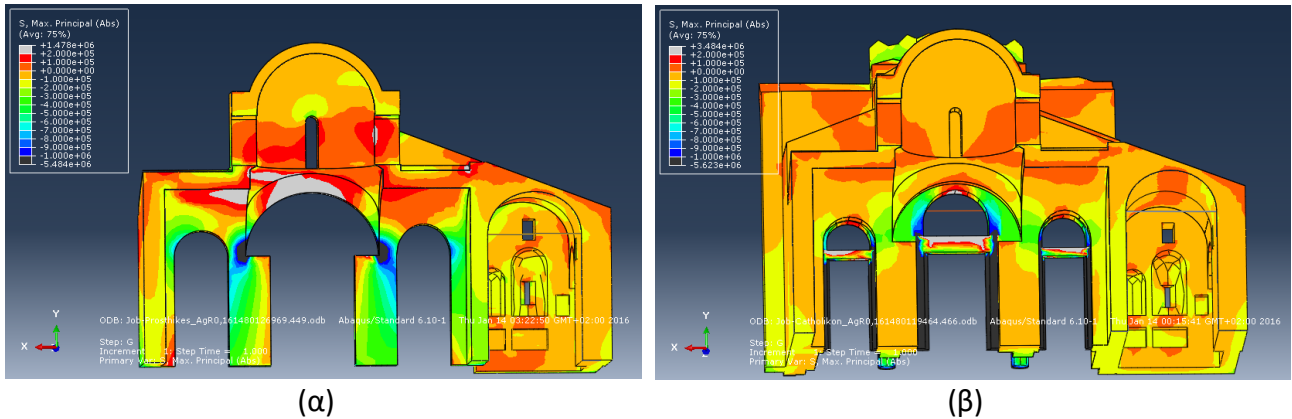


Εικόνα 7-15: Εικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στις προσθήκες, βάσει του “προσομοιώματος 2”. Υπέρβαση των αντοχών της τοιχοποιίας παρατηρείται στο ανατολικό τόξο που υποβαστάζει τον τρούλο.



Εικόνα 7-16: Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης, βάσει του “προσομοιώματος 1”. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν διαφέρουν αισθητά από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το “προσομοίωμα 2” ως προς την ένταση του ανατολικού τόξου που υποβαστάζει τον τρούλο και της οροφής του δεξιά τμήματος, η οποία εμφανίζεται αισθητά χαμηλότερη και σε

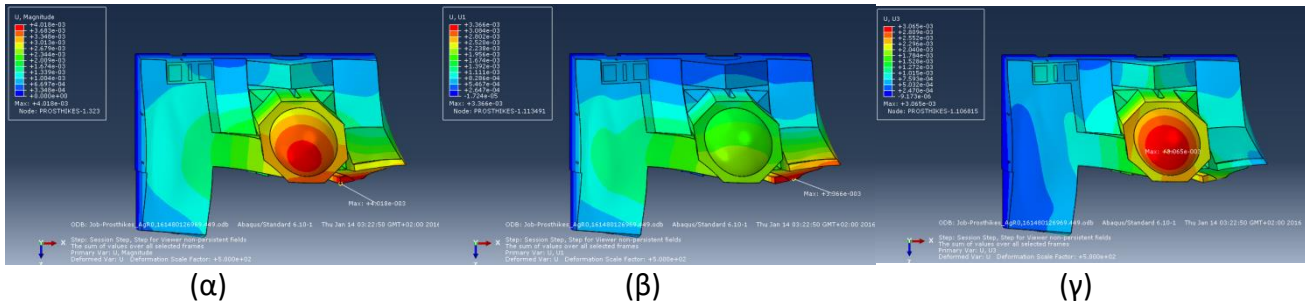
ανεκτά πλαίσια, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στα πλαίσια του “προσομοιώματος 1” ο Νάρθηκας υποστηρίζεται και από την δυτική πλευρά του Κυρίως Ναού.



Εικόνα 7-17: Κατανομή τάσεων για την ανατολική πλευρά του Νάρθηκα. (α) Σύμφωνα με το προσομοίωμα 2. Διακρίνεται υπέρβαση εφελκυστικών τάσεων στο ανατολικό τόξο και την νότια απόληξη της ημικυλινδρικής οροφής του βόρειου μέρους (κάτω από το τύμπανο του τρούλου). (β) Σύμφωνα με το προσομοίωμα 1. Ασφαλής κατανομή τάσεων. Γίνεται εμφανές ότι ο δυτικός τοίχος του Κυρίως Ναού στον οποίο ο Νάρθηκας είναι πακτωμένος (στα πλαίσια του προσομοιώματος 1), παραλαμβάνει αρκετό από το φορτίο της ογκώδους οροφής του Νάρθηκα.

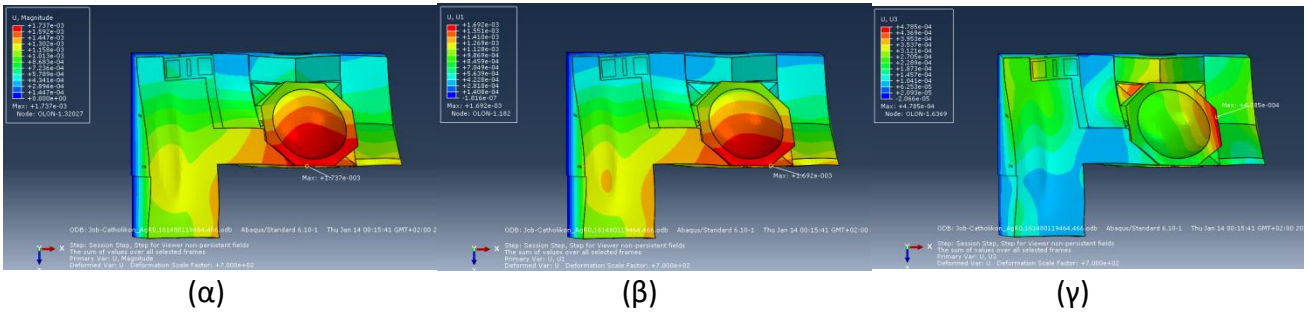
Σεισμική επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση x (Βορράς-Νότος)

- Οι μεταβυζαντινές προσθήκες σχεδιάστηκαν εξ αρχής ως τέτοιες και όχι ως αυτόνομο κτίριο. Η δυσανάλογα λυγροί ανατολικοί πεσσοί τους, σε συνδυασμό με το μεγάλο φορτίο του τρούλου και του υλικού πλήρωσης νότια αυτού, καθιστούν την μορφολογία του κτιρίου δυσμενή και την δυναμική του συμπεριφορά περίπλοκη, γεγονός που επισημάνθηκε και στην ιδιομορφική του ανάλυση.
- Η συμπεριφορά του διαφέρει άρδην στα 2 διαφορετικά προσομοιώματα. Το υψηλό στατικό και αδρανιακό φορτίο του τρούλου και του υλικού πλήρωσης στα νότιά του, στο μεν προσομοίωμα 1 τείνουν να υποστηριχθούν στον Κυρίως Ναό στον οποίο πακτώνονται, ενώ στο προσομοίωμα 2 προκαλούν μεγάλες τοπικές παραμορφώσεις.
- Το γεγονός αυτό αναδεικνύεται και στις μετακινήσεις της Ι.Α.Φ.Α.



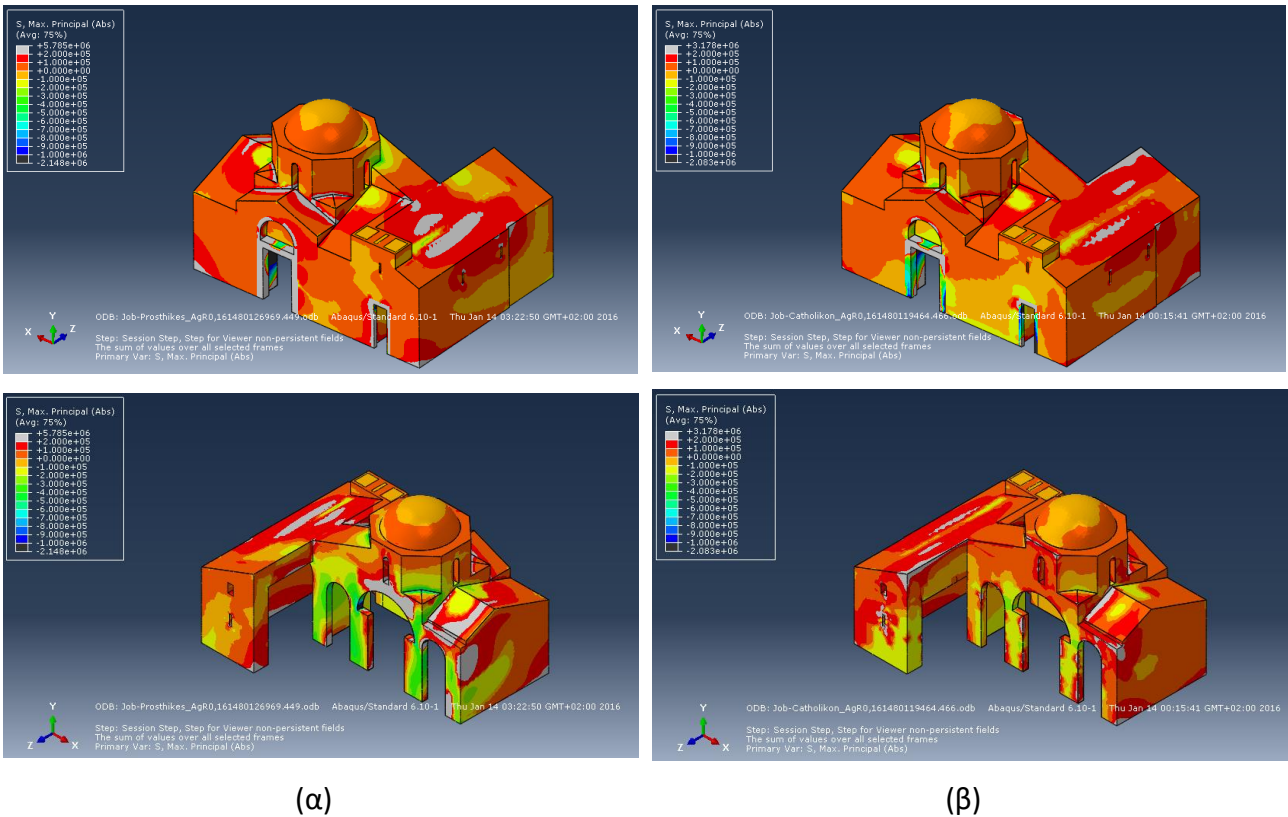
Εικόνα 7-18: Μετακινήσεις των μεταβυζαντινών προσθηκών για σεισμική επιτάχυνση κατά x σύμφωνα με το προσομοίωμα 2: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον βορειοανατολικό πεσσό και είναι 4 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη

τιμή της αναπτύσσεται στον ΒΑ πεσσο και είναι 3,35 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 3 mm και εντοπίζεται στον τρούλο.



Εικόνα 7-19: Μετακινήσεις των μεταβυζαντινών προσθηκών για σεισμική επιτάχυνση κατά x σύμφωνα με το προσομοίωμα 1: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 1,7 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον τρούλο και είναι 1,7 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 0,5 mm και εντοπίζεται στον τρούλο.

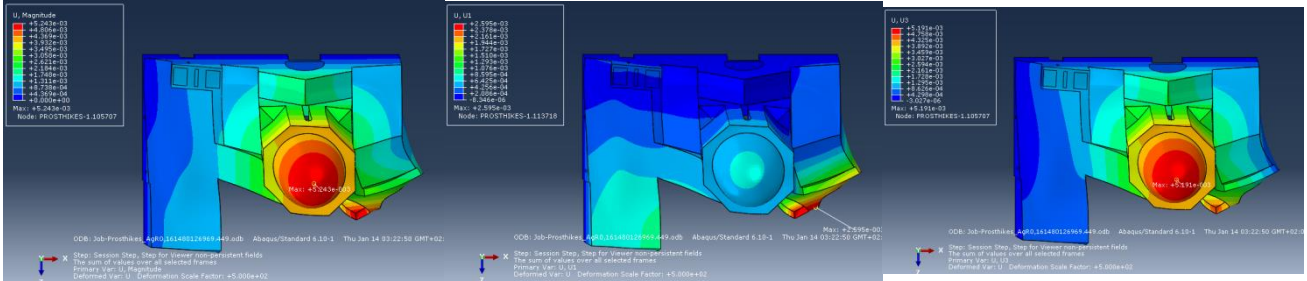
- Κατανομή κύριων τάσεων:
- Εμφανής η καλύτερη συμπεριφορά σύμφωνα με το προσομοίωμα 1.



Εικόνα 7-20: Μέγιστος κύριος εφελκυσμός: (α) Προσομοίωμα 2, (β) Προσομοίωμα 1. Εμφανής η καλύτερη συμπεριφορά του σύμφωνα με το προσομοίωμα 1.

Σεισμική επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση z (Ανατολή-Δύση)

- Μεγάλες (3-4 mm) και ακανόνιστες μετακινήσεις σύμφωνα με το προσομοίωμα 2
- Μετακινήσεις κυρίως κατά z της τάξης του 1 mm σύμφωνα με το προσομοίωμα 1.

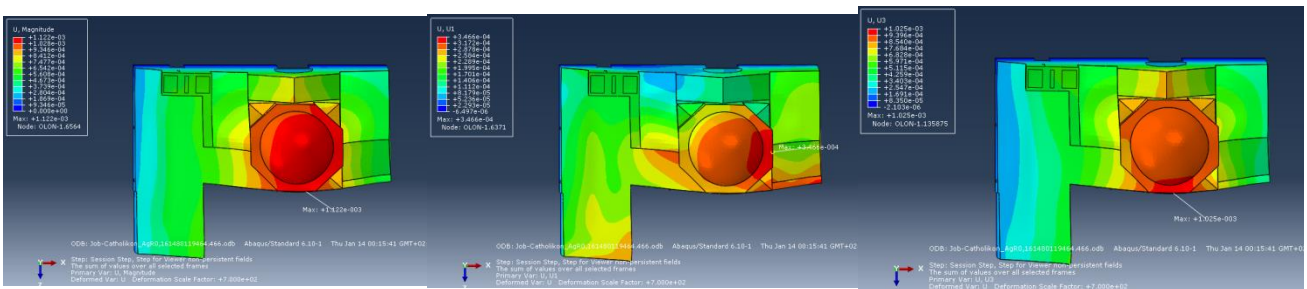


(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 7-21: Μετακινήσεις των μεταβυζαντινών προσθηκών για σεισμική επιτάχυνση κατά z σύμφωνα με το προσομοίωμα 2: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στην κορυφή του τρούλου και είναι 5,25 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον ΒΑ πεσσό και είναι 2,6 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 5,2 mm και εντοπίζεται στην κορυφή του τρούλου.



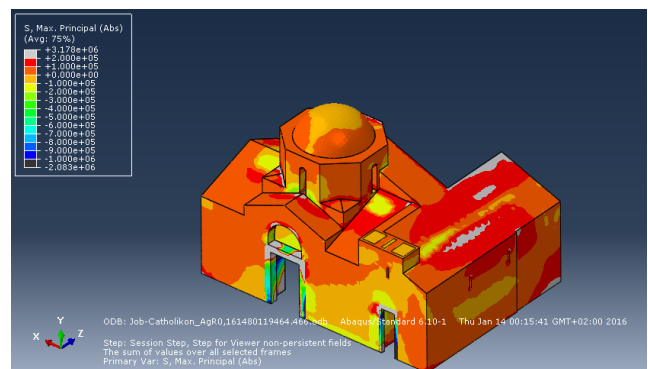
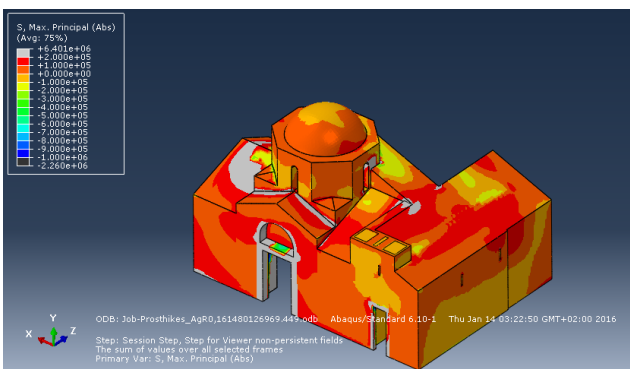
(α)

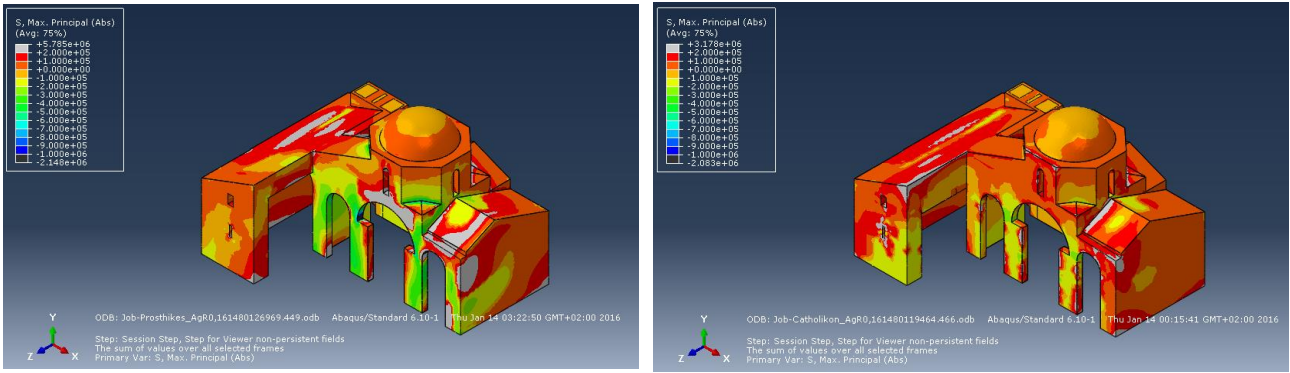
(β)

(γ)

Εικόνα 7-22: Μετακινήσεις των μεταβυζαντινών προσθηκών για σεισμική επιτάχυνση κατά z σύμφωνα με το προσομοίωμα 1: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 1,1 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον ΒΑ τρούλο και είναι 0,35 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 1,0 mm και εντοπίζεται στον τρούλο.

- Κατανομή κύριων τάσεων:
- Εμφανής η καλύτερη συμπεριφορά σύμφωνα με το προσομοίωμα 1.





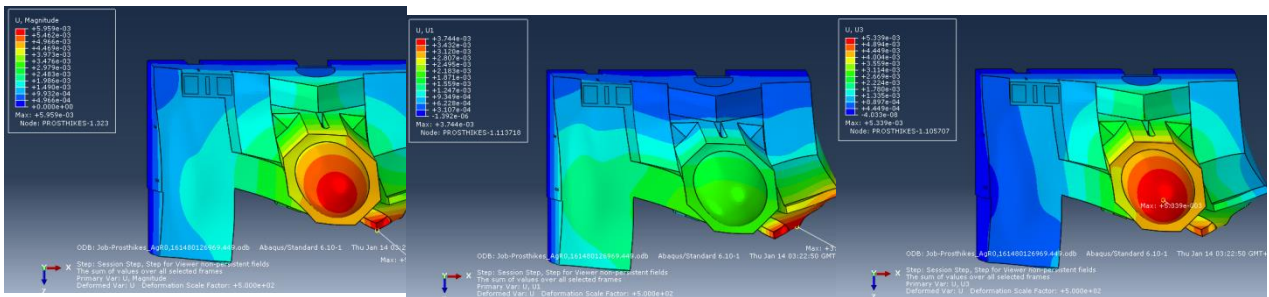
(α)

(β)

Εικόνα 7-23: Μέγιστος κύριος εφελκυσμός: (α) Προσομίωμα 2, (β) Προσομίωμα 1. Εμφανής η καλύτερη συμπεριφορά του σύμφωνα με το προσομίωμα 1.

Σεισμική επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση x+z

Μετακινήσεις

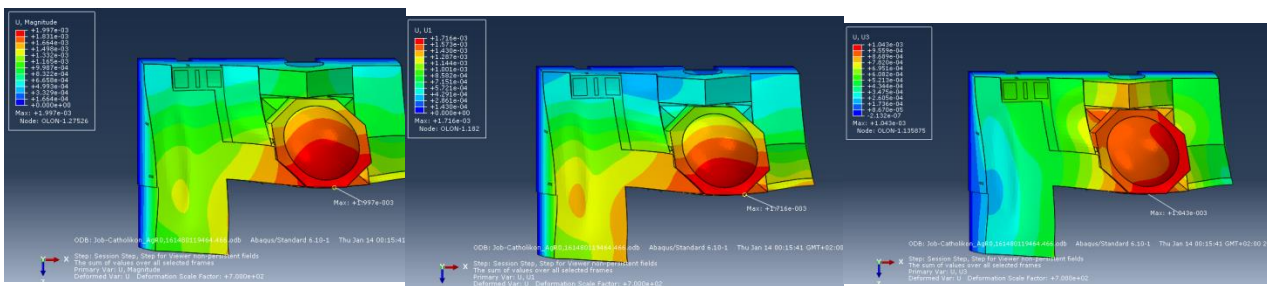


(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 7-24: Μετακινήσεις των μεταβυζαντινών προσθηκών για σεισμική επιτάχυνση κατά x+z σύμφωνα με το προσομίωμα 2: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στην κορυφή του τρούλου και είναι 6,00 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον ΒΑ πεσσό και είναι 3,7 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 5,30 mm και εντοπίζεται στην κορυφή του τρούλου.



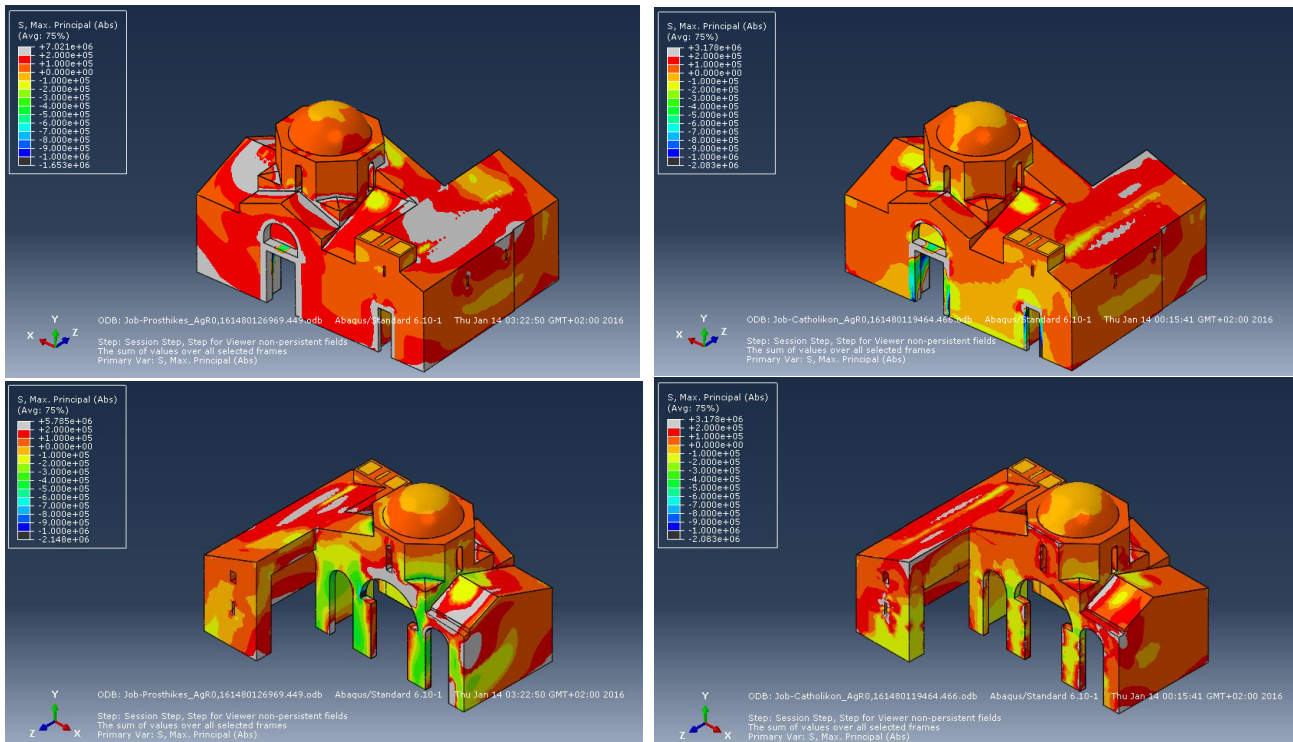
(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 7-25: Μετακινήσεις των μεταβυζαντινών προσθηκών για σεισμική επιτάχυνση κατά x+z σύμφωνα με το προσομίωμα 1: (α) Συνολικές μετακινήσεις. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον τρούλο και είναι 2,00 mm. (β) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση x. Η μέγιστη τιμή της αναπτύσσεται στον ΒΑ τρούλο και είναι 1,70 mm. (γ) Μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση z. Η μέγιστη τιμή της είναι 1,0 mm και εντοπίζεται στον τρούλο.

- Κατανομή κυρίων τάσεων:
- Πρόκειται για τον δυσμενέστερο σεισμικό συνδυασμό σύμφωνα και με τα 2 προσομοιώματα.
- Εμφανής η καλύτερη συμπεριφορά σύμφωνα με το προσομοίωμα 1.



Εικόνα 7-26: Μέγιστος κύριος εφελκυσμός: (α) Προσομοίωμα 2, (β) Προσομοίωμα 1. Εμφανής η καλύτερη συμπεριφορά του σύμφωνα με το προσομοίωμα 1. Εμφανίζεται η πλέον έντονη υπέρβαση τάσεων στην οροφή του παρεκκλησίου.

7.5 Συμπεράσματα

Διεξοδικότερη εξέταση της εντατικής κατάστασης

Μέχρι στιγμής, η εφαρμογή της Ι.Α.Φ.Α. στις 2 εναλλακτικές γραμμικές προσομοιώσεις του μνημείου (“προσομοίωμα 1”, “προσομοίωμα 2”) έχει καταδείξει ότι:

- Για τον Κυρίως Ναό τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο εναλλακτικές προσομοιώσεις είναι όμοια, με κυριότερη εξαίρεση το γεγονός ότι το προσομοίωμα 1 εμφανίζει την δυτική όψη και το δυτικό ήμισυ της νότιας όψης εμφανώς ανακουφισμένα.
- Αντιθέτως για τις μεταβυζαντινές προσθήκες τα δυο διαφορετικά προσομοιώματα δίνουν κατά πολύ διαφορετικά αποτελέσματα.
- Και τα δυο προσομοιώματα συντείνουν στο ότι η επιβολή της σεισμικής επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση z (Α-Δ) είναι σαφώς ευνοϊκότερη από την επιβολή της κατά τη διεύθυνση x για τον Κυρίως Ναό.

- Ο σεισμικός συνδυασμός $x+z$ είναι δυσμενέστερος και για τα 2 τμήματα του Καθολικού.

Στη φάση αυτή κρίνεται σκόπιμη μια διεξοδικότερη εξέταση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου, όπως αυτή προκύπτει από τα αποτελέσματα της Ι.Α.Φ.Α.. Για τις ανάγκες αυτού του σκοπού επιλέγεται να εξεταστεί:

- Α) Ο Κυρίως Ναός μέσω του προσομοιώματος 2 (στο οποίο αποτελεί μεμονωμένο ανεξάρτητο σώμα) για τον σεισμικό συνδυασμό $x+z$, καθώς, όπως σχολιάστηκε πάρα πάνω, έτσι προκύπτουν γι' αυτόν τα δυσμενέστερα αποτελέσματα, και επί πλέον κρίνεται ως ο πιο αντιπροσωπευτικός και ο πιο πλήρης. Η εξέταση γίνεται με την βοήθεια δύο χαρακτηριστικών τομών κατά μήκος των δύο κύριων κλιτών, καθώς αυτές οι τομές διαπερνούν τις πλέον κρίσιμες περιοχές, όπως εντοπίζονται πάρα πάνω.
- Β) Οι μεταβυζαντινές προσθήκες μέσω τομής που αναδεικνύει την σύνδεσή τους με τον Κυρίως Ναό για τον σεισμικό συνδυασμό $x+z$.

Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης στον φορέα εισάγεται τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο οποίο:

- Ο άξονας 1 είναι παράλληλος στους οριζόντιους αρμούς.
- Ο άξονας 2 είναι κάθετος στους οριζόντιους αρμούς.
- Ο άξονας 3 είναι κάθετος στο πάχος της τοιχοποιίας με φορά προς τα έξω.

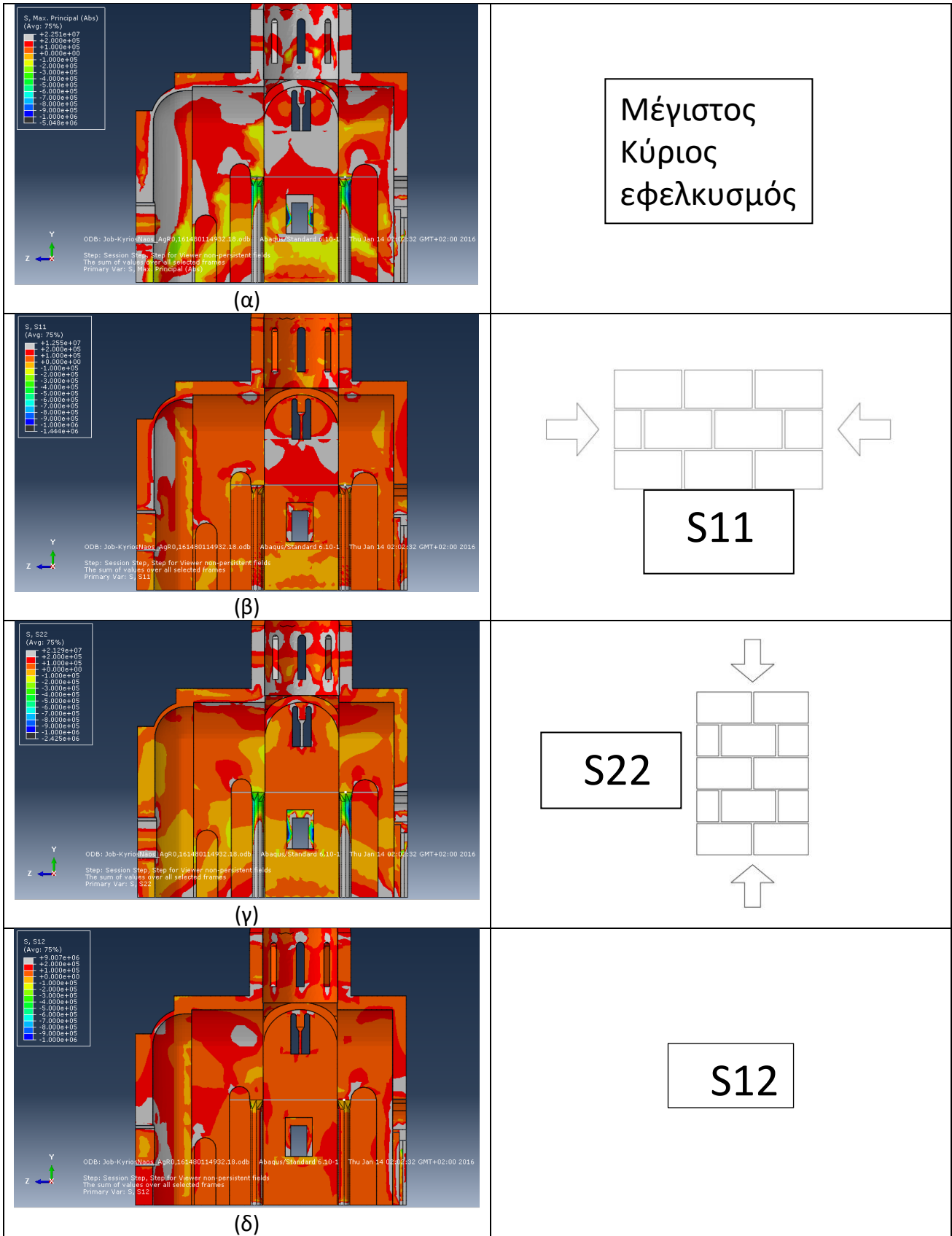
Το παραπάνω αξιοποιείται κατάλληλα για την ανάδειξη της λειτουργίας της τοιχοποιίας, της οποίας άλλωστε η ένταση προσεγγίζει λίγο-πολύ την επίπεδη εντατική κατάσταση.

Κυρίως Ναός

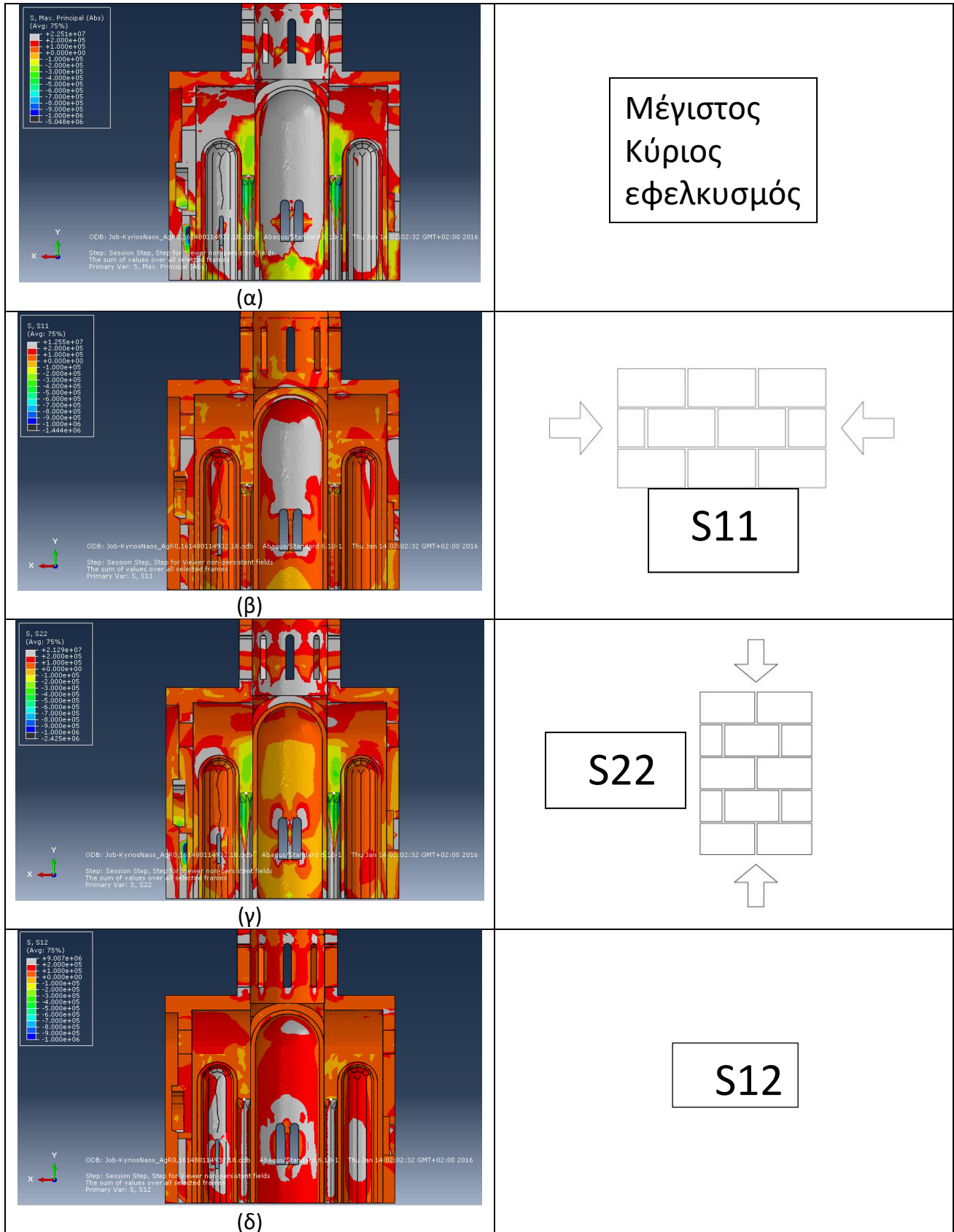
Η εξέταση των τάσεων S22 κατά μήκος των τομών δείχνει ότι οι πεσσοί του τυμπάνου του τρούλου που σχηματίζονται μεταξύ των παραθύρων, υπόκεινται σε κάμψη η οποία αποτελεί και το κύριο αίτιο των υπερβάσεων της εφελκυστικής αντοχής στον τρούλο. Επιπλέον, η ιδιαίτερα έντονη παρουσία τους στους ολόσωμους μαρμάρινους κίονες, αναδεικνύει τον κυρίαρχο ρόλο που διαδραματίζουν στην παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων που προκύπτουν από την κάμψη του τρούλου ή από άλλα αίτια. Στις ίδιες κατακόρυφες δυνάμεις αποδίδονται και οι υψηλές S22 στην εσωτερική παριά των ημικυλινδρικών καμαρών, ενώ οι εφελκυστικές, ενίοτε πάνω από το όριο S22 που παρατηρούνται στη βάση κάποιων πεσσών, καταδεικνύουν τη δράση ισχυρών ροπών ανατροπής.

Στη συνέχεια, οι υψηλές S11 οι οποίες εμφανίζονται στη σύνδεση του τρούλου με τις ημικυλινδρικές καμάρες, υποδεικνύουν την μεταβίβαση των τεμνουσών του τρούλου ως εφελκυσμό κατά μήκος των ημικυλινδρικών καμαρών. Σημειωτέον είναι ότι οι υψηλές τιμές της ενδοεπίπεδης διάτμησης S12, στις εσωτερικές ίνες των πεσσών του τυμπάνου του τρούλου (σε συνδυασμό με την κατανομή των S22), επιβεβαιώνουν την υπόθεση της κάμψης τους (που είναι επιπλέον εμφανής στις απεικονίσεις του παραμορφωμένου φορέα). Επίσης η έντονη ύπαρξή τους τόσο στους εσωτερικούς πεσσούς, όσο και στην περιμετρική τοιχοποιία, δείχνει ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς των οριζόντιων αδρανειακών δυνάμεων είναι η εντός επιπέδου διάτμηση, γεγονός που έρχεται σε αρμονία με την διαπίστωση ισχυρών ροπών ανατροπής που προηγήθηκε.

Τέλος οι υψηλές και αυξανόμενες προς τα έξω τιμές της S11, που εντοπίζονται στα τύμπανα της βόρειας και της νότιας κεραίας (εγκάρσια τομή) καθώς και στο τύμπανο της δυτικής κεραίας (διαμήκης τομή), υποδηλώνουν την εκτός επιπέδου κάμψη των παραπάνω τοιχοποιιών.

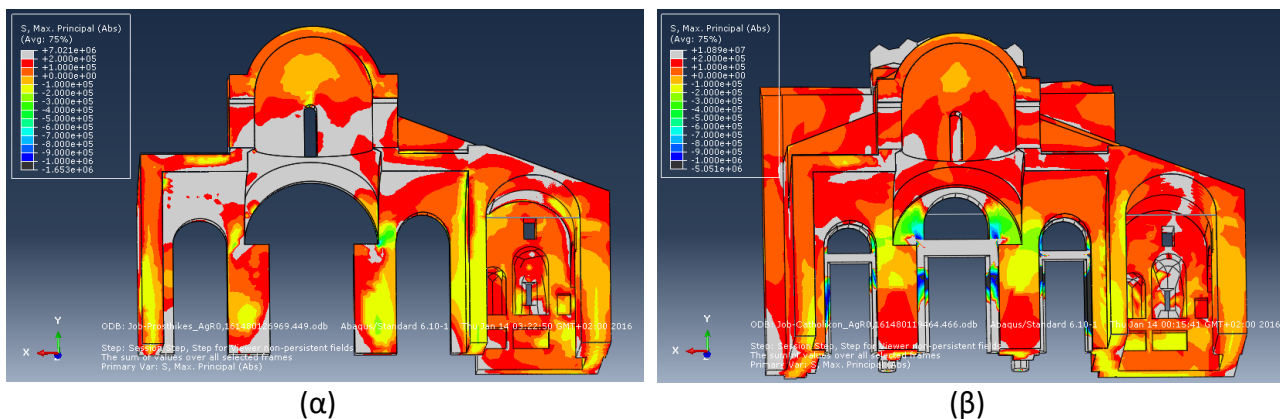


Εικόνα 7-27: (α) Μέγιστη κύρια εφελκυστική τάση, (β) Ορθή τάση παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς, (γ) Ορθή τάση κάθετη στους οριζόντιους αρμούς και (δ) Διάτμηση παράλληλη με τους αρμούς της τοιχοποιίας



Εικόνα 7-28: (α) Μέγιστη κύρια εφελκυστική τάση, (β) Ορθή τάση παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς, (γ) Ορθή τάση κάθετη στους οριζόντιους αρμούς και (δ) Διάτμηση παράλληλη με τους αρμούς της τοιχοποιίας

Προσθήκες



Εικόνα 7-29: Κατανομή τάσεων για την ανατολική πλευρά του Νάρθηκα. (α) Σύμφωνα με το προσομοίωμα 2: Διακρίνεται εκτεταμένη υπέρβαση εφελκυστικών τάσεων. (β) Σύμφωνα με το προσομοίωμα 1: Ασφαλέστερη κατανομή τάσεων με περιορισμένες περιοχές αστοχίας. Γίνεται εμφανές ότι ο δυτικός τοίχος του Κυρίως Ναού στον οποίο ο Νάρθηκας είναι πακτωμένος (στα πλαίσια του προσομοιώματος 1), παραλαμβάνει αρκετό από το φορτίο της ογκώδους οροφής του Νάρθηκα.

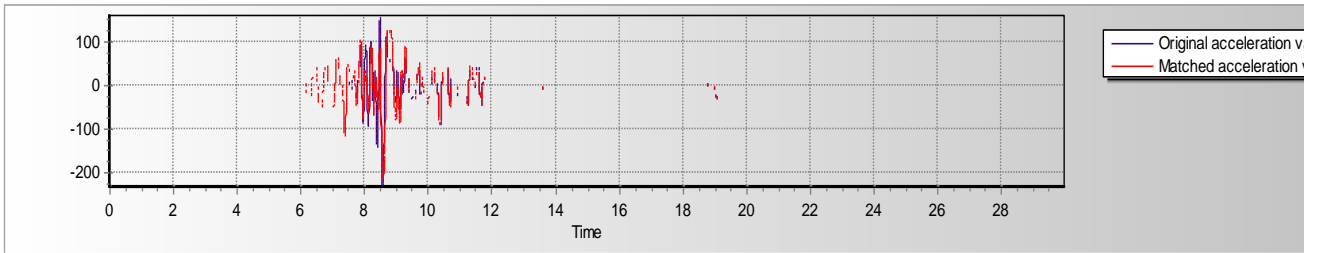
8 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ

8.1 Διαδικασία της ανάλυσης

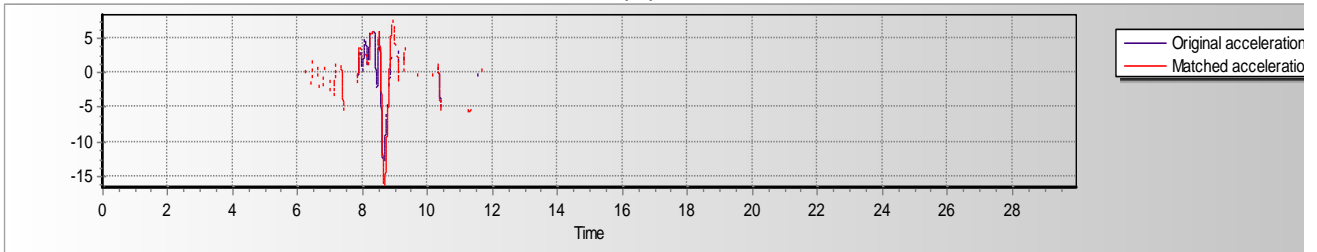
Μετά την ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης, ακολουθεί στα ίδια προσομοιώματα η διενέργεια ελαστικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Οι αναλύσεις χρονοϊστορίας γίνονται με άμεση εν χρόνω ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης μέσω του υποπρογράμματος **Abaqus Explicit**. Η επιλογή αυτή συνεπάγεται αυξημένο υπολογιστικό κόστος, όμως προτιμάται έναντι της γρηγορότερης μεθόδου της ιδιομορφικής επαλληλίας για λόγους σύγκρισης. Όπως έχει προαναφερθεί (υποκεφάλαια 3.4 και 4.1), σε κτίρια από τοιχοποιία και δή χωρίς διαφράγματα, για να ληφθεί υπόψιν ένα επαρκές ποσοστό της συνολικής ταλαντούμενης μάζας είναι απαραίτητη η συνεκτίμηση της συμβολής πολλών ιδιομορφών, που σε κάποιες περιπτώσεις δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής.

Τα χρησιμοποιούμενα επιταχυνσιομετρήματα

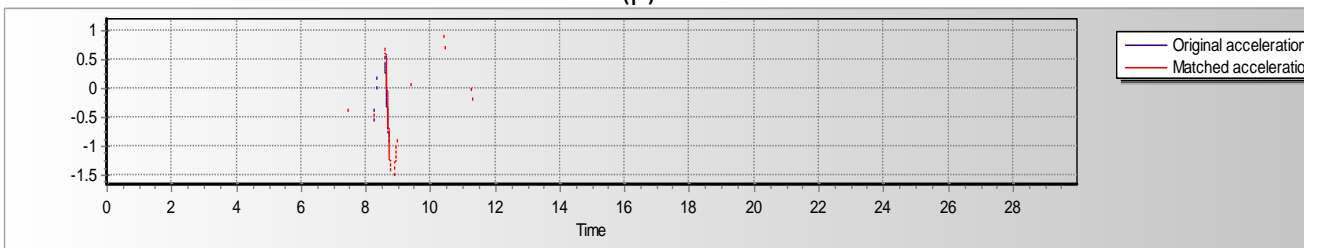
Για τις ανάγκες των αναλύσεων γίνεται η χρήση 3 επιταχυνσιογραφημάτων που προέκυψαν από καταγραφές του σεισμού της Πάρνηθας (Σεπτέμβριος 1999): δυο από τα Σεπόλια (SPLBL και SPLBT) και μία από το Σύνταγμα (SGMAT). Οι αρχικές καταγραφές κλιμακώνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8, όπως αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο (υποκεφάλαιο 3.4).



(α)

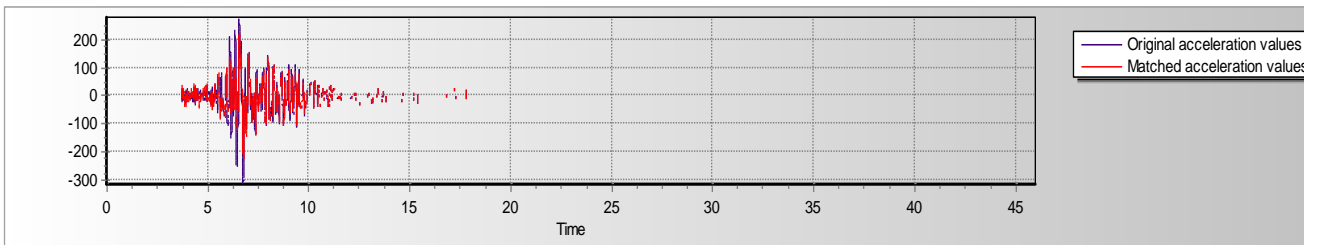


(β)

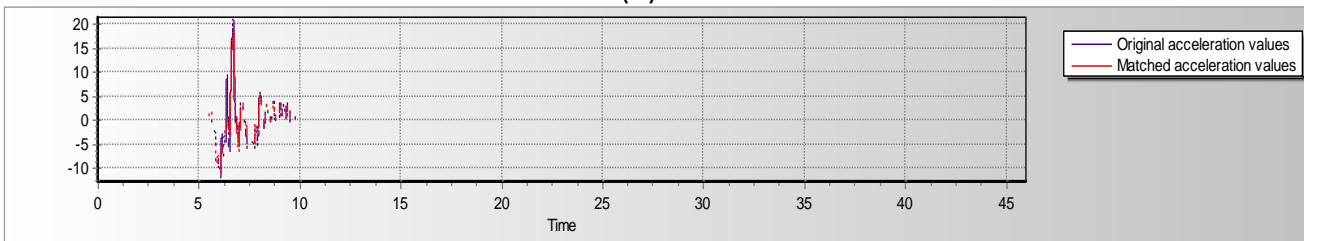


(γ)

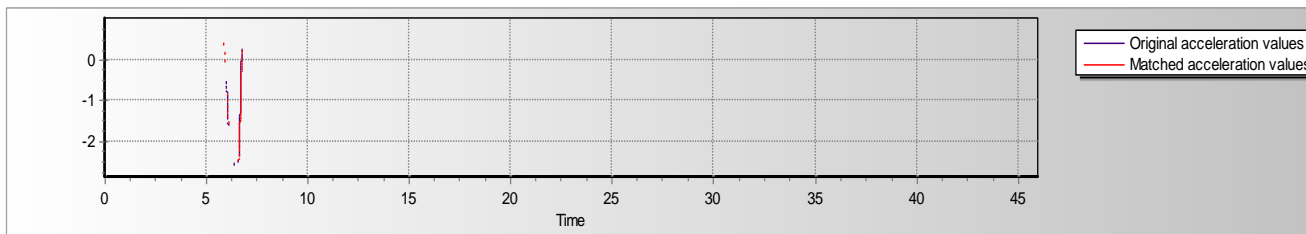
Εικόνα 8-1: Καταγραφή σεισμού Πάρνηθας 1999 στο Σύνταγμα. Με μπλέ χρωματίζεται η αρχική καταγραφή ενώ με κόκκινο η κλιμακωμένη. (α) χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων. (β) χρονοϊστορία εδαφικών ταχυτήτων. (γ) χρονοϊστορία εδαφικής μετατόπισης.



(α)

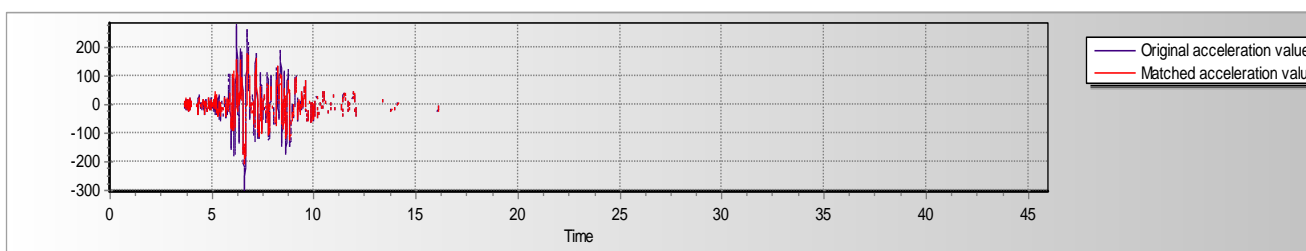


(β)

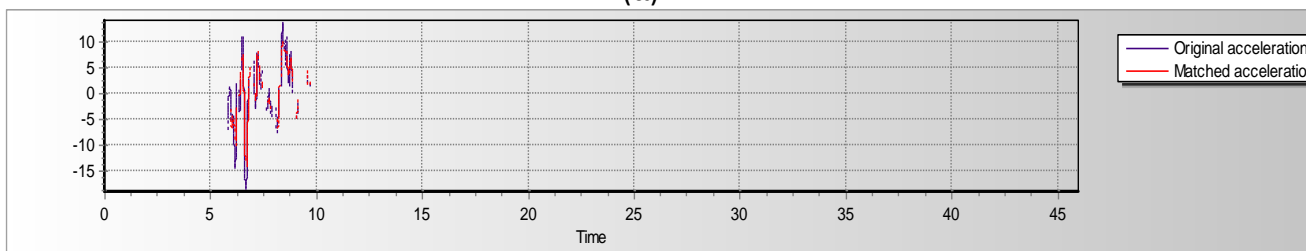


(γ)

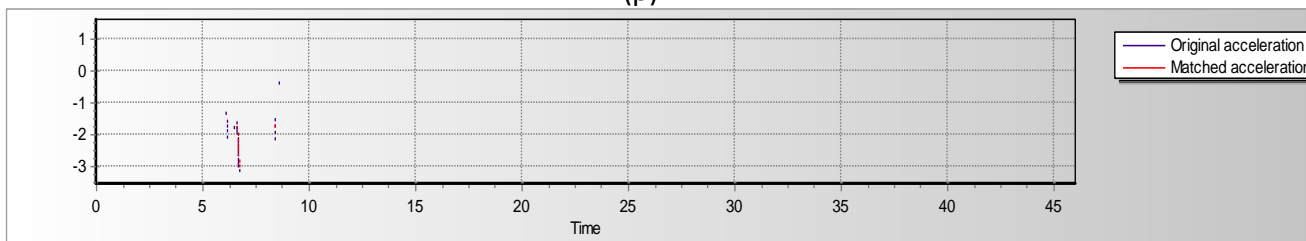
Εικόνα 8-2: Καταγραφή σεισμού Πάρνηθας 1999 στα Σεπόλια (SPLBL). Με μπλέ χρωματίζεται η αρχική καταγραφή ενώ με κόκκινο η κλιμακωμένη. (α) χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων. (β) χρονοϊστορία εδαφικών ταχυτήτων. (γ) χρονοϊστορία εδαφικής μετατόπισης.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 8-3: Καταγραφή σεισμού Πάρνηθας 1999 στα Σεπόλια (SPLBT). Με μπλέ χρωματίζεται η αρχική καταγραφή ενώ με κόκκινο η κλιμακωμένη. (α) χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων. (β) χρονοϊστορία εδαφικών ταχυτήτων. (γ) χρονοϊστορία εδαφικής μετατόπισης.

Στα προσομοιώματα στο περιβάλλον του Abaqus οι χρονοϊστορίες εισάγονται ως χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των κόμβων της βάσης του δομήματος. Οι τρεις αυτές καταγραφές εφαρμόζονται σε κάθε προσομοίωμα (Καθολικόν, Κυρίως Ναός και προσθήκες), μια φορά για την κάθε διεύθυνση και στη συνέχεια εφαρμόζονται οι δύο καταγραφές από τα Σεπόλια, μια στην κάθε διεύθυνση ώστε να αποδοθεί η διέγερση και κατά τις δύο διευθύνσεις.

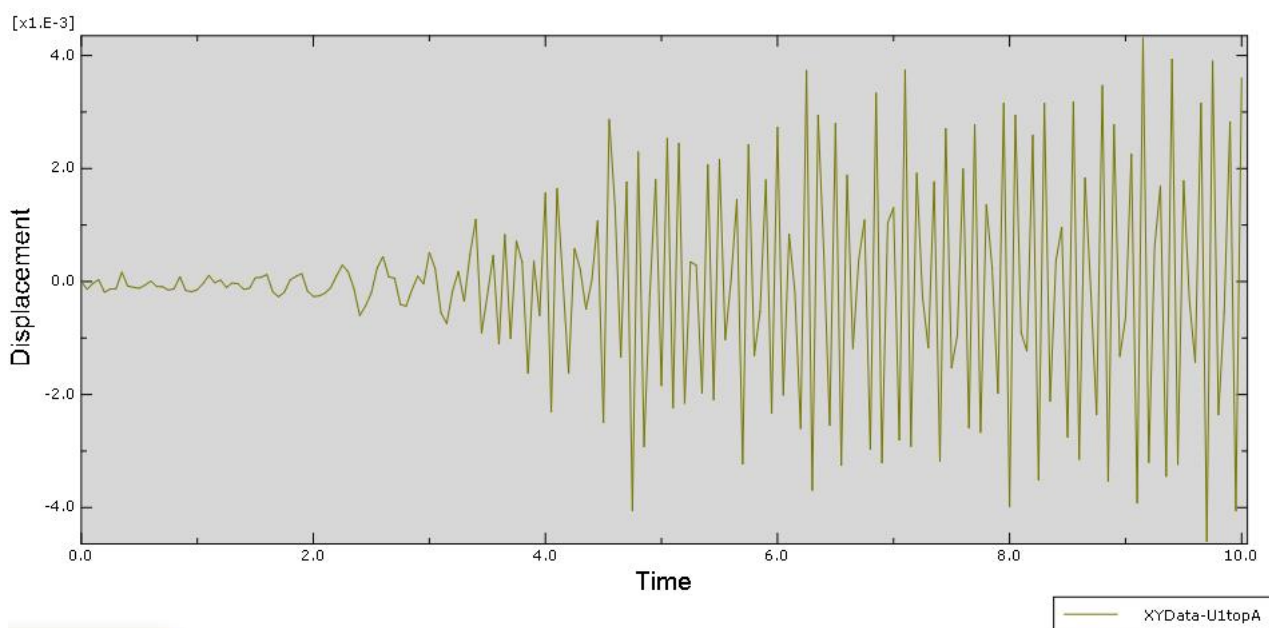
Όπως είναι φυσικό σε μια πολλαπλή συγκριτική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα είναι μια πληθώρα δεδομένων τα οποία θα πρέπει να αποτιμηθούν και να παρουσιαστούν με έναν περιεκτικό τρόπο έτσι ώστε να αναδειχθεί καλύτερα το νόημά τους. Στο

πνεύμα αυτό, παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που κρίνονται αντιπροσωπευτικά της συνολικής εικόνας.

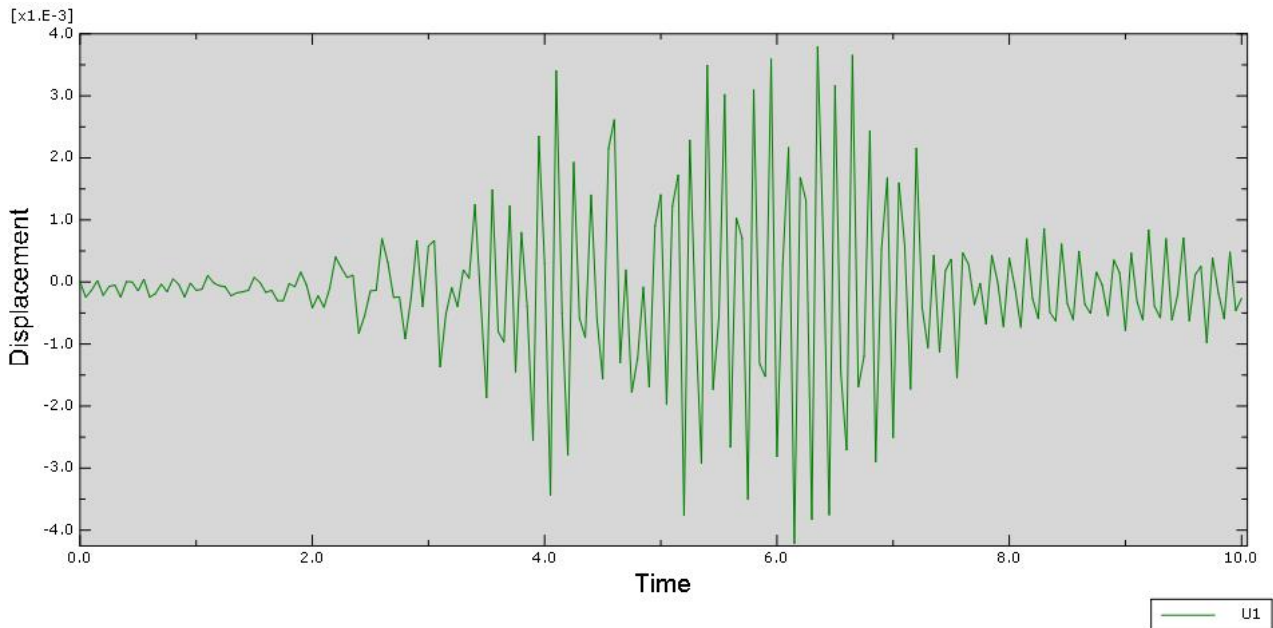
8.2 Αποτελέσματα για τον Κυρίως Ναό

Σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση x (Βορράς-Νότος)

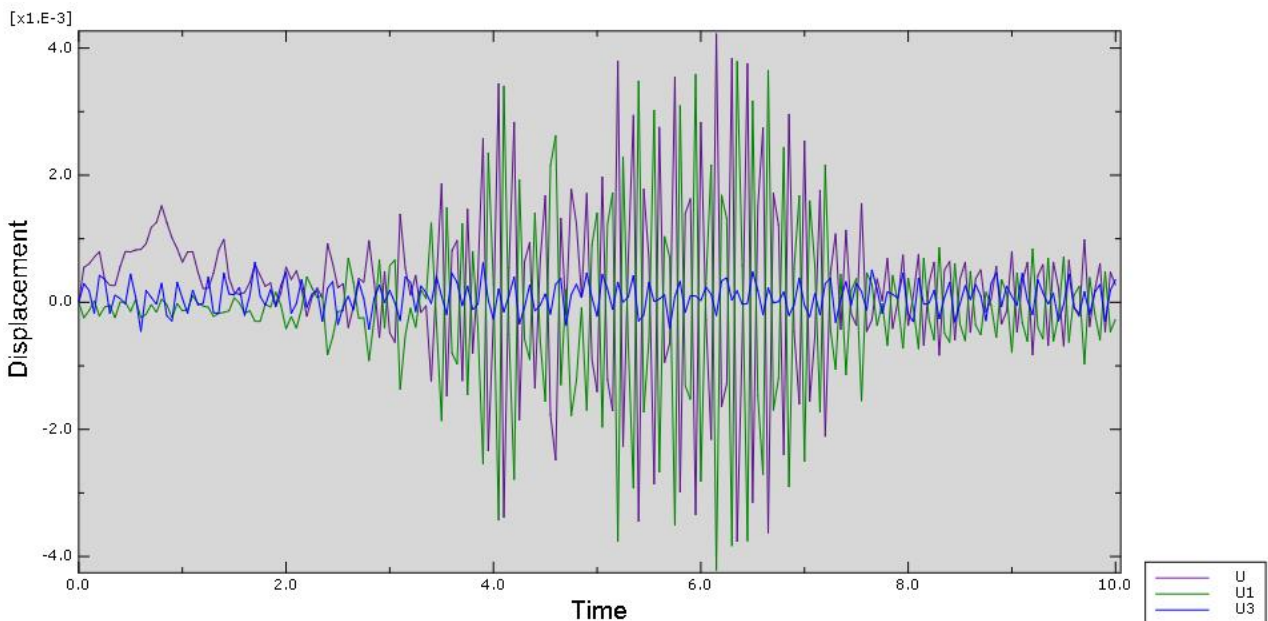
- Μετακινήσεις



Εικόνα 8-4: Μετακίνηση της κορυφής του τρούλου κατά τη διεύθυνση x σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Η μέγιστη μετακίνηση κυμαίνεται γύρω στα 4,4 mm και εμφανίζεται στο τέλος της φόρτισης.



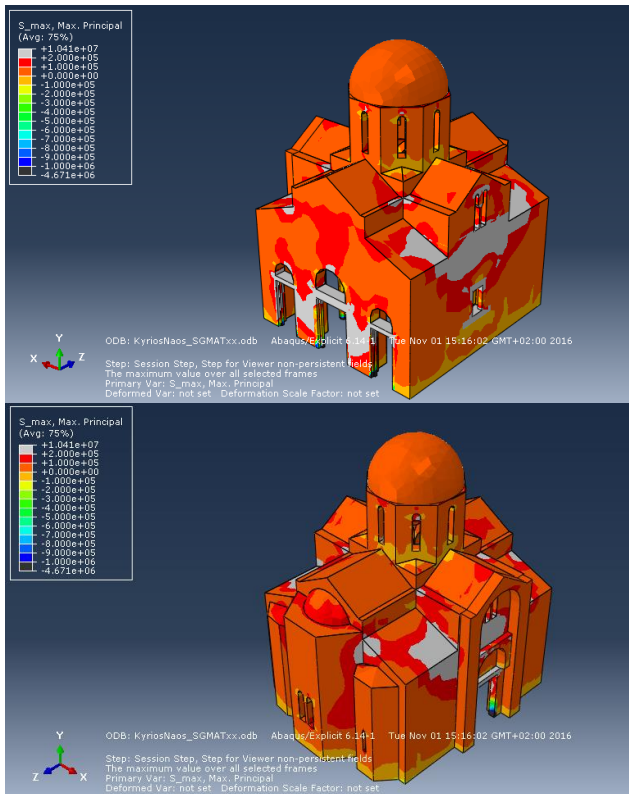
Εικόνα 8-5: Μετακίνηση της κορυφής του τρούλου κατά τη διεύθυνση x σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Η μέγιστη μετακίνηση είναι περί τα 4,2 mm και εμφανίζεται λίγο μετά τα 6s. Οι δύο χρονοϊστορίες διαφέρουν αισθητά μετά τα 7,7 δευτερόλεπτα, ωστόσο παρουσιάζουν κοντινά μέγιστα.



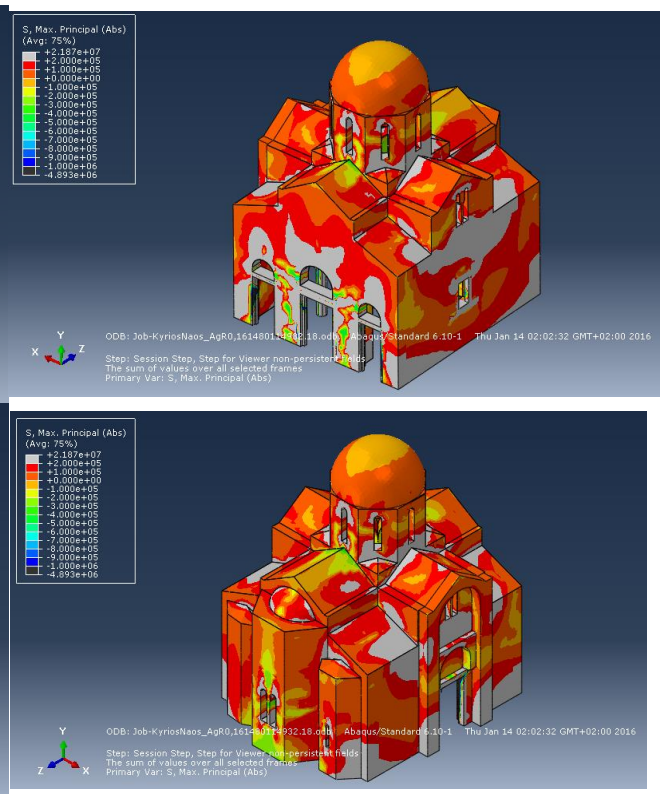
Εικόνα 8-6: Μετακίνηση της κορυφής του τρούλου σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”: με μωβ γραμμή εικονίζεται η ολική μετακίνηση, με πράσινο η κατά τον άξονα x και με μπλε κατά τον άξονα z. Είναι εμφανές ότι οι κύριες μετακινήσεις αναπτύσσονται κατά την διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης.

- Τάσεις:
- Ως προς τη σύγκριση μεταξύ των αναλύσεων χρονοϊστορίας και I.A.Φ.Α. :

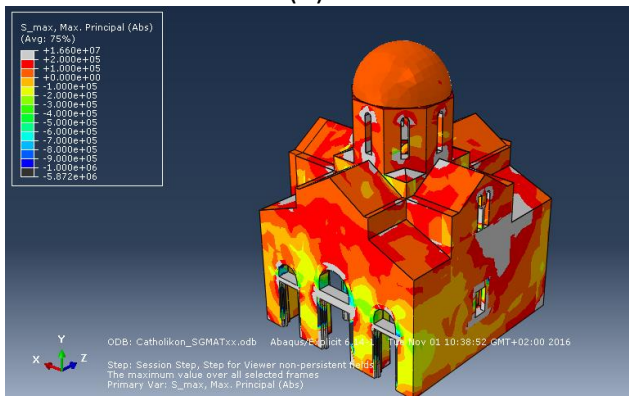
- Στο προσομοίωμα 2, καταλήγουν σε ανάλογα αποτελέσματα αλλά η Ι.Α.Φ.Α. είναι πιο συντηρητική.
- Ομοίως συμβαίνει και στο προσομοίωμα 1.
- Ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων χρονοϊστορίας στα προσομοιωμάτων 1 και 2:
 - Η αναλογία αναλύσεων χρονοϊστορίας και Ι.Α.Φ.Α. οδηγεί σε παρεμφερή συγκριτικά αποτελέσματα για τα προσομοιώματα. Συγκεκριμένα:
 - Στο προσομοίωμα 1 οι δυτικές και νοτιοδυτικές τοιχοποιίες εμφανίζονται ανακουφισμένες.
 - Αντιθέτως ο τρούλος λίγο πιο επιβαρυσμένος (μια τάση που παρατηρείται και στις Ι.Α.Φ.Α).

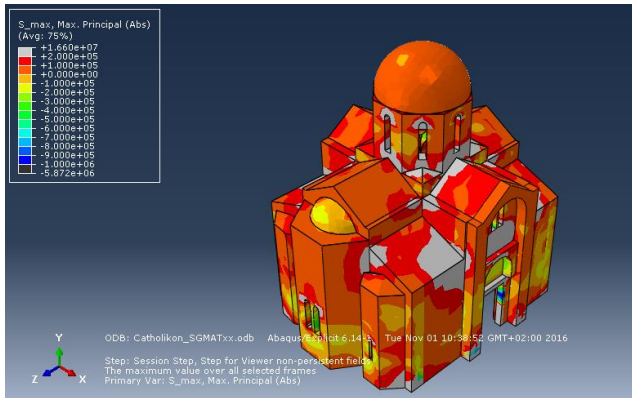


(α)

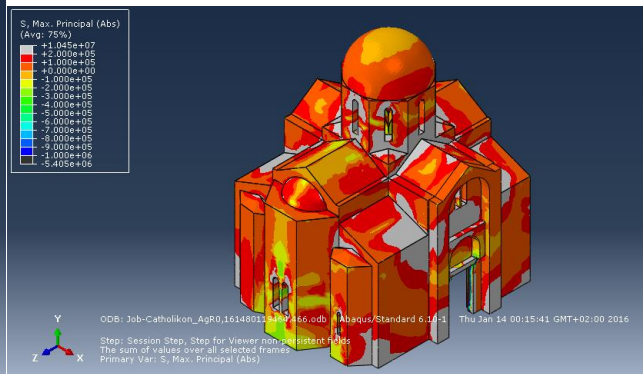


(β)





(γ)

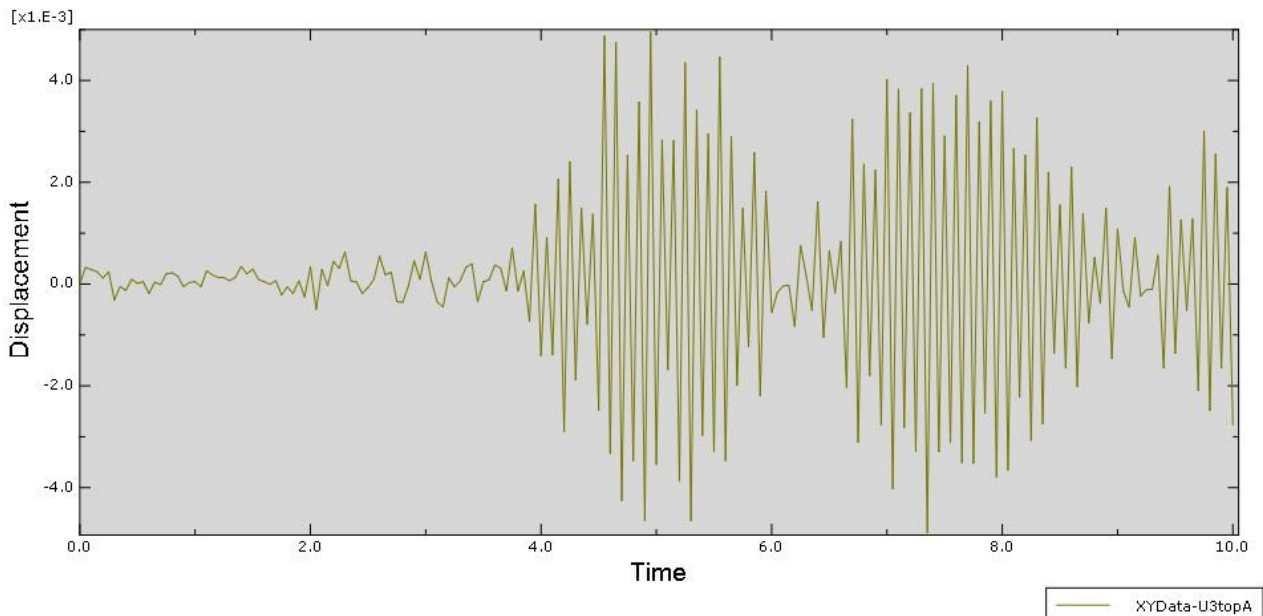


(δ)

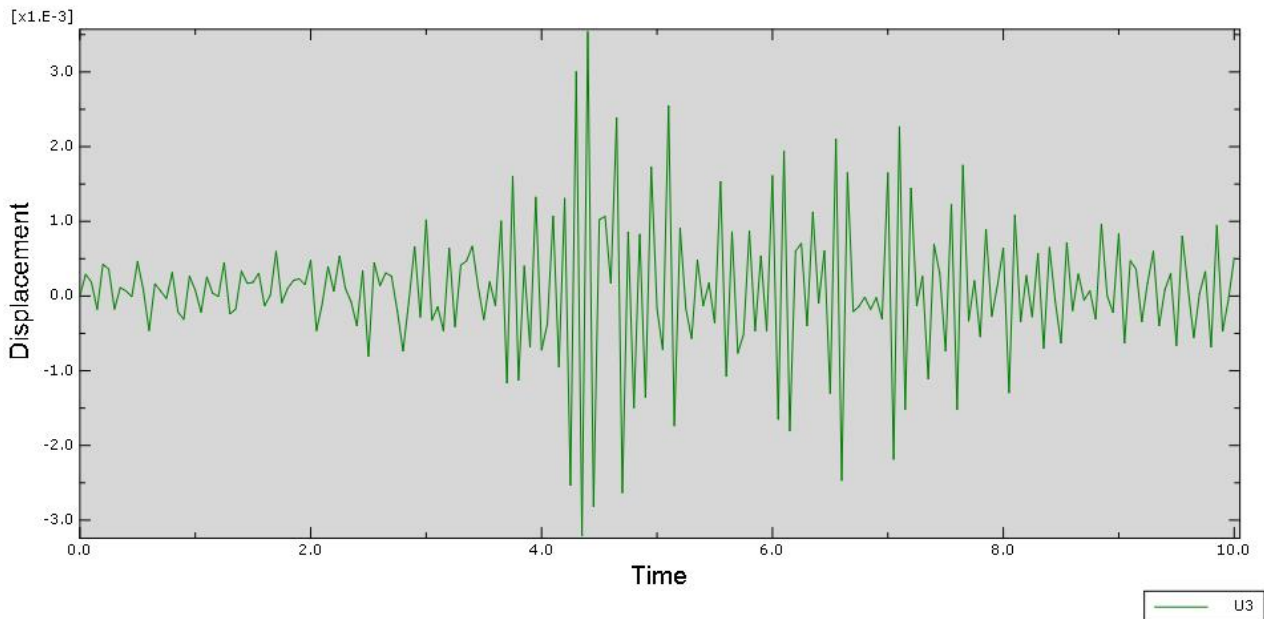
Εικόνα 8-7: Περιβάλλουσα μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης: (α) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 2. (β) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 2. (γ) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 1. (δ) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 1.

Σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση z

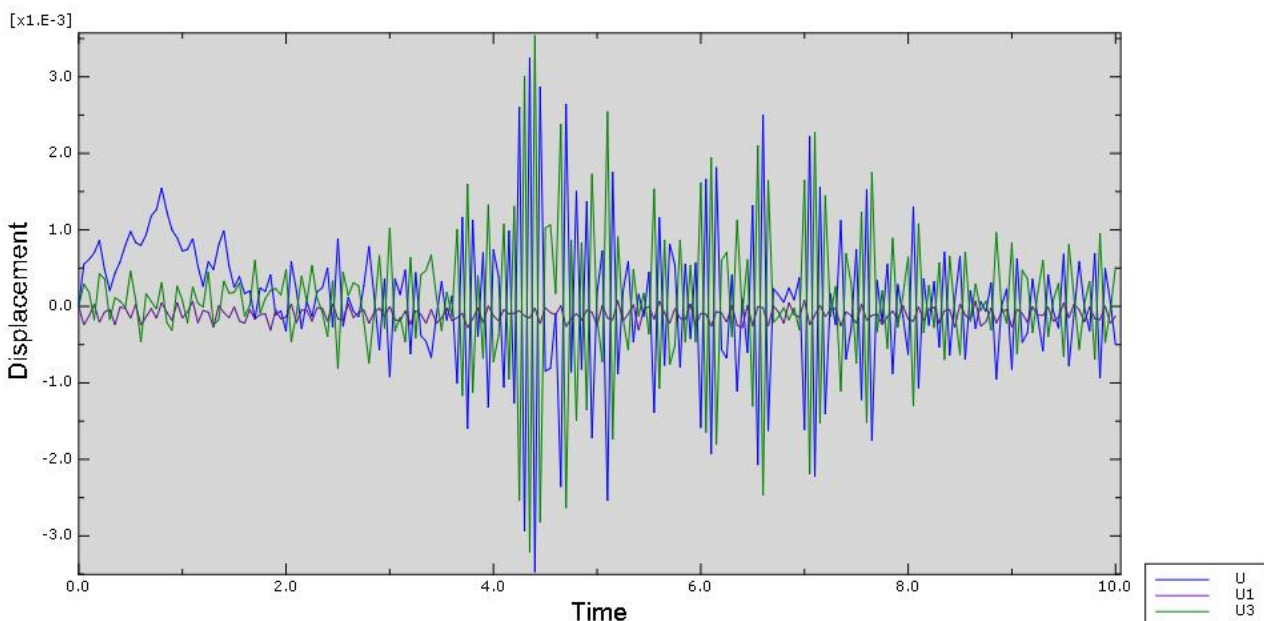
- Μετακινήσεις



Εικόνα 8-8: Μετακίνηση κορυφής του τρούλου κατά τον άξονα z σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Λαμβάνει μέγιστη τιμή γύρω στα 5 mm κατά τις χρονικές στιγμές 4,9 και 7,4 sec.



Εικόνα 8-9: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατά τη διεύθυνση z σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της γύρω στα 4,4 sec και είναι 4,2 mm. Η ομοιότητα της χρονοϊστορίας αυτής με την παραπάνω είναι ότι οι μετακινήσεις αρχίζουν να αυξάνουν λίγο πριν τα 4 sec όμως από εκεί και πέρα έχουν διαφορετική μορφή.



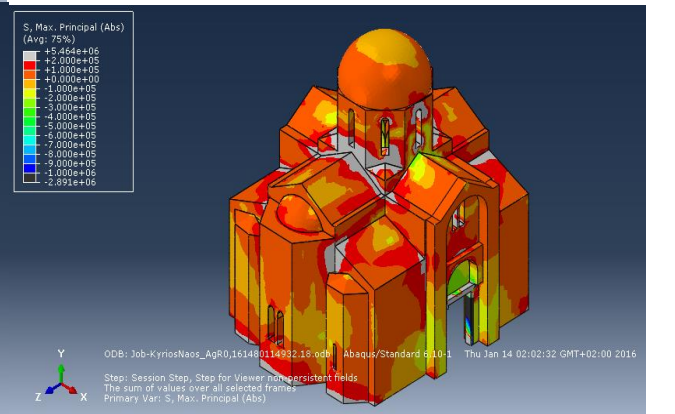
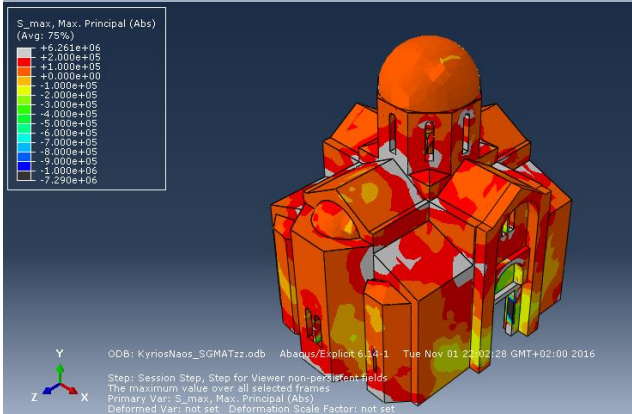
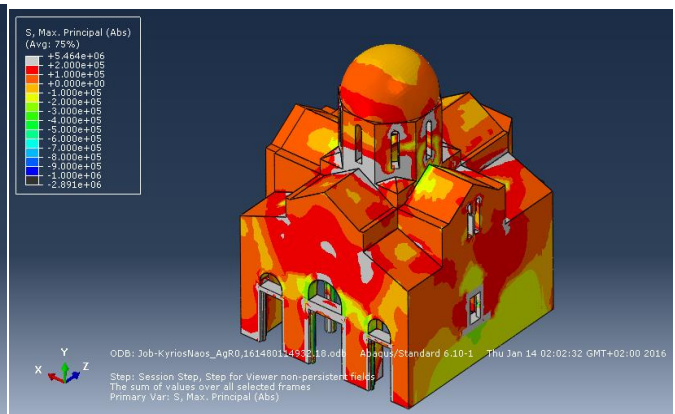
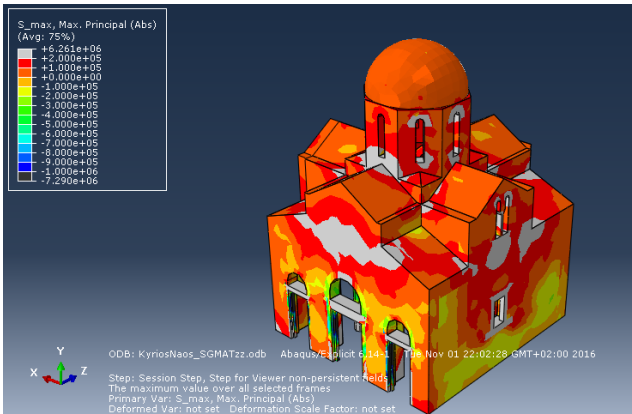
Εικόνα 8-10: Στο παραπάνω διάγραμμα εικονίζονται οι μετακινήσεις της κορυφής του τρούλου σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Με μπλέ χρωματίζεται η χρονοϊστορία των ολικών μετακινήσεων, με πράσινο η χρονοϊστορία των μετακινήσεων κατά τον άξονα z και με μωβ κατά τον άξονα x. Είναι εμφανές ότι οι κύριες μετακινήσεις αναπτύσσονται κατά την διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης.

▪ Τάσεις:

▪ Ως προς τη σύγκριση μεταξύ των αναλύσεων χρονοϊστορίας και Ι.Α.Φ.Α. :

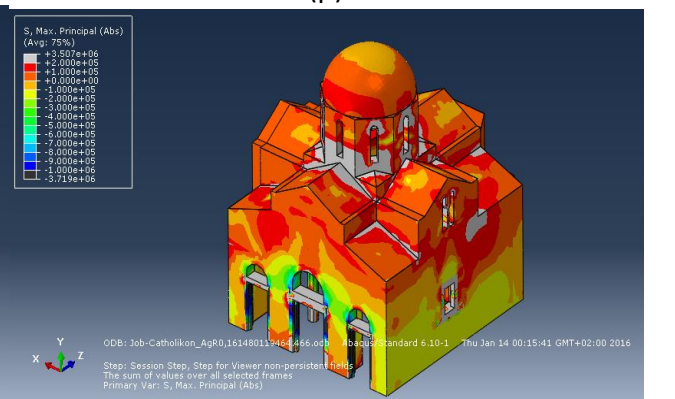
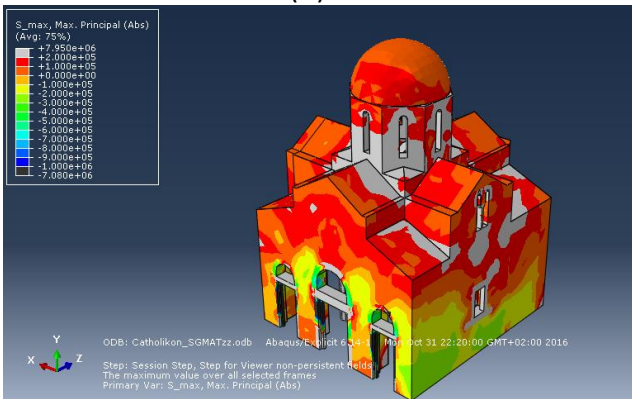
- Στο προσομοίωμα 2, η Ι.Α.Φ.Α. οδηγεί σε πιο συντηρητικά αποτελέσματα στον τρούλο, όμως δεν εμφανίζει την υπέρβαση τάσεων που προβλέπει η ανάλυση χρονοϊστορίας στις περιμετρικές τοιχοποιίες.

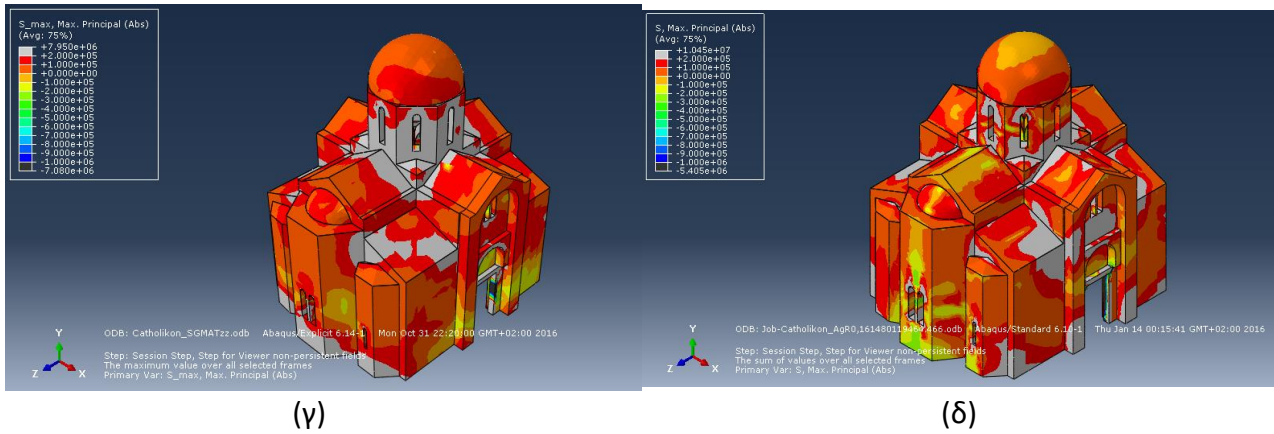
- Στο προσομοίωμα 1 η ανάλυση χρονοϊστορίας είναι πιο συντηρητική.
- Ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων χρονοϊστορίας στα προσομοιώματα 1 και 2:
 - Στο προσομοίωμα 1 οι δυτικές και νοτιοδυτικές τοιχοποιίες εξακολουθούν να εμφανίζονται ανακουφισμένες.
 - Κατά τ' άλλα το προσομοίωμα 1 είναι πιο δυσμενές.



(α)

(β)

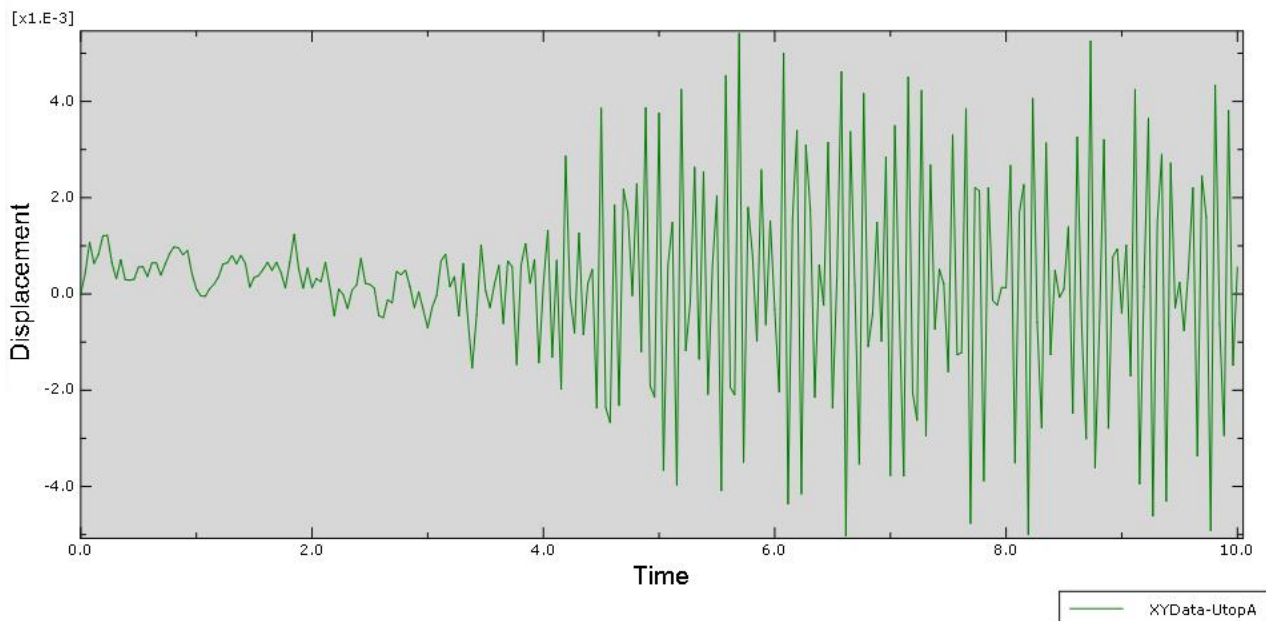




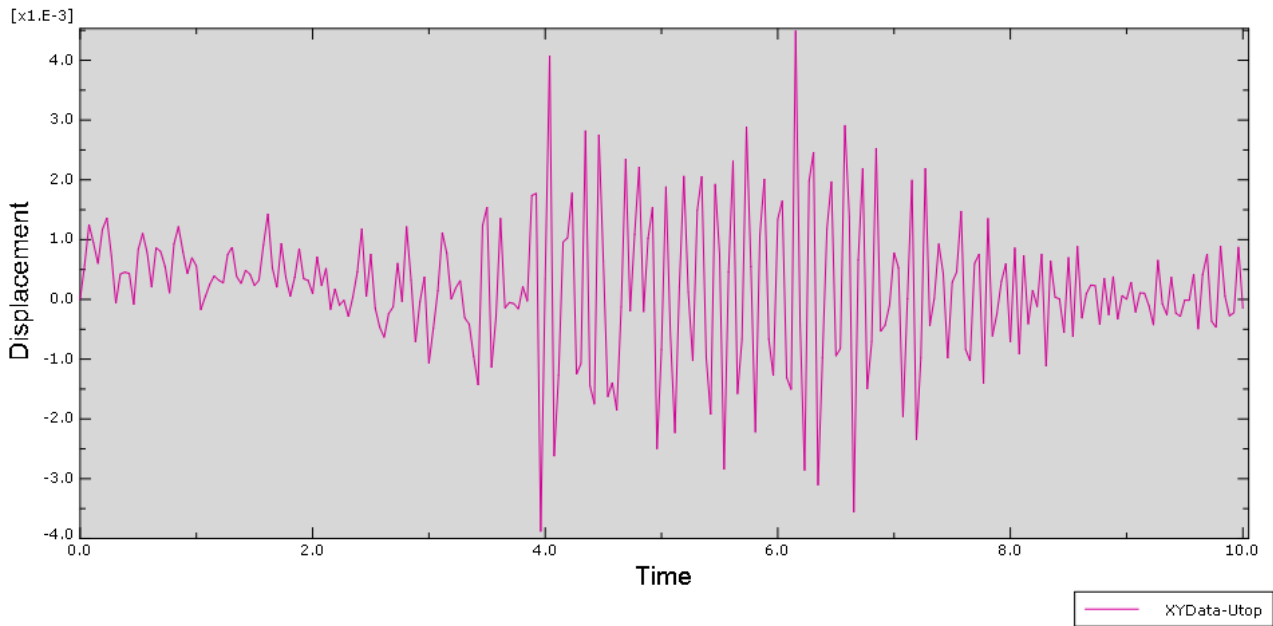
Εικόνα 8-11: Περιβάλλουσα μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης: (α) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 2. (β) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 2. (γ) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 1. (δ) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 1.

Σεισμική διέγερση και κατά τις 2 οριζόντιες διευθύνσεις

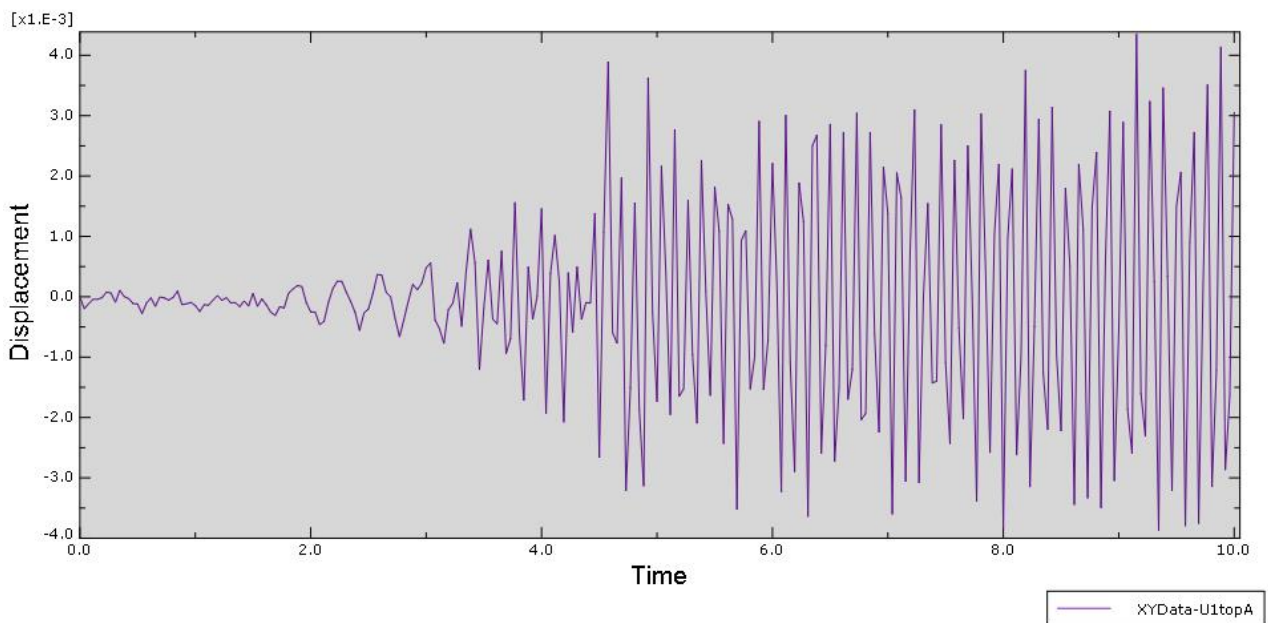
■ Μετακινήσεις



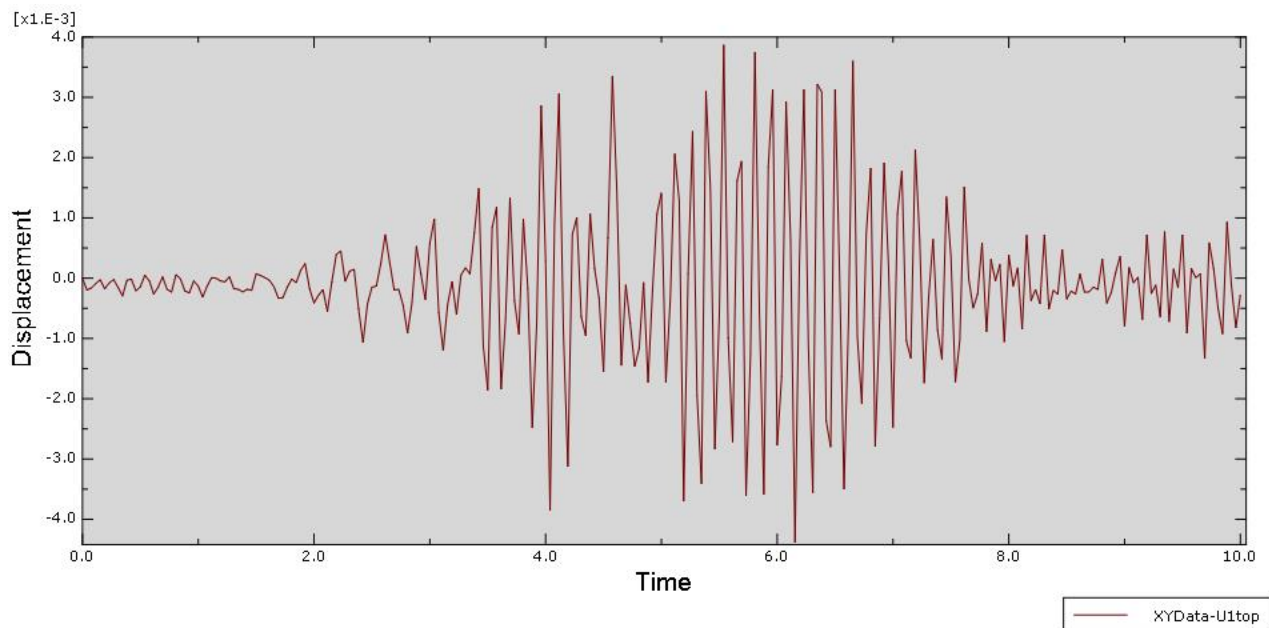
Εικόνα 8-12: Ολική μετακίνηση τρούλου σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Η μέγιστη τιμή είναι τα 5,3 mm.



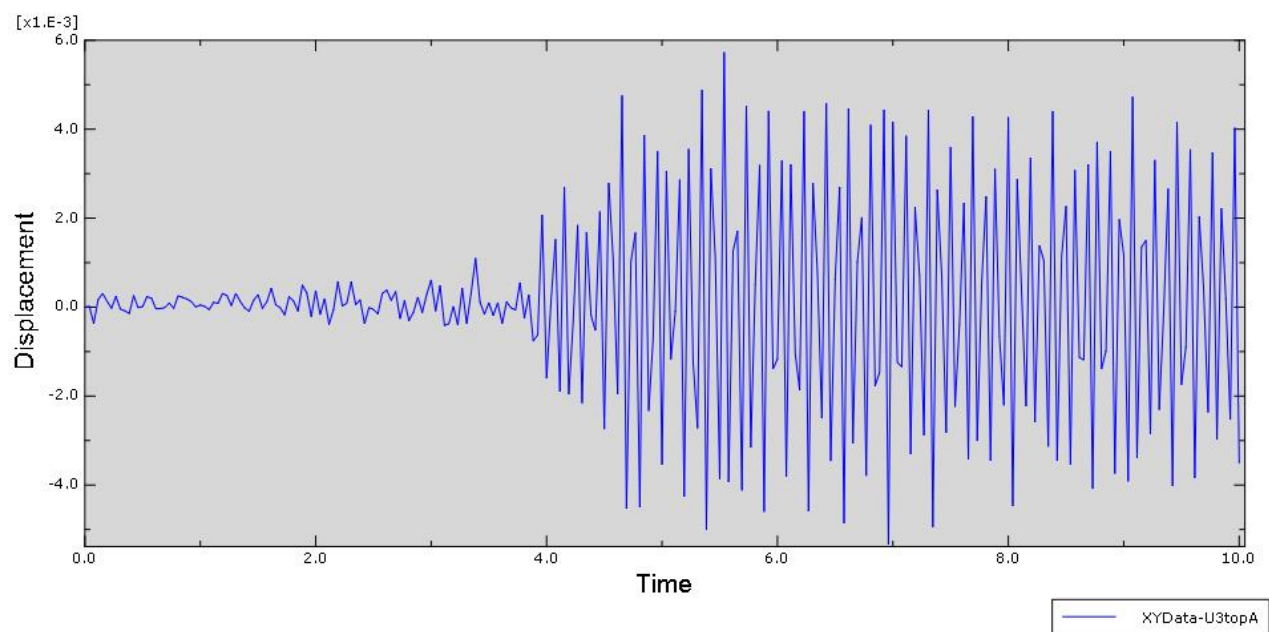
Εικόνα 8-13: Ολική μετακίνηση τρούλου σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Η μέγιστη τιμή της είναι 4,6 mm. Η χρονοϊστορία αυτή χαρακτηρίζεται από μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από την εναλλακτική προσομοίωση, ιδίως μετά τα 6,5 sec.



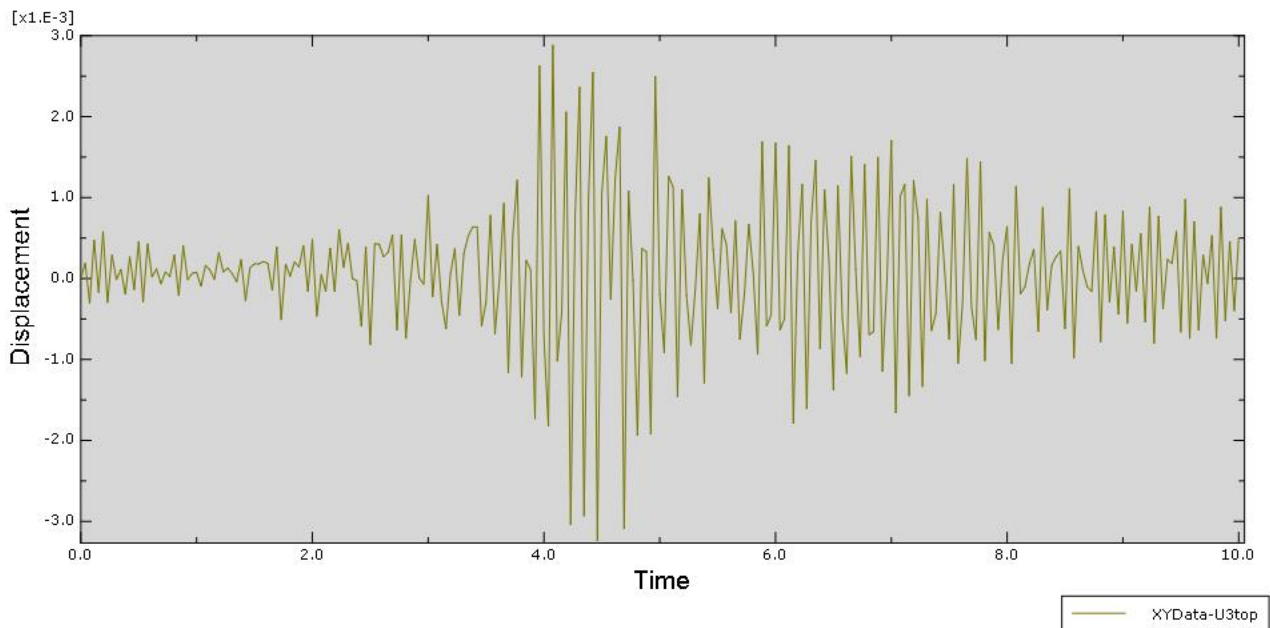
Εικόνα 8-14: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατα τη διεύθυνση x σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Μέγιστη μετακίνηση 4,4 mm.



Εικόνα 8-15: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατα τη διεύθυνση x σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Μέγιστη μετακίνηση 4,5 mm.

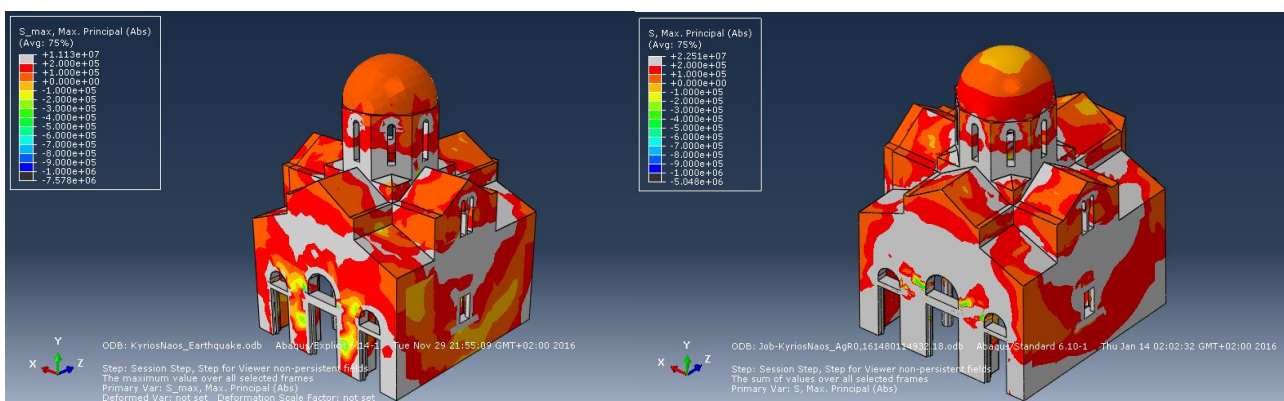


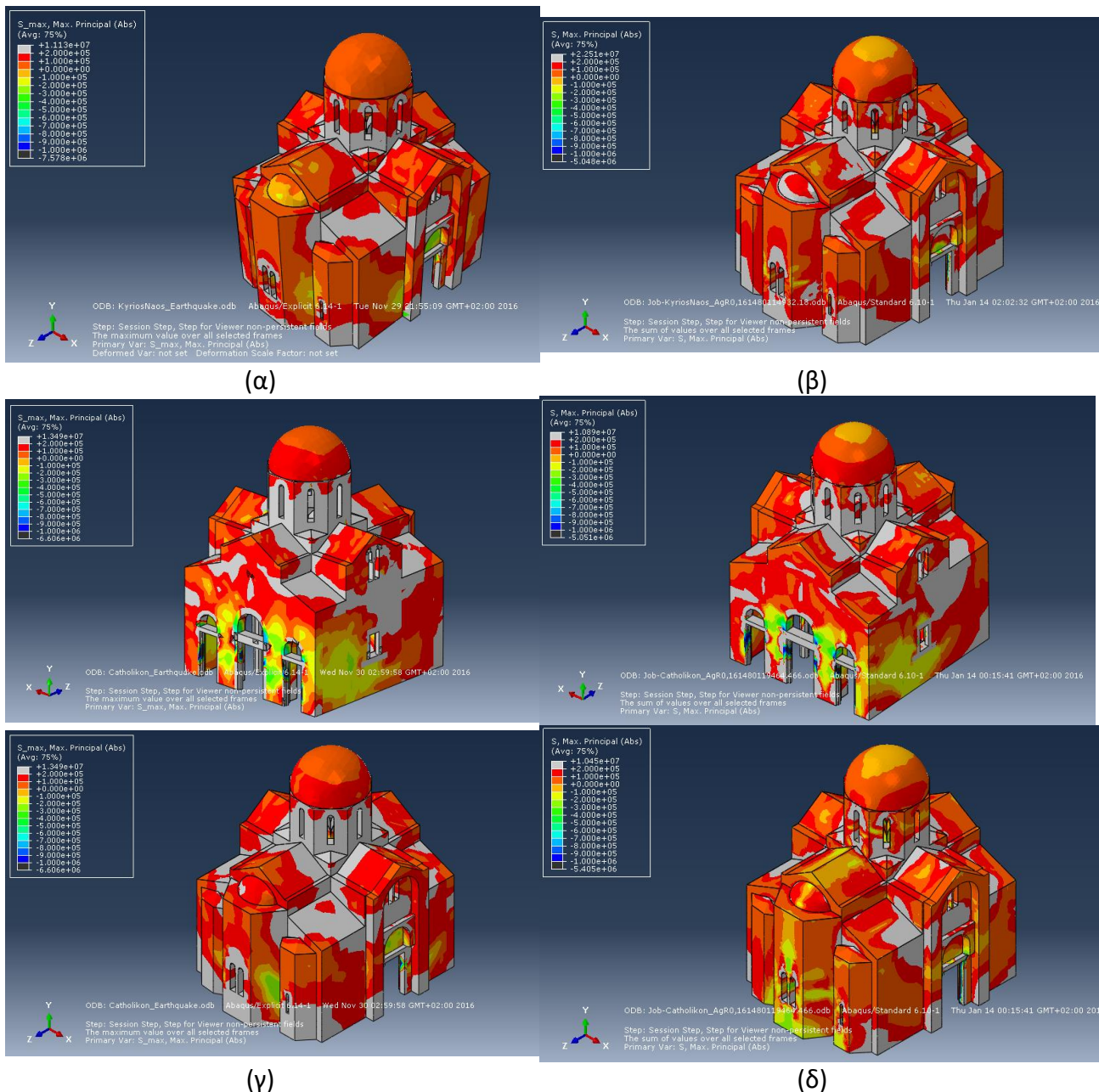
Εικόνα 8-16: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατα τη διεύθυνση z σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Μέγιστη μετακίνηση 5,3 mm.



Εικόνα 8-17: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατά τη διεύθυνση z σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Μέγιστη μετακίνηση 3,2 mm.

- Τάσεις:
- Ως προς τη σύγκριση μεταξύ των αναλύσεων χρονοϊστορίας και Ι.Α.Φ.Α.:
 - Στο προσομοίωμα 2, η Ι.Α.Φ.Α. οδηγεί σε σαφώς πιο συντηρητικά αποτελέσματα καθ’ όλην την έκταση του φορέα.
 - Στο προσομοίωμα 1 η ανάλυση χρονοϊστορίας είναι αρκετά πιο συντηρητική.
- Ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων χρονοϊστορίας στα προσομοιώματα 1 και 2:
 - Τα αποτελέσματα είναι παρεμφερή.



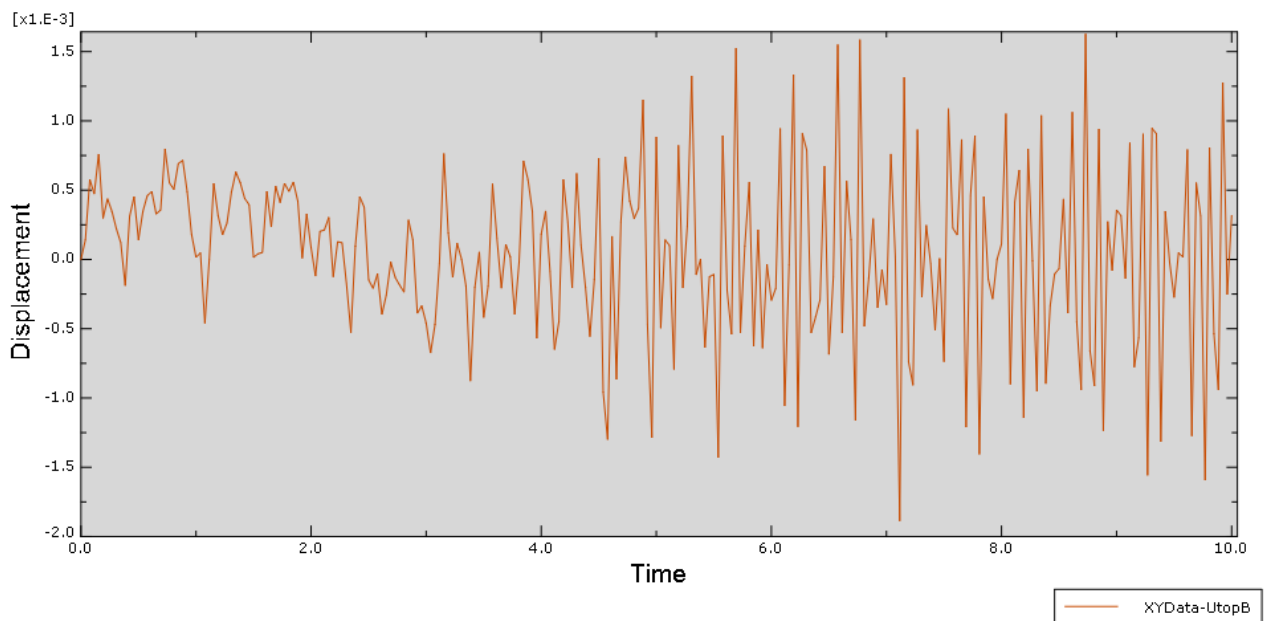


Εικόνα 8-18: Περιβάλλουσα της μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης: (α) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 2. (β) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 2. (γ) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 1. (δ) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 1.

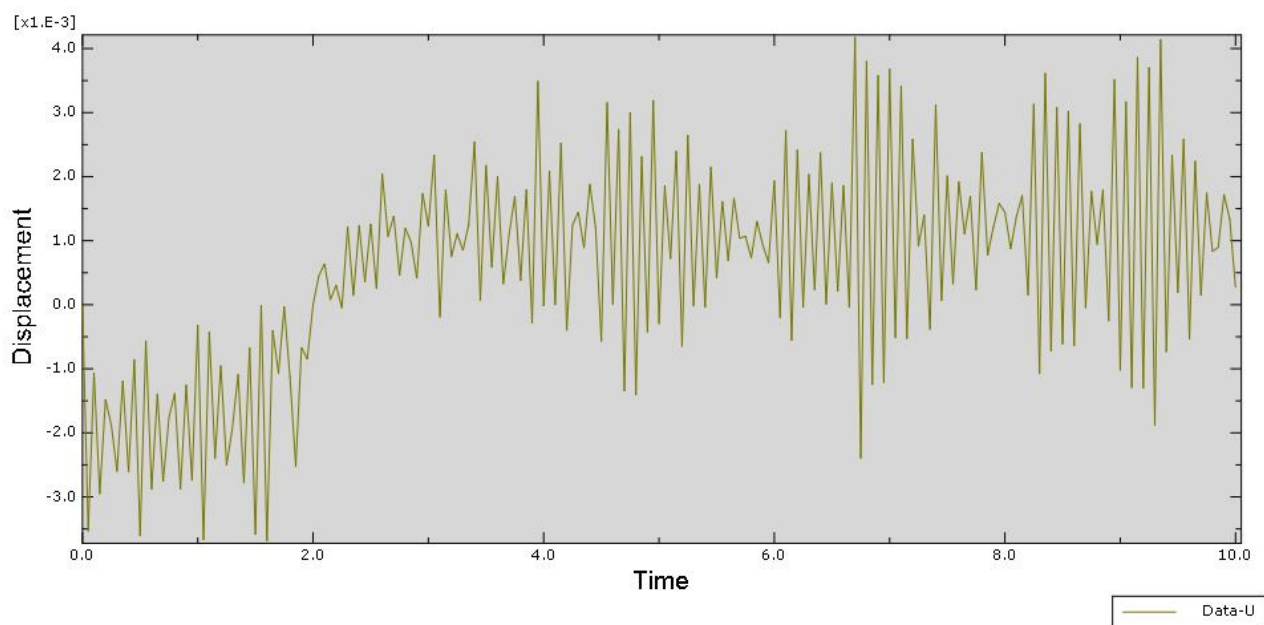
8.3 Αποτελέσματα για τις μεταβυζαντινές προσθήκες

Σεισμική διέγερση και κατά τις 2 διευθύνσεις

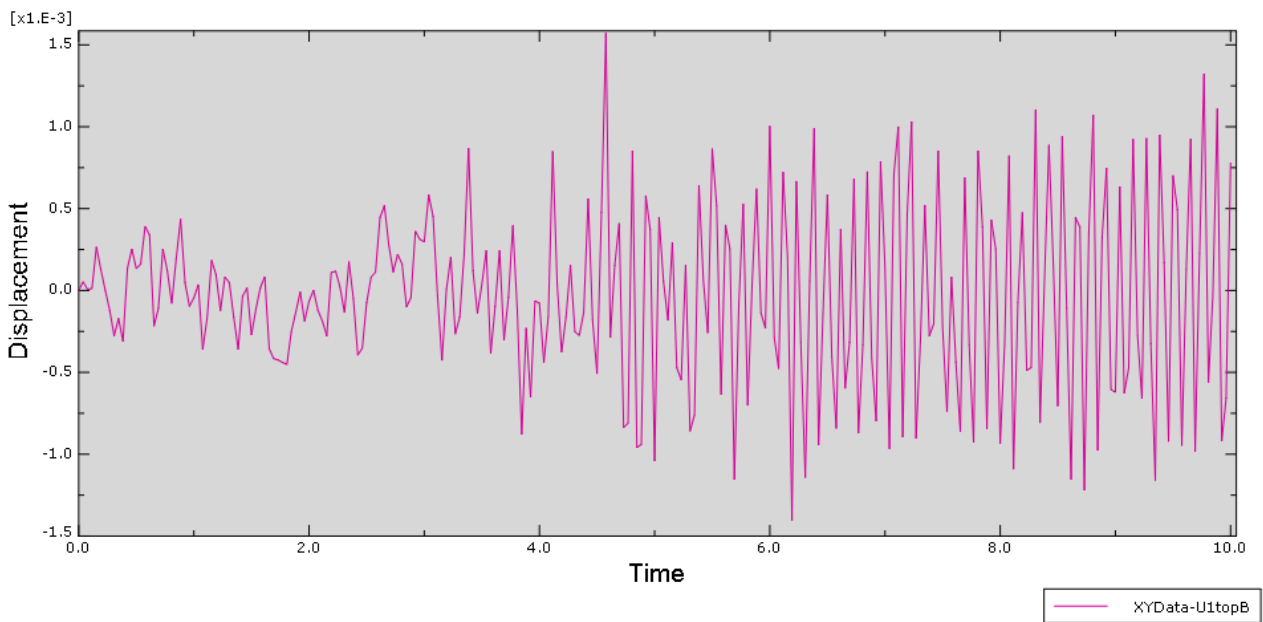
Μετακινήσεις:



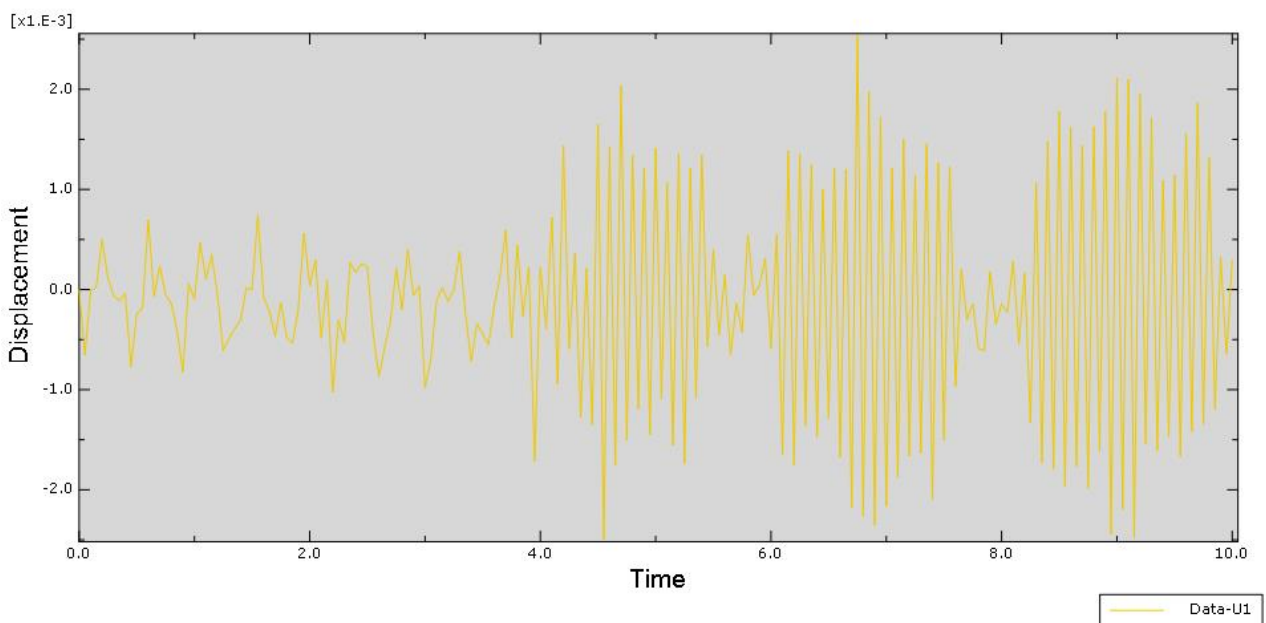
Εικόνα 8-19: Ολική μετακίνηση τρούλου σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Η μέγιστη τιμή είναι τα 1,6 mm.



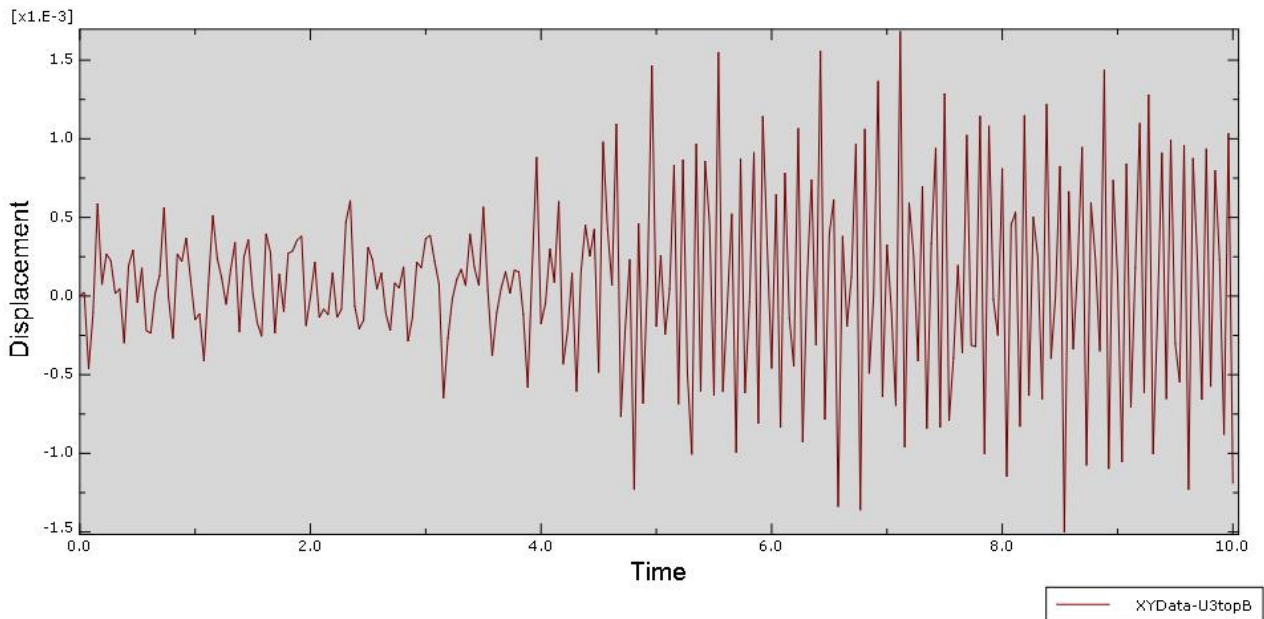
Εικόνα 8-20: Ολική μετακίνηση τρούλου σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Η μέγιστη τιμή της είναι 4,2 mm. Εμφανής ο ρόλος των κατακόρυφων βυθήσεων.



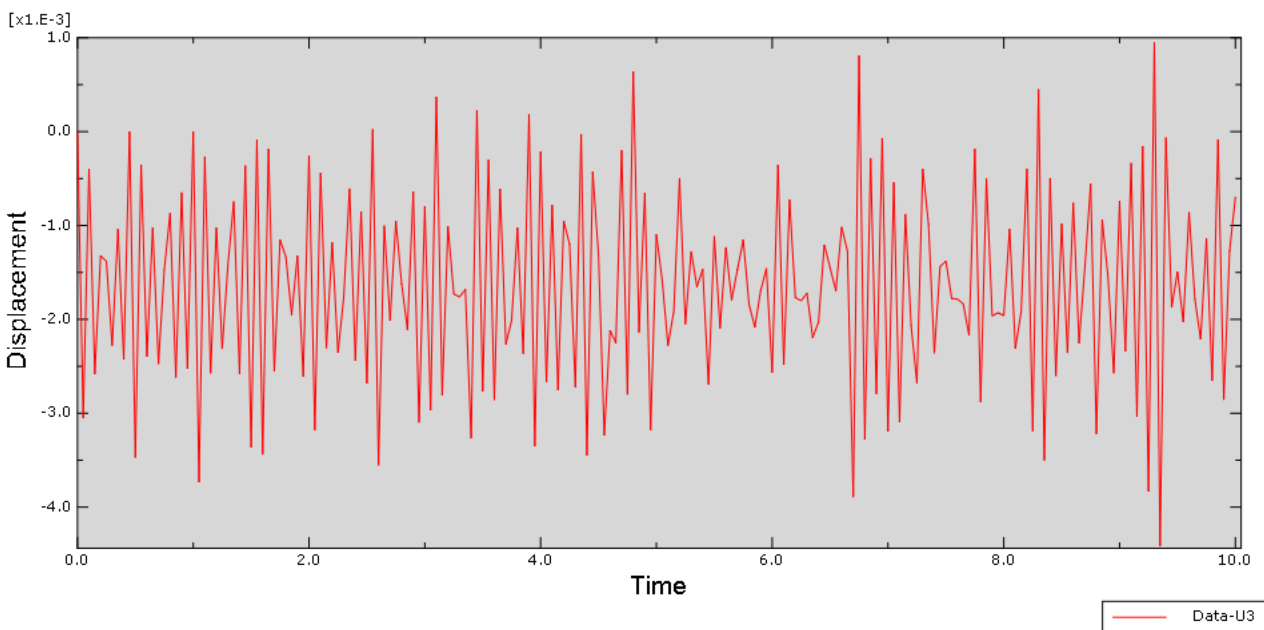
Εικόνα 8-21: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατα τη διεύθυνση x σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Μέγιστη μετακίνηση 1,6 mm.



Εικόνα 8-22: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατα τη διεύθυνση x σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Μέγιστη μετακίνηση 2,6 mm.



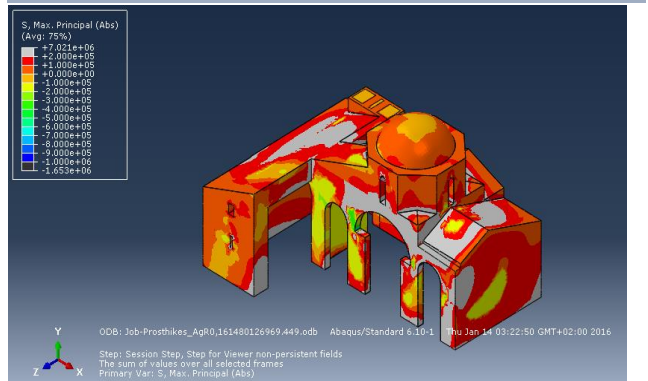
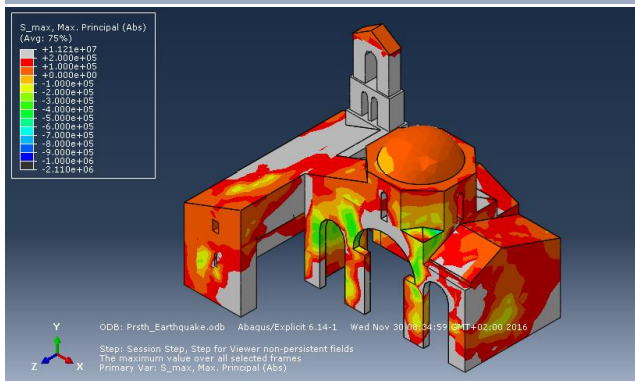
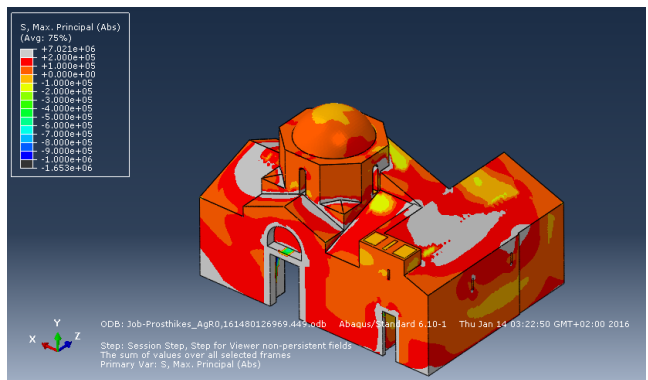
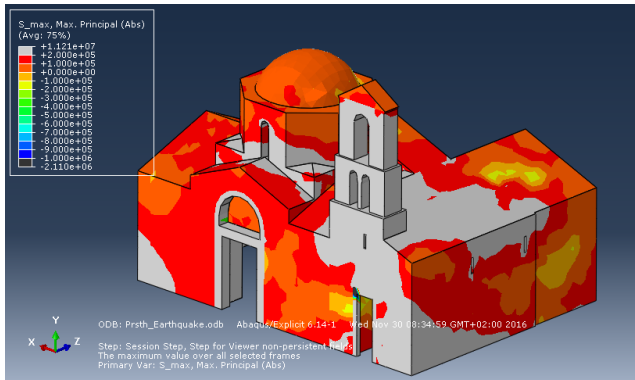
Εικόνα 8-23: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατά τη διεύθυνση z σύμφωνα με το “προσομοίωμα 1”. Μέγιστη μετακίνηση 1,7 mm.



Εικόνα 8-24: Μετακίνηση κορυφής τρούλου κατά τη διεύθυνση z σύμφωνα με το “προσομοίωμα 2”. Μέγιστη μετακίνηση 4,5 mm.

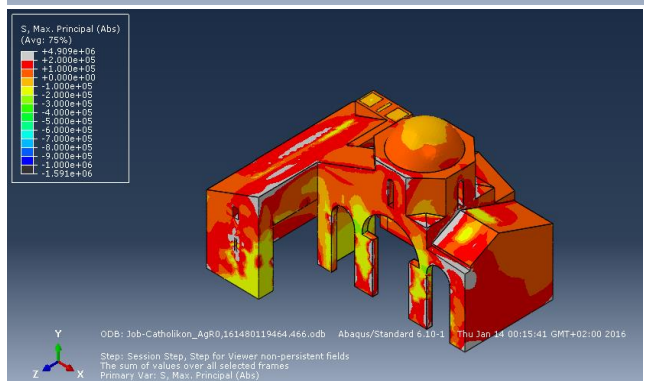
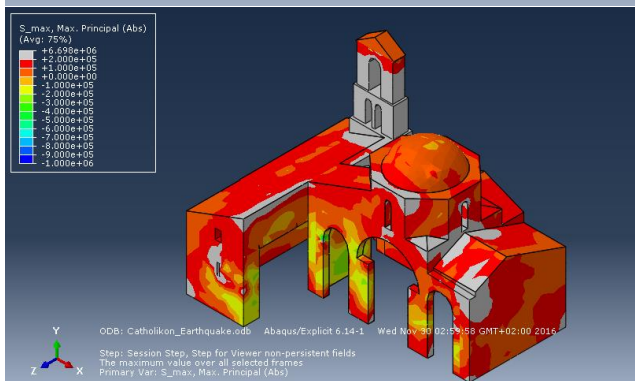
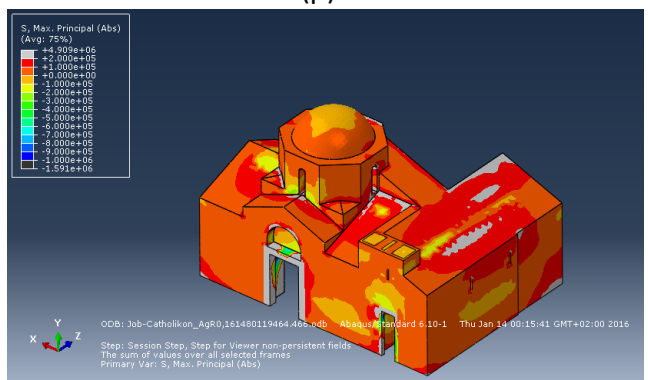
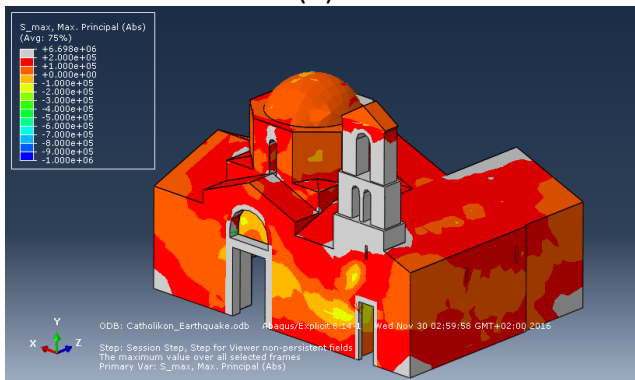
▪ Τάσεις:

- Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα των αναλύσεων χρονοϊστορίας και Ι.Α.Φ.Α. δεν είναι συγκρίσιμα καθώς η προσθήκη του κωδωνοστασίου αλοιώνει κατά πολύ τα αποτελέσματα.
- Ως προς την σύγκριση των 2 προσομοιωμάτων βάσει των αναλύσεων χρονοϊστορίας, τα αποτελέσματα του προσομοιώματος 2, είναι κατά πολύ ευνοϊκότερα.



(α)

(β)



(γ)

(δ)

Εικόνα 8-25: Περιβάλλουσα της μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης: (α) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 2. (β) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 2. (γ) ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα 1. (δ) Ι.Α.Φ.Α. στο προσομοίωμα 1.

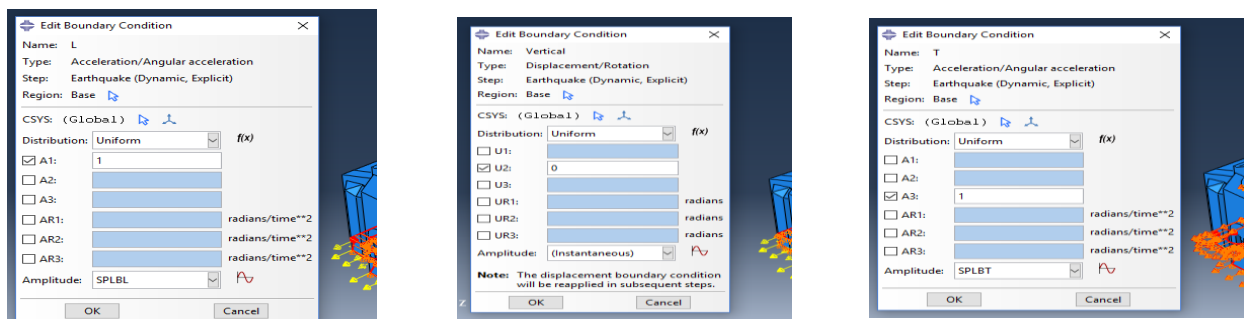
9 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

9.1 Η διαδικασία της ανάλυσης

Το τελικό βήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επανεκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου της Ι. Μ. Καισαριανής, λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση που έχουν σ' αυτό οι κατασκευαστικοί αρμοί μεταξύ των τμημάτων του μνημείου που ανάγονται σε διαφορετική κατασκευαστική φάση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μόρφωσης ενός νέου προσομοιώματος (**προσομοίωμα 3**) στο οποίο τα διαφορετικά τμήματα του Ναού προσομοιώνονται ως σώματα σε επαφή.

Οποσδήποτε, η ύπαρξη των μονόπλευρων δεσμεύσεων που χαρακτηρίζει την συμπεριφορά σωμάτων σε επαφή αποκλείει την δυνατότητα χρήσης γραμμικών αναλύσεων. Ως εκ τούτου, στο προσομοίωμα αυτό εφαρμόζονται (μη-γραμμικές) **αναλύσεις χρονοϊστορίας** μέσω του υποπρογράμματος **Abaqus Explicit**, το οποίο διαθέτει αυξημένες δυνατότητες στην διενέργεια δυναμικών αναλύσεων σε προσομοιώματα με τέτοιου είδους μη-γραμμικότητα (boundary non-linearity κατά τη ορολογία του Abaqus).

Στον φορέα ασκούνται σεισμικές επιταχύνσεις κατά τη διεύθυνση x , ύστερα κατά τη διεύθυνση z και τέλος και κατά τις 2 διευθύνσεις. Οι χρονοϊστορίες που ασκούνται κατά τη διεύθυνση x και ύστερα κατά τη διεύθυνση z είναι αυτές που προκύπτουν (κλιμακωμένες κατά Ευρωκώδικα 8) από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας (1999) στο Σύνταγμα (SGMAT) και μια από τις καταγραφές στα Σεπόλια (SPLBT). Τέλος ο φορέας διεγείρεται ταυτόχρονα με τις χρονοϊστορίες των εδαφικών επιταχύνσεων που προκύπτουν των 2 σεισμικών καταγραφών του σεισμού της Πάρνηθας (1999) στα Σεπόλια:



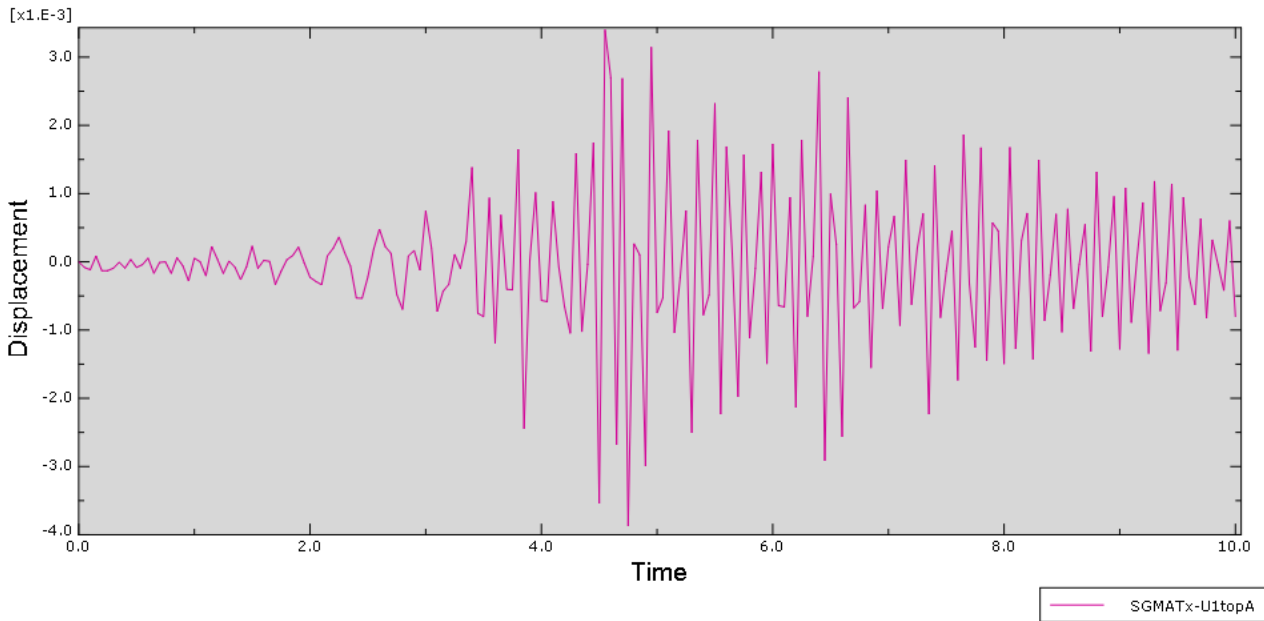
Εικόνα 9-1: Εισαγωγή της χρονοϊστορίας της διέγερσης στο περιβάλλον του Abaqus.

9.2 Αποτελέσματα

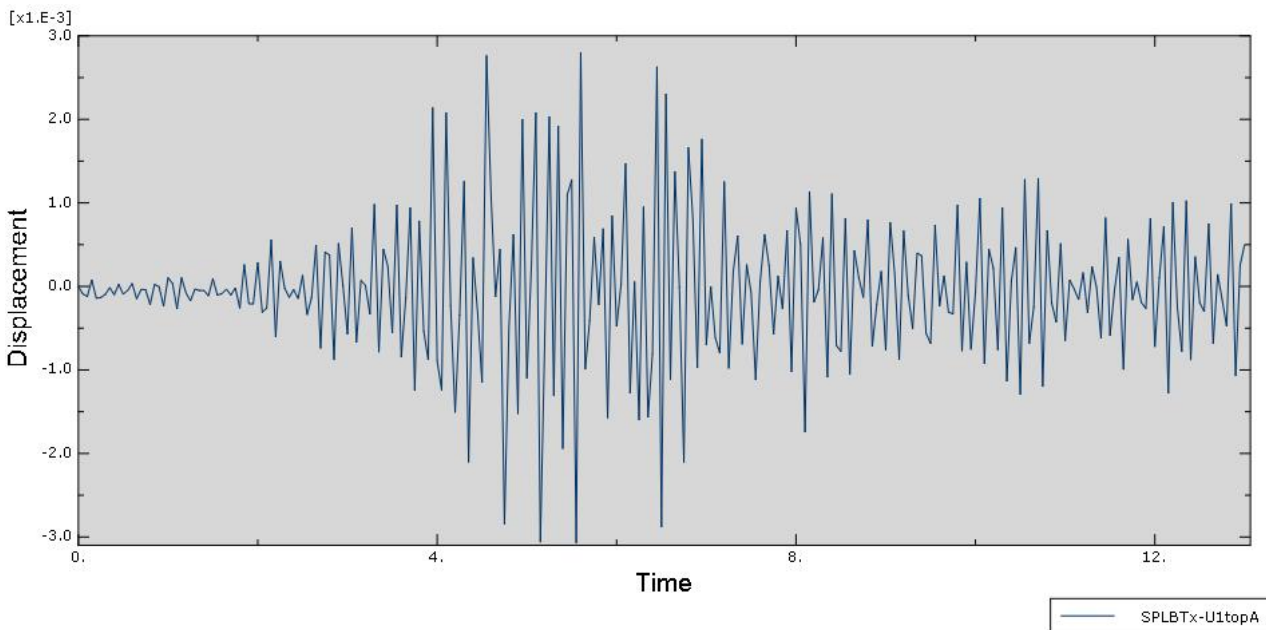
Σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση x (B-N)

Μετακινήσεις: Παρακάτω παρατίθενται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης 2 χαρακτηριστικών σημείων του Καθολικού που είναι η κορυφή του τρούλου του Κυρίως Ναού και η κορυφή του τρούλου του Νάρθηκα. Από την εξετασή τους διαπιστώνεται ότι:

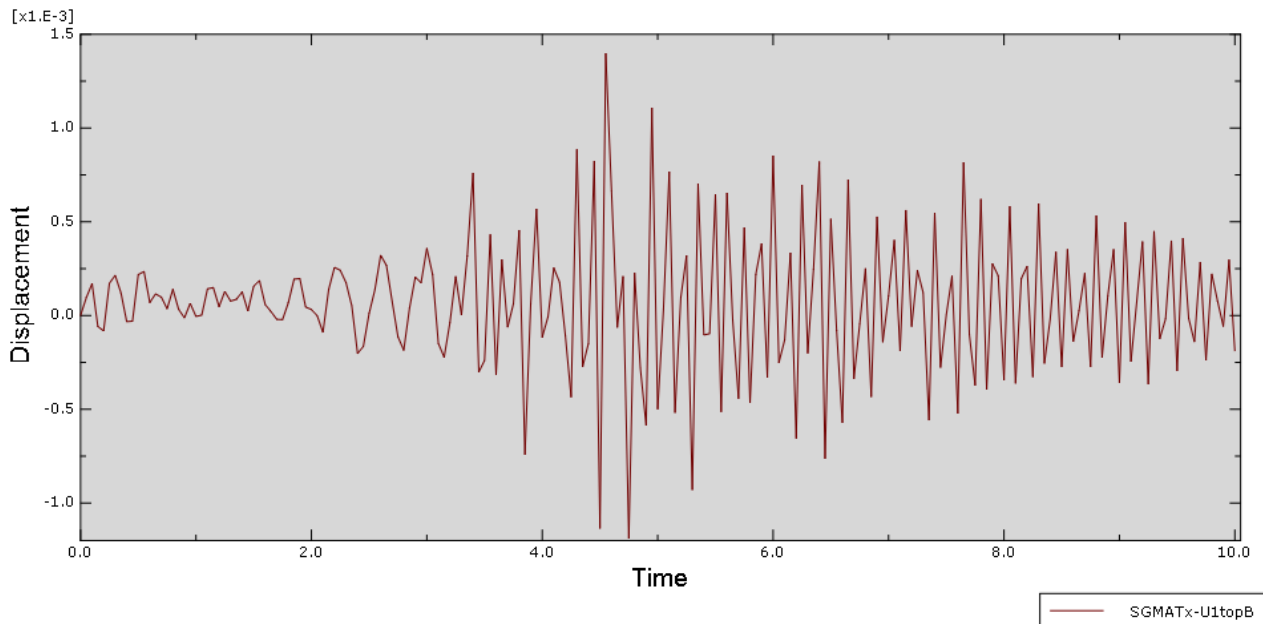
- Η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στην προσομοίωση του μνημείου (προσομοίωμα 3) οδηγεί σε μικρότερες μετακινήσεις και για τα 2 μέρη του Καθολικού. Συγκεκριμένα:
 - Η μέγιστη μετακίνηση που αναπτύσσει ο τρούλος του Κυρίως Ναού είναι **3,85 mm** και **3,1 mm** για την σεισμική καταγραφή στο Σύνταγμα και στα Σεπόλια αντίστοιχα, δηλαδή κατά μέσο όρο **3,475 mm έναντι 5,75 mm** και **4,2 mm** που δίνει το προσομοίωμα 2 μέσω Ι.Α.Φ.Α. και ανάλυσης χρονοϊστορίας αντίστοιχα, και **5,43 mm** και **4,4 mm** που δίνει αντίστοιχα το προσομοίωμα 1.
 - Εν συντομία μπορεί να ειπωθεί ότι όσον αφορά στον Κυρίως Ναό, το προσομοίωμα 3 υπό εγκάρσιο σεισμό οδηγεί σε μετατοπίσεις που σε σχέση με τις πιο απλουστευτικές αναλύσεις που προηγούνται, είναι **ίδιας τάξης μεγέθους αλλά σαφώς μικρότερες**.
 - Η μέγιστη μετακίνηση που αναπτύσσει ο τρούλος του Νάρθηκα είναι **1,4 mm** και **1,55 mm** για την σεισμική καταγραφή στο Σύνταγμα και στα Σεπόλια αντίστοιχα, δηλαδή κατά μέσο όρο **1,475 mm έναντι 1,95 mm** και **2,6 mm** που δίνει το προσομοίωμα 2 μέσω Ι.Α.Φ.Α. και ανάλυσης χρονοϊστορίας αντίστοιχα, και **1,7 mm** και **1,6 mm** που δίνει αντίστοιχα το προσομοίωμα 1.
 - Εν συντομία μπορεί να ειπωθεί ότι όσον αφορά τον Νάρθηκα, το προσομοίωμα 3 υπό εγκάρσιο σεισμό, οδηγεί σε μετατοπίσεις που σε σχέση με τις πιο απλουστευτικές αναλύσεις που προηγούνται, είναι **ίδιας τάξης μεγέθους αλλά μικρότερες, με το προσομοίωμα 1 να οδηγεί σε εγγύτερα αποτελέσματα με αυτά του προσομοιώματος 3**.
- Σε όλες τις χρονοϊστορίες που υπολογίζονται και παρατίθενται παρακάτω, αρκετοί κύκλοι εμφανίζουν “σπασίματα”, δηλαδή “γωνιώδη” εξέλιξη της απεικονιζόμενης μετακίνησης. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα (1^η χρονική παράγωγος της μετακίνησης) παρουσιάζει ασυνέχειες, γεγονός που αντανακλά τα κρουστικά φαινόμενα που συμβαίνουν μεταξύ των σωμάτων εν επαφή.
 - Μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε ο υπολογισμός των χρονοϊστοριών των αντίστοιχων ταχυτήτων. Η μακροσκοπική εξέταση της κλίσης των παρακάτω χρονοϊστοριών, δείχνει ότι μετά τα “σπασίματα” η απόλυτη τιμή της ταχύτητας κατά κανόνα μειώνεται δραστικά μέχρι την έναρξη της ανακύκλισης. Σε αυτές ακριβώς τις διακοπές της εξέλιξης των ταχυτήτων ίσως να έγγειται η ευνοϊκότερη συμπεριφορά του μνημείου, όπως είχε φανεί μέχρι τώρα και όπως καταδεικνύεται και στη συνέχεια.



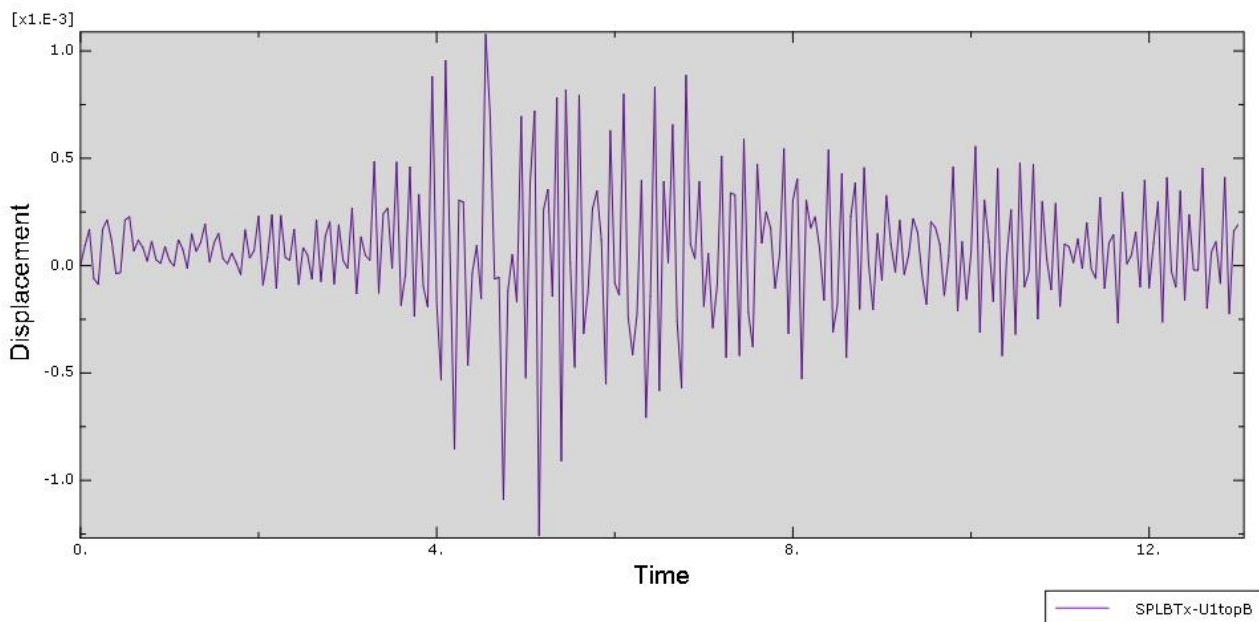
Εικόνα 9-2: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση x της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στο Σύνταγμα. Μέγιστη τιμή=3,85 mm στα 4,7 sec. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται "σπασίματα".



Εικόνα 9-3: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση x της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Μέγιστη τιμή=3,1 mm στα 5,45 sec. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται "σπασίματα".



Εικόνα 9-4: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση x της κορυφής του τρούλου του Νάρθηκα για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στο Σύσταγμα. Μέγιστη τιμή=1,4 mm κατά τη χρονική στιγμή 4,45 sec. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται "σπασίματα".



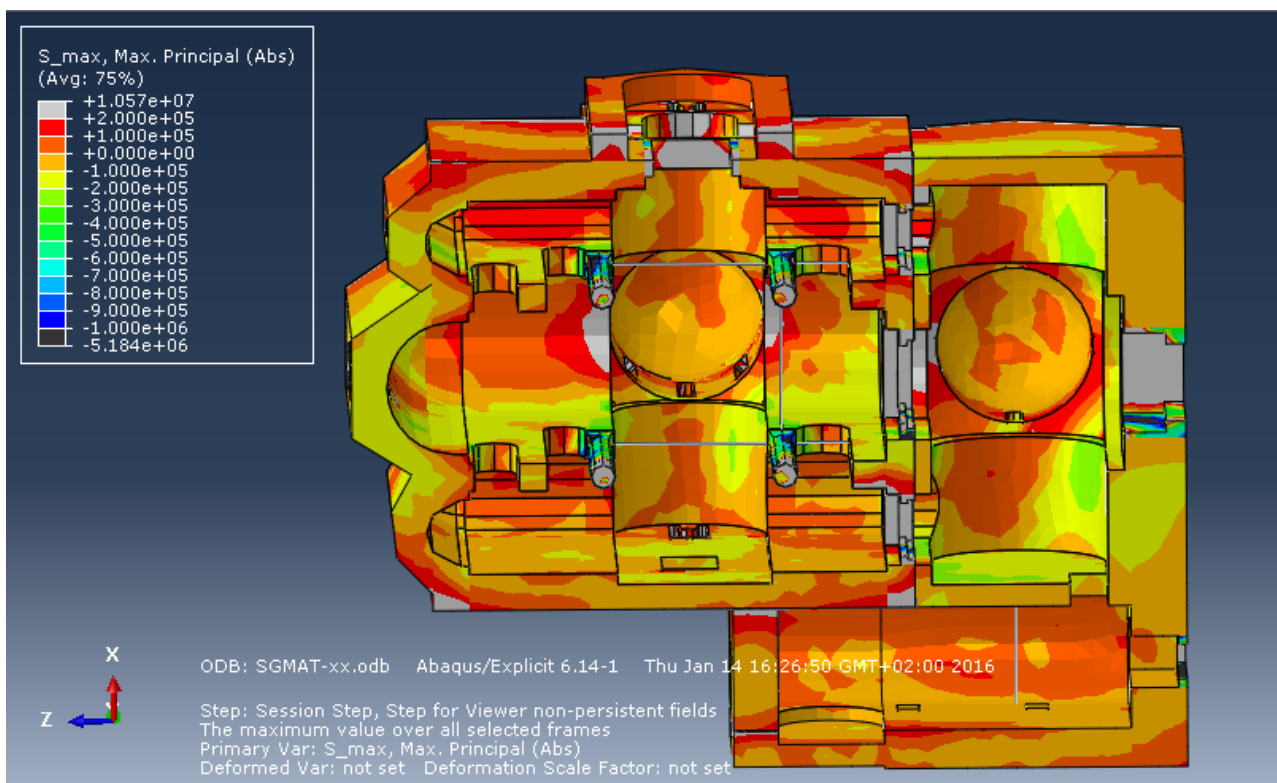
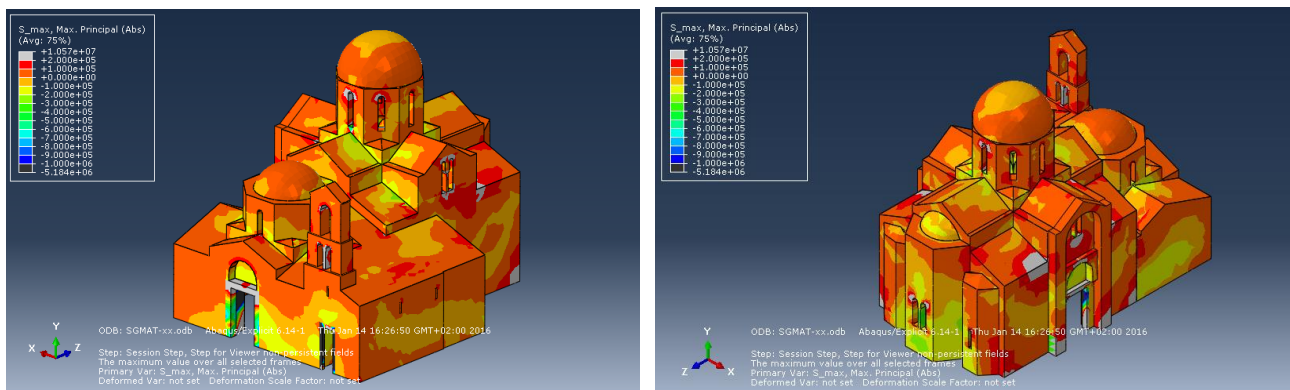
Εικόνα 9-3: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση x της κορυφής του τρούλου του Νάρθηκα για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Μέγιστη τιμή=1,55 mm κατά τη χρονική στιγμή 5,1 sec. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται "σπασίματα".

Τάσεις: Η κατανομή της μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης στο φορέα είναι σε συμφωνία με τις χρονοϊστορίες των μετακινήσεων των δυο σημείων του που επελέγησαν ως χαρακτηριστικά (κορυφές τρούλων του Κυρίως Ναού και του Νάρθηκα) οι οποίες σχολιάζονται παραπάνω. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν **είναι κατά πολύ ευμενέστερα** από τα αντίστοιχα στα οποία οδηγούν οι αναλύσεις επί των προσομοιωμάτων "1" και "2" (βλέπε

εικόνα 8-7) και συγκεκριμένα δείχνουν ότι ο μέγιστος κύριος εφελκυσμός υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας σε λιγοστές και περιορισμένες περιοχές. Αυτές είναι:

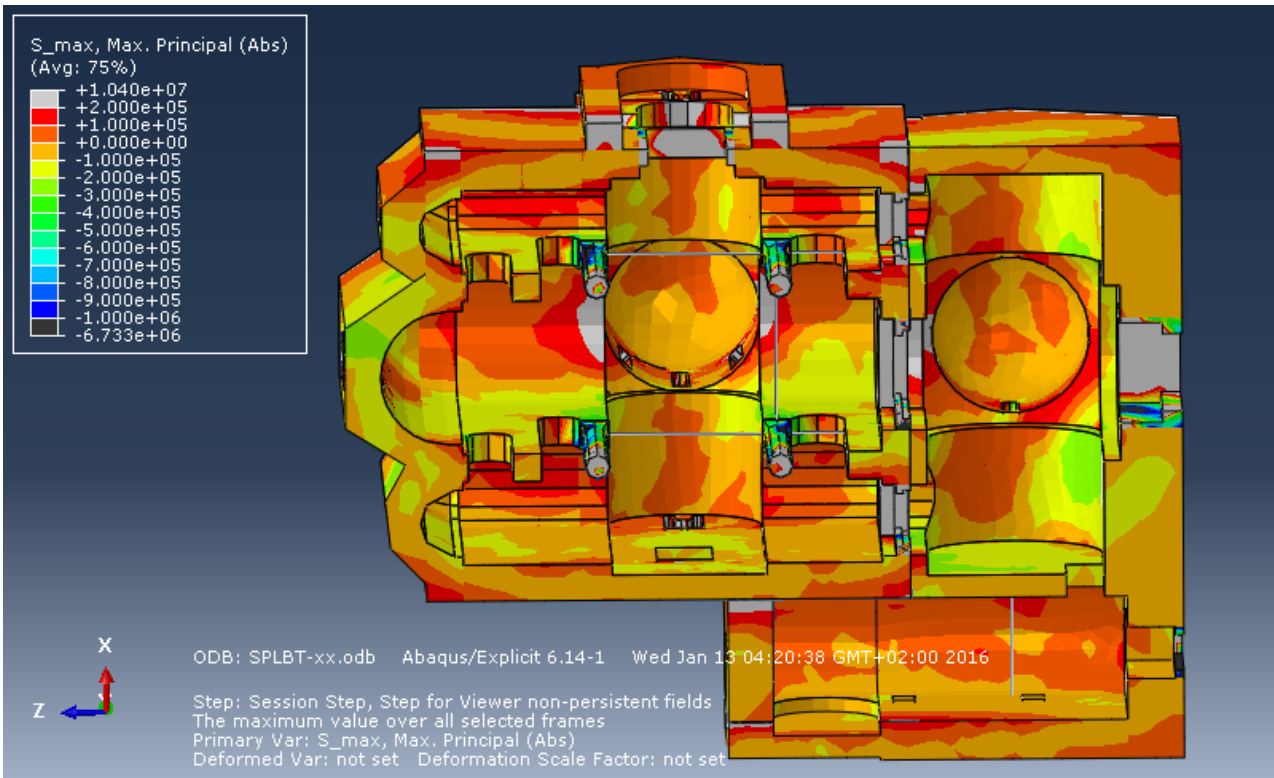
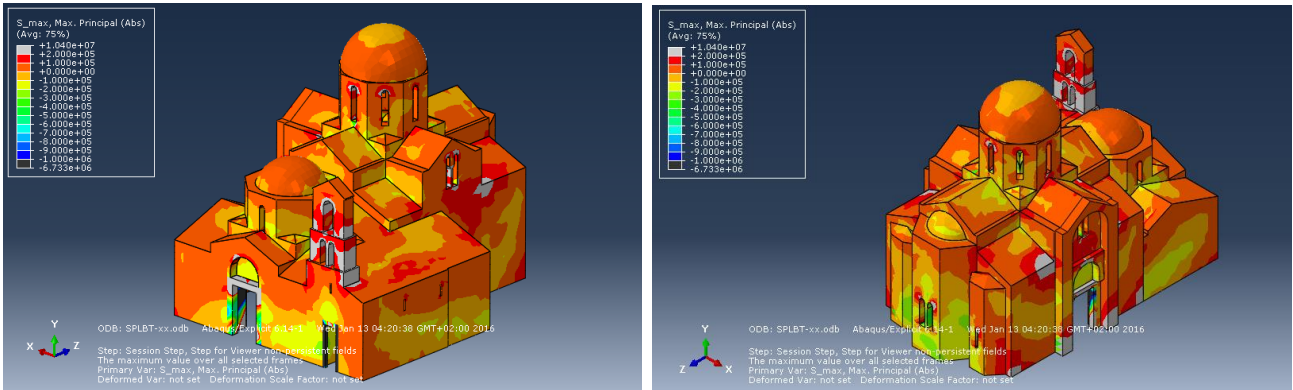
- Οι κορυφές των εσωτερικών απολήξεων των διαμήκων ημικυλινδρικών καμαρών (της ανατολικής και της δυτικής), δηλαδή με άλλα λόγια το ανατολικό και το δυτικό τόξο στο οποίο εδράζεται ο τρούλος του Κυρίως Ναού.
- Η κορυφή του ανατολικού τόξου του Νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού).
- Σχετικά μικρές περιοχές της βόρειας και της νότιας όψης.
- Μικρές περιοχές του τυμπάνου του τρούλου στα σύνορα των ανοιγμάτων.
- Σε μικρή έκταση οι γωνίες της βάσης του Κυρίως Ναού και των παραστάδων της βόρειας όψης (λόγω πάκτωσης του φορέα).

Τέλος, αξιοσημείωτη κρίνεται η ομοιότητα των αποτελεσμάτων των δυο αναλύσεων.



Εικόνα 9-4: Περιβάλλουσα των μέγιστων εφελκυστικών κυρίων τάσεων για την σεισμική καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στο Σύνταγμα. Όπως γίνεται εμφανές, οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας είναι λιγοστές και περιορίζονται στις εσωτερικές

απολήξεις των διαμήκων κεντρικών ημικυλινδρικών καμαρών (ανατολικής και δυτικής), στο ανατολικό τόξο του νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού), καθώς και σε μικρές περιοχές της περιμέτρου του Κυρίως Ναού. Τα μαρμάρινα στοιχεία τα οποία εικονίζονται γκρι, στην πραγματικότητα διαθέτουν πολύ υψηλότερη εφελκυστική αντοχή από την τοιχοποιία οπότε δεν κρίνεται ότι αστοχούν.

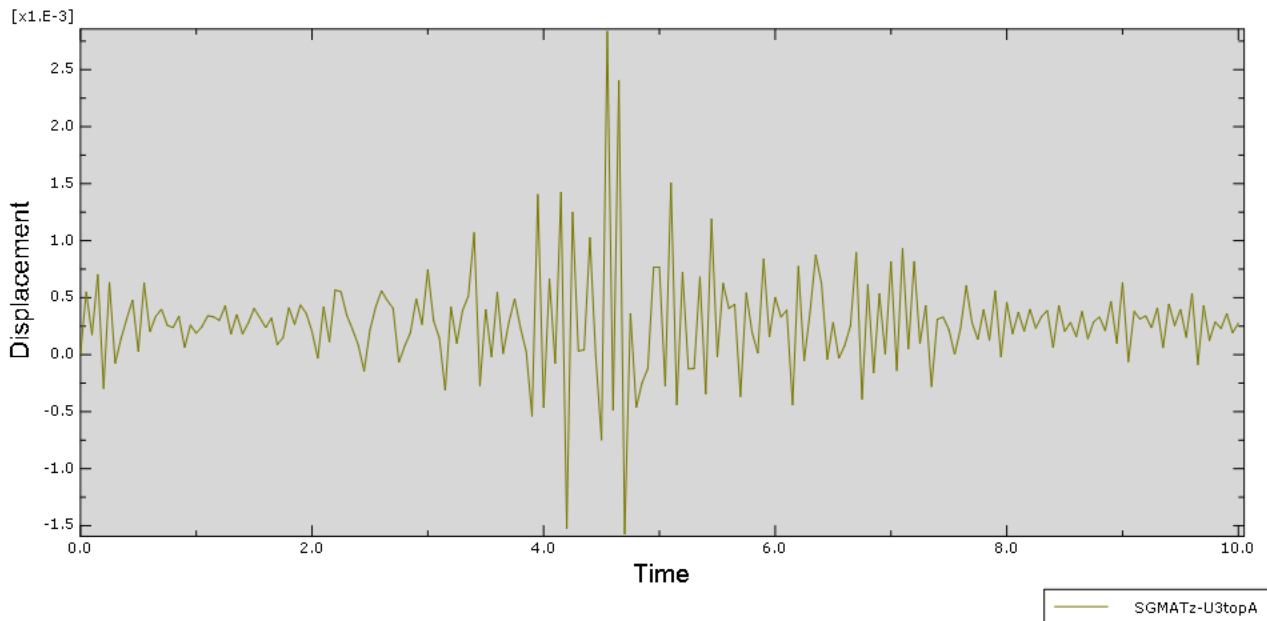


Εικόνα 9-5: Περιβάλλουσα των μέγιστων εφελκυστικών κυρίων τάσεων για την σεισμική καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Όπως γίνεται εμφανές, οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας είναι όμοιες με αυτές που προκύπτουν και από την προηγούμενη ανάλυση, με τη διαφορά ότι εδώ εμφανίζονται σημαντικές αστοχίες και στο κωδωνοστάσιο. Όπως επισημένεται και παραπάνω, τα στοιχεία από μάρμαρο που εμφανίζονται γκρι, δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι αστοχούν.

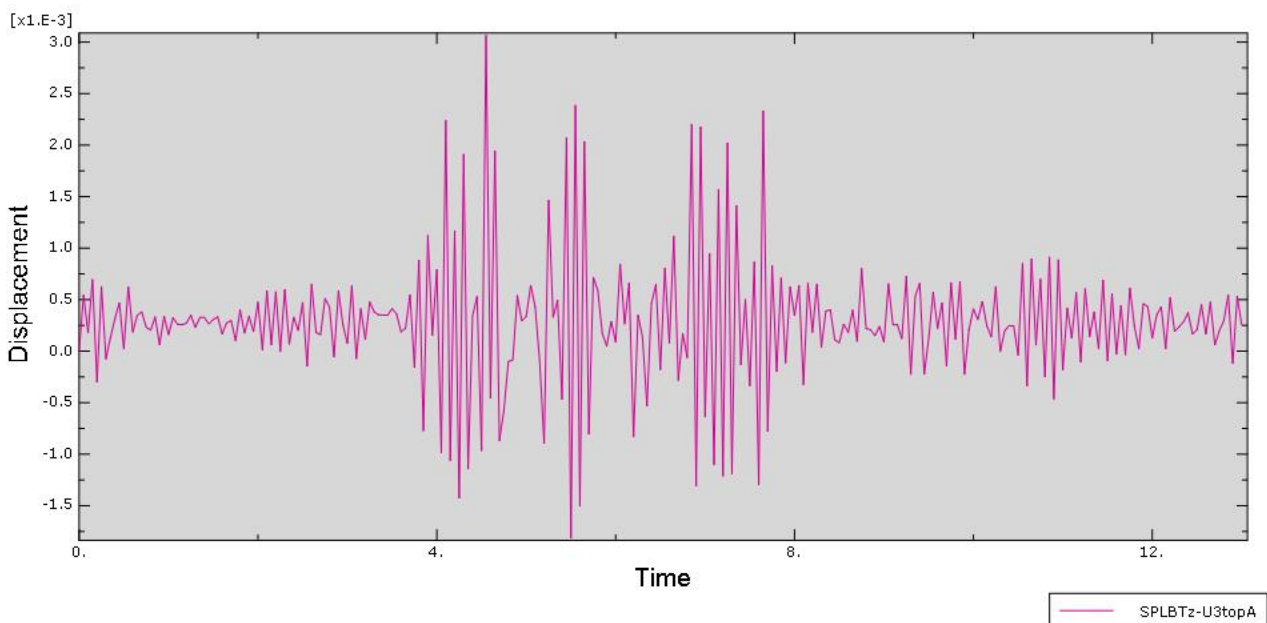
Σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση z (Α-Δ)

Μετακινήσεις: Από την εξέταση των χρονοϊστοριών των 2 επιλεγμένων ως χαρακτηριστικών σημείων (κορυφές τρούλων του Κυρίως Ναού και του Νάρθηκα) διαπιστώνεται ότι:

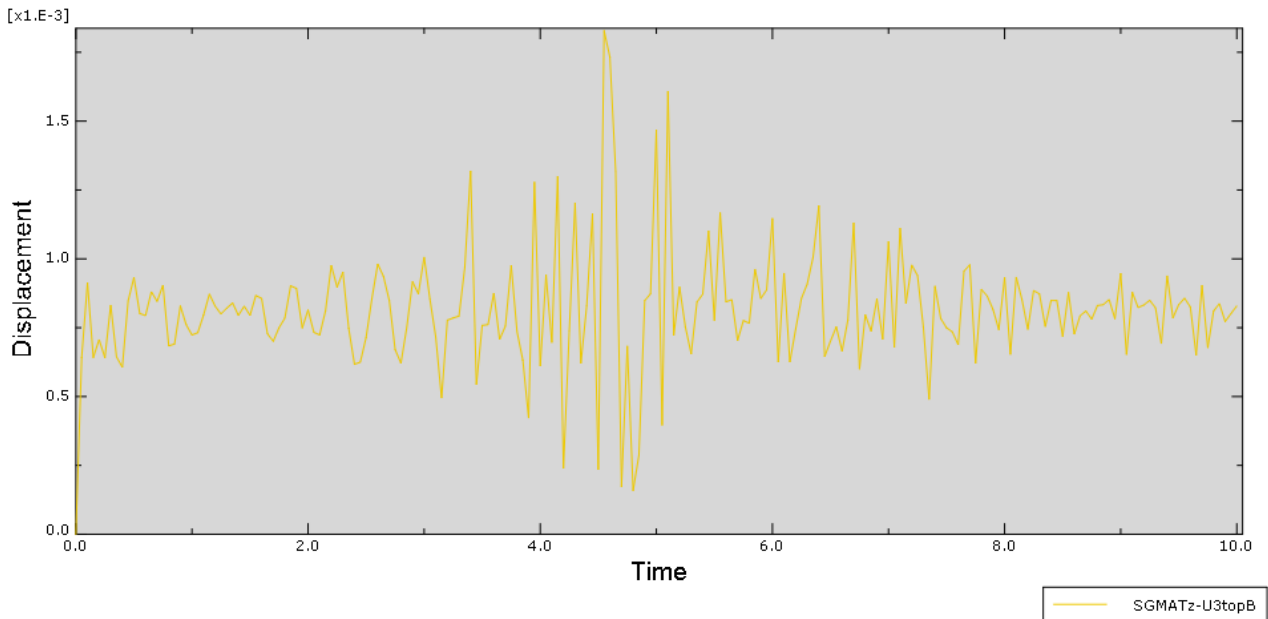
- Η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στην προσομοίωση του μνημείου (προσομοίωμα 3) οδηγεί σε πολύ μικρότερες μετακινήσεις στον Κυρίως Ναό και μετάκινήσεις Νάρθηκα που δεν μπορούν να προβλεφθούν τουλάχιστον από το “προσομοίωμα 2”. Συγκεκριμένα:
 - Η μέγιστη μετακίνηση που αναπτύσσει ο τρούλος του Κυρίως Ναού είναι **2,82 mm** και **3,1 mm** για την σεισμική καταγραφή στο Σύνταγμα και στα Σεπόλια αντίστοιχα, δηλαδή κατά μέσο όρο **2,96 mm έναντι 3,9 mm** και **4,2 mm** που δίνει το προσομοίωμα 2 μέσω Ι.Α.Φ.Α. και ανάλυσης χρονοϊστορίας αντίστοιχα και **4,07 mm** και **5,0 mm** που δίνει αντίστοιχα το προσομοίωμα 1.
 - Εν συντομία μπορεί να ειπωθεί ότι όσον αφορά τον Κυρίως Ναό το προσομοίωμα 3 υπό διαμήκη σεισμό, οδηγεί σε μετατοπίσεις που σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τις πιο απλουστευτικές αναλύσεις που προηγούνται, είναι **κατά πολύ μικρότερες**.
 - Ο τρούλος του Κυρίως Ναού αποκτά μια μικρή παραμένουσα μετατόπιση γύρω στα **0,25 mm**.
 - Η μέγιστη μετακίνηση που αναπτύσσει ο τρούλος του Νάρθηκα είναι **1,82 mm** και **1,92 mm** για την σεισμική καταγραφή στο Σύνταγμα και στα Σεπόλια αντίστοιχα, δηλαδή κατά μέσο όρο **1,87 mm έναντι 5,2 mm** και **4,5 mm** που δίνει το προσομοίωμα 2 μέσω Ι.Α.Φ.Α. και ανάλυσης χρονοϊστορίας αντίστοιχα και **1,0 mm** και **1,7 mm** που δίνει αντίστοιχα το προσομοίωμα 1.
 - Τα παραπάνω σημαίνουν, ότι όσον αφορά στον Νάρθηκα το προσομοίωμα 3 υπό εγκάρσιο σεισμό οδηγεί σε μετατοπίσεις που σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τις αναλύσεις επί του **προσομοιώματος 1** είναι της **ίδιας τάξης μεγέθους** αλλά **λίγο μεγαλύτερες**. Αντιθέτως το **προσομοίωμα 2** οδηγεί σε **αποτελέσματα ανώτερης τάξης μεγέθους**.
 - Ο Νάρθηκας αποκτά **παραμένουσα μετατόπιση προς τα ανατολικά** η οποία ανέρχεται σε **0,75 mm**.
- Σε όλες τις χρονοϊστορίες που υπολογίζονται και παρατίθενται παρακάτω, αρκετοί κύκλοι εμφανίζουν “σπασίματα”, δηλαδή “γωνιώδη” εξέλιξη της απεικονιζόμενης μετακίνησης. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα (1^η χρονική παράγωγος της μετακίνησης) παρουσιάζει ασυνέχειες, γεγονός που αντανακλά τα κρουστικά φαινόμενα που συμβαίνουν μεταξύ των σωμάτων εν επαφή.



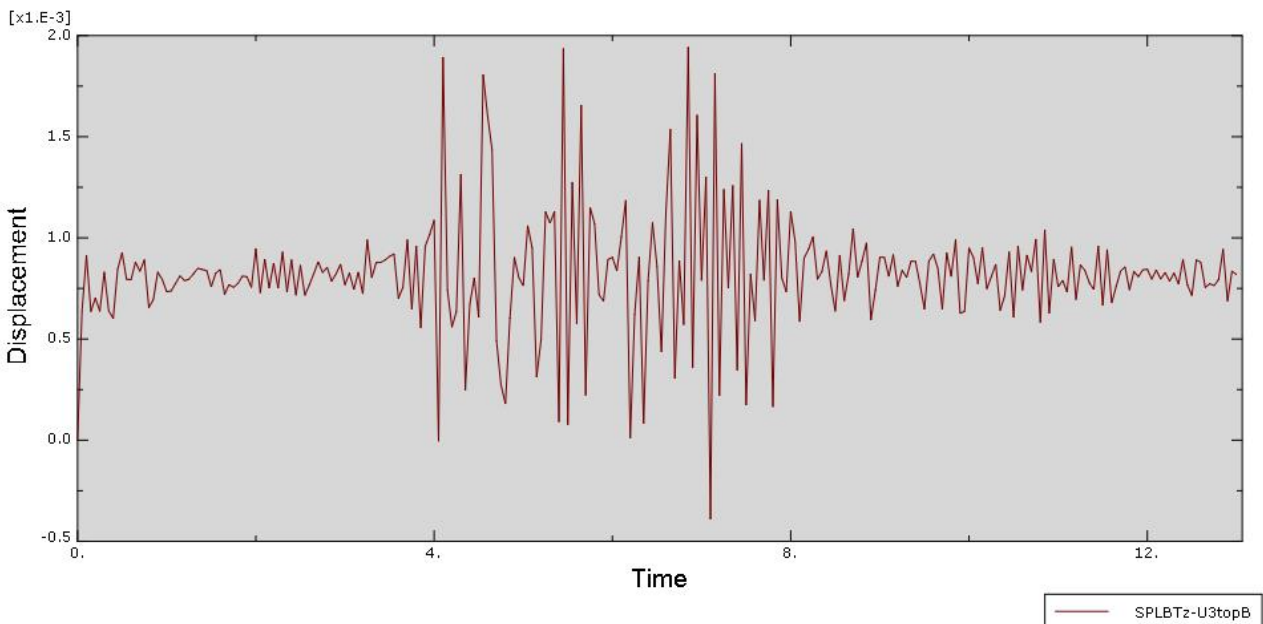
Εικόνα 9-6: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση z της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στο Σύνταγμα. Μέγιστη τιμή=2,82 mm στα 4,7 sec. Παρατηρείται ότι το κέντρο της ταλάντωσης είναι μετατοπισμένο περίπου κατά 0,25 mm σε σχέση με την αρχική θέση του σημείου. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.



Εικόνα 9-7: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση z της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Μέγιστη τιμή=3,1 mm στα 4,45 sec. Όπως και παραπάνω, παρατηρείται ότι το κέντρο της ταλάντωσης είναι μετατοπισμένο περίπου κατά 0,25 mm σε σχέση με την αρχική θέση του σημείου. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.



Εικόνα 9-8: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση z της κορυφής του τρούλου του Νάρθηκα για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στο Σύνταγμα. Μέγιστη τιμή=1,82 mm κατά τη χρονική στιγμή 4,45 sec. Σημειωτέον είναι το γεγονός ότι η χρονοϊστορία σε όλη της την έκταση έχει τη μορφή ταλάντωσης γύρω από σημείο κατά 0,75 mm μετατοπισμένο σε σχέση με την αρχική θέση, στην οποία δεν ξαναεπιστρέφει σε καμία στιγμή της χρονοϊστορίας, και ότι αυτή η μετατόπιση παραμένει και μετά την ολοκλήρωση της διέγερσης. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.



Εικόνα 9-9: Χρονοϊστορία μετακίνησης κατά τη διεύθυνση z της κορυφής του τρούλου του Νάρθηκα για σεισμική διέγερση από την καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Μέγιστη τιμή=1,92 mm κατά τη χρονική στιγμή 5,45 sec. Και εδώ παρατηρείται το φαινόμενο της μετατόπισης του κέντρου ταλάντωσης και η εν συνεχεία αντίστοιχη παραμένουσα μετατόπιση περί τα 0,8 mm. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.

Τάσεις: Όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση επιβολής της σεισμικής διέγερσης κατά τη διεύθυνση x, η κατανομή της μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης στο φορέα είναι σε

συμφωνία με τις χρονοϊστορίες των μετακινήσεων οι οποίες υπολογίστηκαν και σχολιάζονται παραπάνω. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι κατά πολύ ευμενέστερα από τα αντίστοιχα στα οποία οδηγούν οι αναλύσεις επί των προσομοιωμάτων "1" και "2" (βλέπε εικόνα 8-11). Σε αναλογία όμως με αυτά τα αποτελέσματα (των προγενέστερων αναλύσεων), το κτίριο (με την εξαίρεση του κωδωνοστασίου) αποδεικνύεται ότι **συμπεριφέρεται καλύτερα απ'όταν ο σεισμός επιβάλλεται κατά τη διεύθυνση x**. Λεπτομερέστερα οι περιοχές στις οποίες εμφανίζεται υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας είναι:

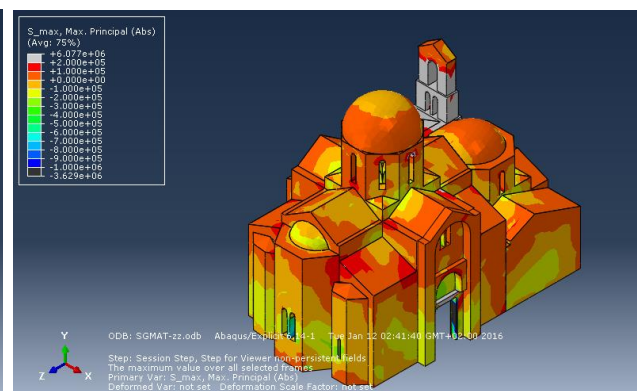
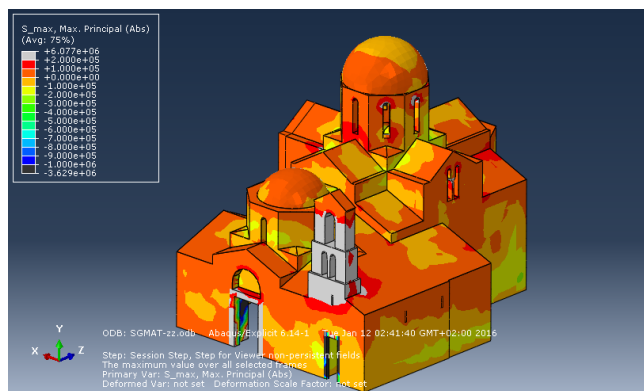
- Οι κορυφές των εσωτερικών απολήξεων των διαμήκων ημικυλινδρικών καμαρών (της ανατολικής και της δυτικής), δηλαδή με άλλα λόγια το ανατολικό και το δυτικό τόξο στο οποίο εδράζεται ο τρούλος του Κυρίως Ναού.
- Η κορυφή του ανατολικού τόξου του Νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού).
- Το κωδωνοστάσιο, το οποίο δεχόμενο τη σεισμική διέγερση κατά την ασθενή του διέγερση, εμφανίζει υπέρβαση της εφελκυστικής του αντοχής σχεδόν στο σύνολο της έκτασής του.

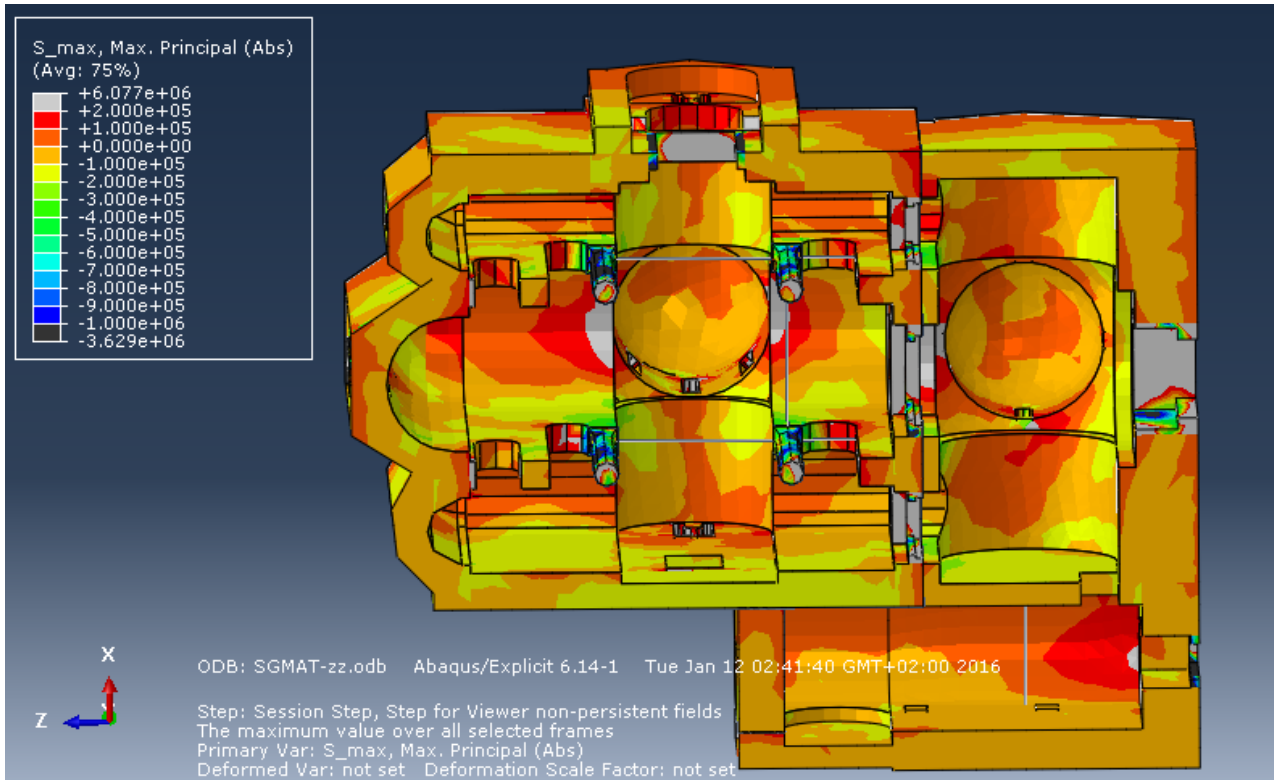
Κατά ένα μεγάλο μέρος, η παθολογία του κτιρίου που προκύπτει από την επιβολή της σεισμικής διέγερσης κατά τις δυο διευθύνσεις είναι κοινή:

- Υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής στις κορυφές των εσωτερικών απολήξεων των διαμήκων ημικυλινδρικών καμαρών του Κυρίως Ναού
- Υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής στην κορυφή του ανατολικού κεντρικού τόξου του Νάρθηκα

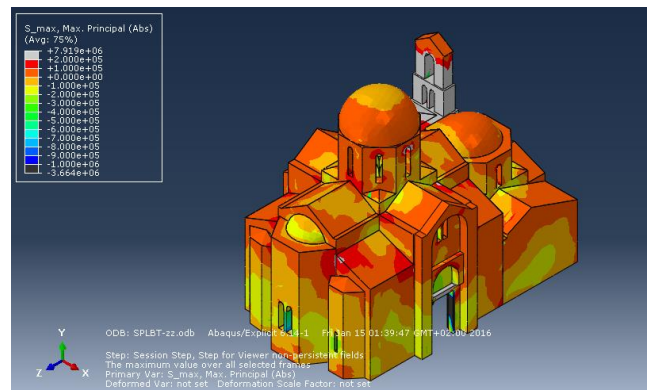
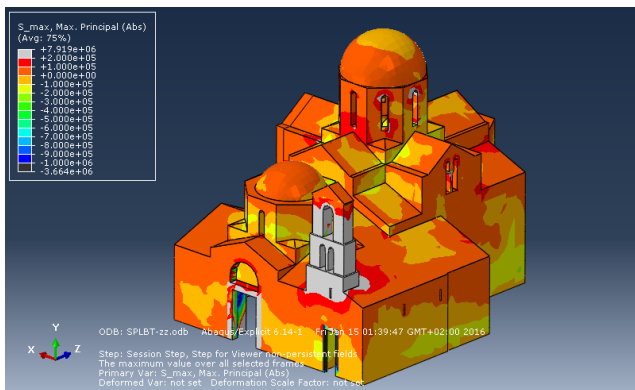
Διαφέρουν όμως ως προς:

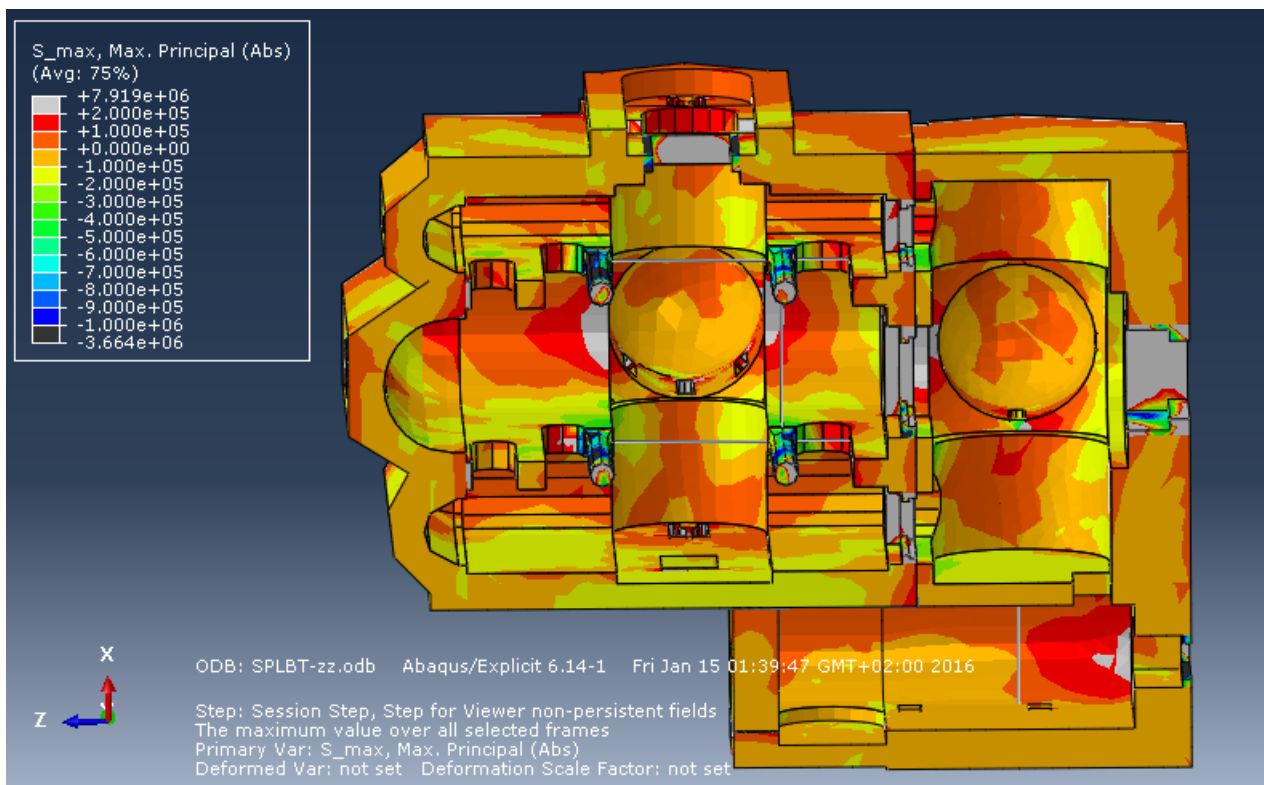
- Την καταπόνηση του κωδωνοστασίου, η οποία σε διαμήκη σεισμό είναι πολύ σφοδρότερη.
- Τις υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής στην περίμετρο του Κυρίως Ναού που εμφανίζονται στην περίπτωση εγκάρσιου σεισμού (κατά x), όμως εκλείπουν στον διαμήκη.
- Ο μέγιστος κύριος εφελκυσμός που αναπτύσσεται (λόγω πάκτωσης) στη βάση της κατασκευής είναι μικρότερος στην περίπτωση διαμήκους σεισμού.





Εικόνα 9-10: Περιβάλλουσα των μέγιστων εφελκυστικών κυρίων τάσεων για την σεισμική καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στο Σύνταγμα. Όπως γίνεται εμφανές, οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας είναι λιγοστές και περιορίζονται στις εσωτερικές απολήξεις των διαμήκων κεντρικών ημικυλινδρικών καμαρών (ανατολικής και δυτικής), στο ανατολικό τόξο του νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού), καθώς και εκτεταμένη υπέρβαση τάσεων στο κωδονοστάσιο. Τα μαρμάρινα στοιχεία τα οποία εικονίζονται γκρι, στην πραγματικότητα διαθέτουν πολύ υψηλότερη εφελκυστική αντοχή από την τοιχοποιία οπότε δεν κρίνεται ότι αστοχούν.





Εικόνα 9-11: Περιβάλλουσα των μέγιστων εφελκυστικών κυρίων τάσεων για την σεισμική καταγραφή του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Όπως γίνεται εμφανές, οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας είναι όμοιες με αυτές που προκύπτουν και από την προηγούμενη ανάλυση χωρίς σημαντικές διαφορές.

Σεισμική διέγερση και κατά τις 2 διευθύνσεις

Μετακινήσεις: Οι μέγιστες μετακινήσεις που αναπτύσσει το μνημείο στην κάθε διεύθυνση είναι παρεμφερείς με τις μέγιστες μετακινήσεις που αναπτύσσει λόγω διέγερσής του κατά την αντίστοιχη διέγερση. Ακολούθως παρατίθεται ένας πίνακας που παραθέτει συγκεντρωτικά και συγκριτικά τις μέγιστες μετακινήσεις των δυο επιλεγμένων σημείων ελέγχου (κορυφές τρούλου του Κυρίως Ναού και του Νάρθηκα) για σεισμική διέγερση και κατά τις δυο διευθύνσεις σύμφωνα με όλα τα προσομοιώματα και τις εφαρμοσθείσες μεθόδους ανάλυσης:

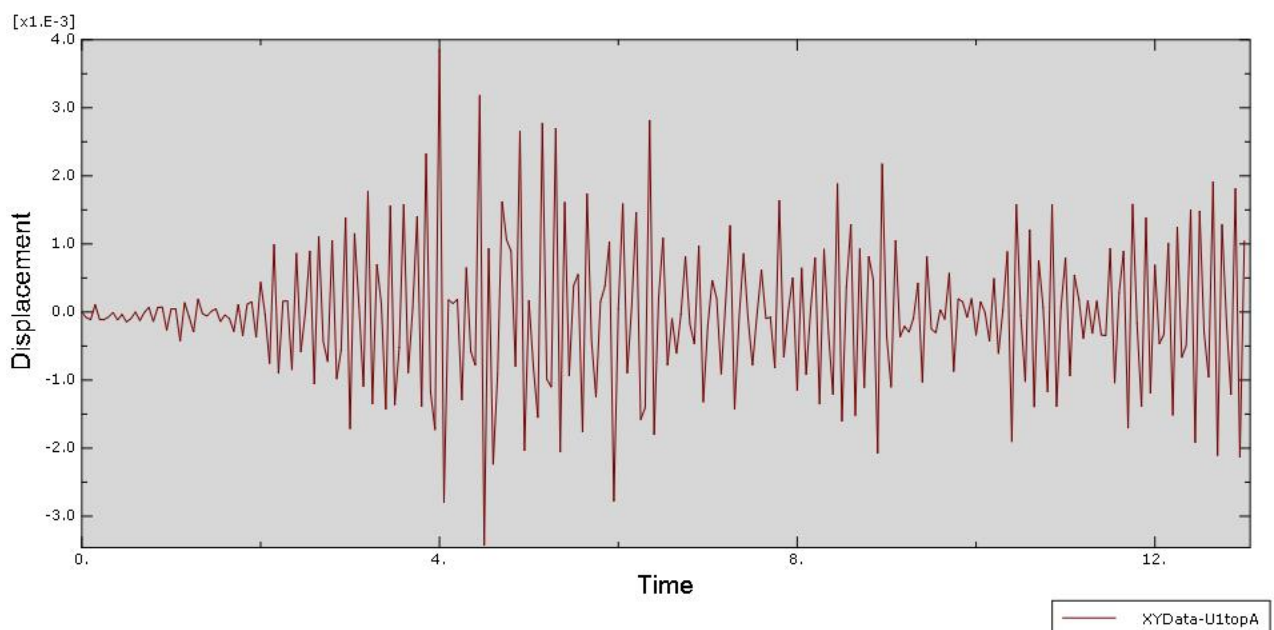
		ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ 1				ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ 2				ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ 3
		Ι.Α.Φ.Α.		Τ.Η.		Ι.Α.Φ.Α.		Τ.Η.		Τ.Η.
		α1 (mm))	(α1- β)/β %	α2 (mm))	(α2- β)/β %	α3 (mm))	(α3- β)/β %	α4 (m m)	(α4- β)/β %	β (mm)
σημείο Α	U 1	5,35	+33,75 %	4,4	+10,00 %	5,75	+43,75 %	4,5	+12,50 %	4
	U 3	4,15	+43,10 %	5,3	+82,76 %	3,83	+32,07 %	3,2	+10,34 %	2,9

σημείο B	U 1	1,52	+8,57 %	1,6	+14,3 %	1,86	+32,86 %	2,6	+85,71 %	1,4
	U 3	0,95	-52,5	1,7	-15,0 %	3,25	+62,50 %	4,5	+125,0 %	2

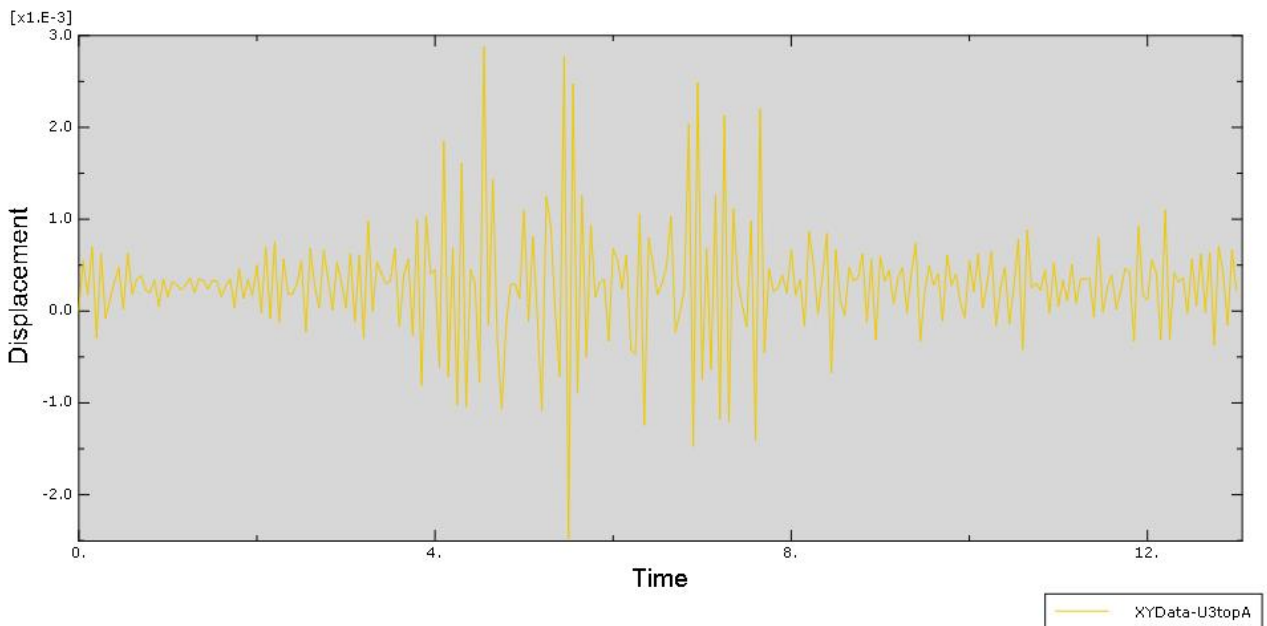
Πίνακας 9-1 Μέγιστες μετακινήσεις της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού (σημείο A) και του Νάρθηκα (σημείο B) για σεισμό και κατά τις δυο διευθύνσεις σύμφωνα με όλες τις αντίστοιχες αναλύσεις που λαμβάνουν χώρα στην εργασία. Ός μέτρο σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα του “προσομοιώματος3”.

Όπως είναι εμφανές, σημείο αναφοράς για τον παραπάνω πίνακα αποτελούν οι μετακινήσεις οι οποίες προκύπτουν από το προσομοίωμα 3 καθώς είναι το ρεαλιστικότερο και ως εκ τούτου τα αποτελέσματά του κρίνονται ως τα αληθέστερα. Στον πίνακα αυτό, συμπυκνώνονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

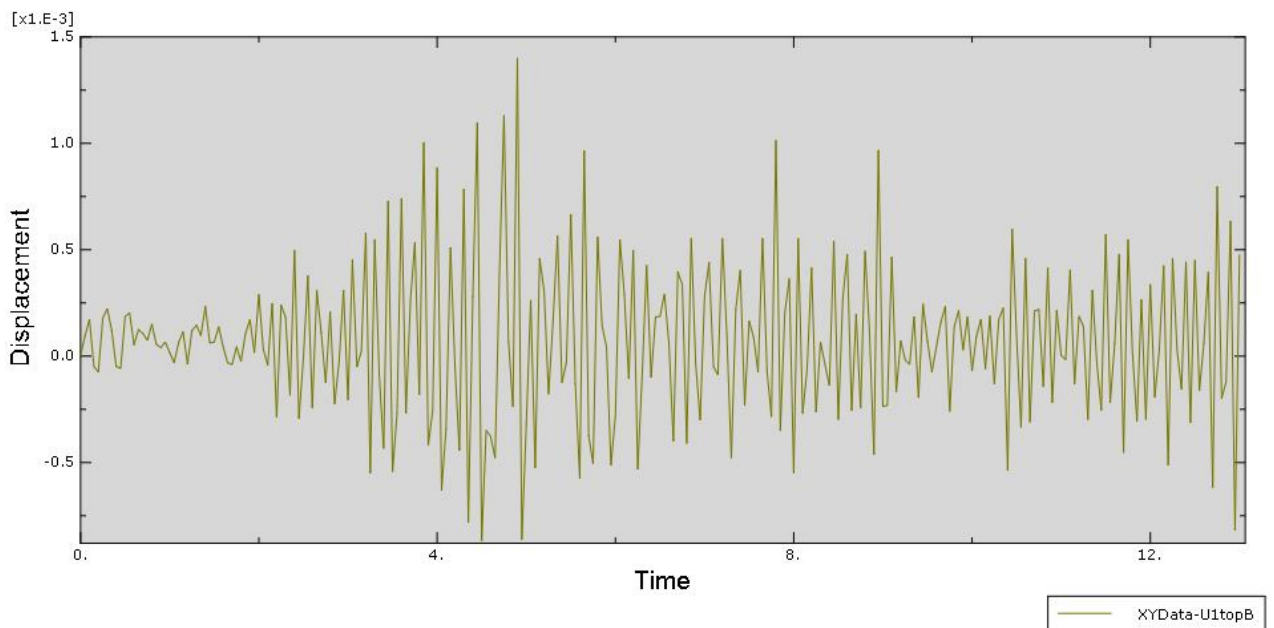
- Οι μετακινήσεις του σημείου A (κορυφή του τρούλου του Κυρίως Ναού) **υπερεκτιμώνται από όλες τις αναλύσεις επί των προσομοιωμάτων “1” και “2”**.
- Μεταξύ των αναλύσεων αυτών, εκείνη που παρατηρείται να αποδίδει πιστότερα την συμπεριφορά του σημείου A (και κατ’έπекτασιν του συνόλου του Κυρίως Ναού) είναι **οι αναλύσεις χρονϊστορίας επί του προσομοϊώματος 2, δηλαδή επί του Κυρίως Ναού θεωρούμενου ως ένα ανεξάρτητο σώμα**.
- Οι μετακινήσεις του σημείου B (κορυφή του τρούλου του Νάρθηκα) κατά τον άξονα x (B-N) απόδίδονται ικανοποιητικά άν και κάπως συντηρητικά από το προσομοϊωμα 1.
- Αντιθέτως οι μετακινήσεις του ίδιου σημείου κατά τον άξονα z (A-Δ) υποτιμώνται σημαντικά από το προσομοϊωμα 1.
- Το προσομοϊωμα 2 κρίνεται τελείως ακατάλληλο για το Νάρθηκα. Υπερεκτιμά υπερβολικά τις μετακινήσεις του, ιδίως κατά τη διεύθυνση z.



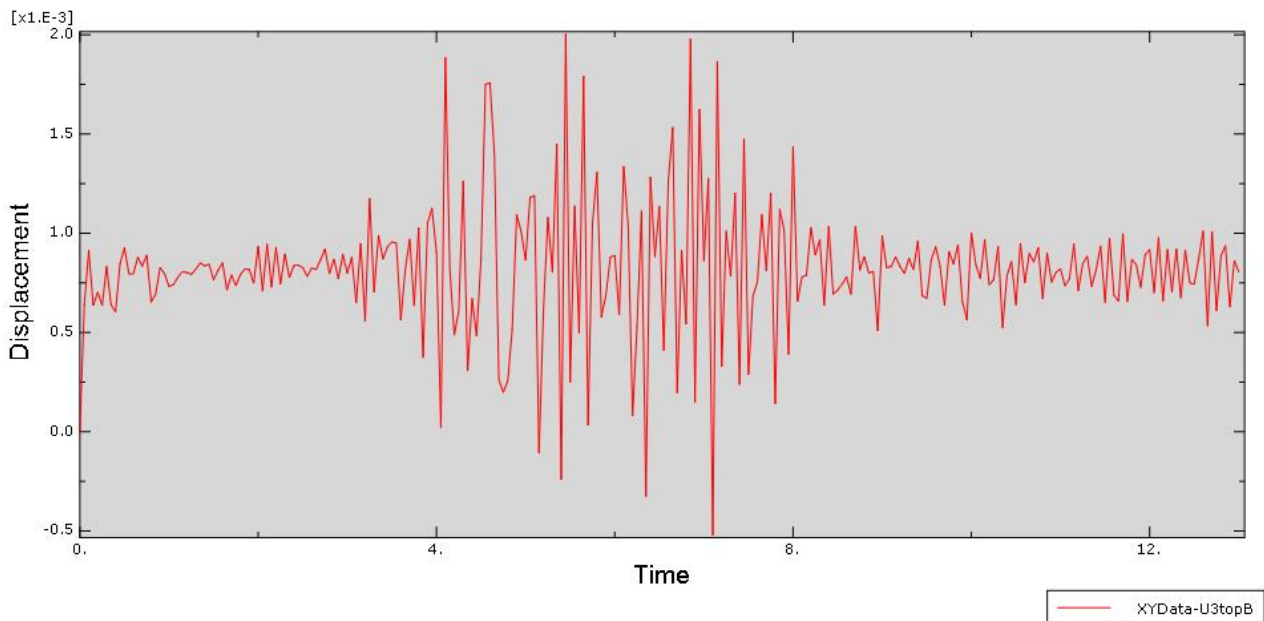
Εικόνα 9-12: Μετακινήσεις της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού κατά τη διεύθυνση x με μέγιστη τιμή= 4,0 mm στα 4 sec. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.



Εικόνα 9-13: Μετακινήσεις της κορυφής του τρούλου του Κυρίως Ναού κατά τη διεύθυνση z με μέγιστη τιμή=2,9 mm στα 4,55 sec. Και εδώ παρατηρείται η μετατόπιση του κέντρου ταλάντωσης και εν συνεχεία μόνιμη μετατόπιση σε σχέση με την αρχική θέση (κατά 0,25 mm). Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.



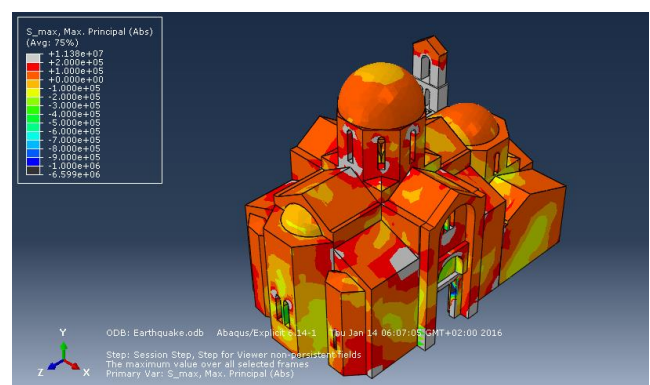
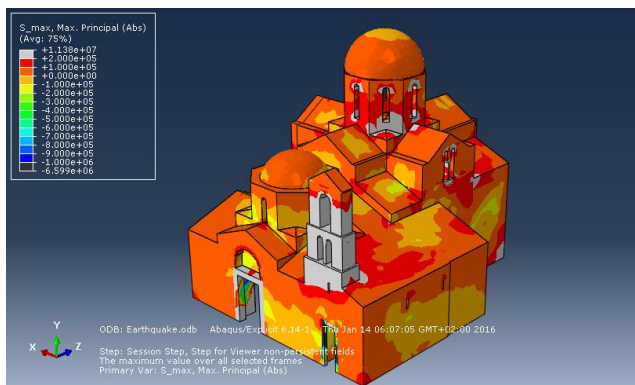
Εικόνα 9-14: Μετακινήσεις κορυφής του τρούλου του Νάρθηκα κατά τη διεύθυνση x με μέγιστη τιμή=1,4 mm στα 4,9 sec. Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.

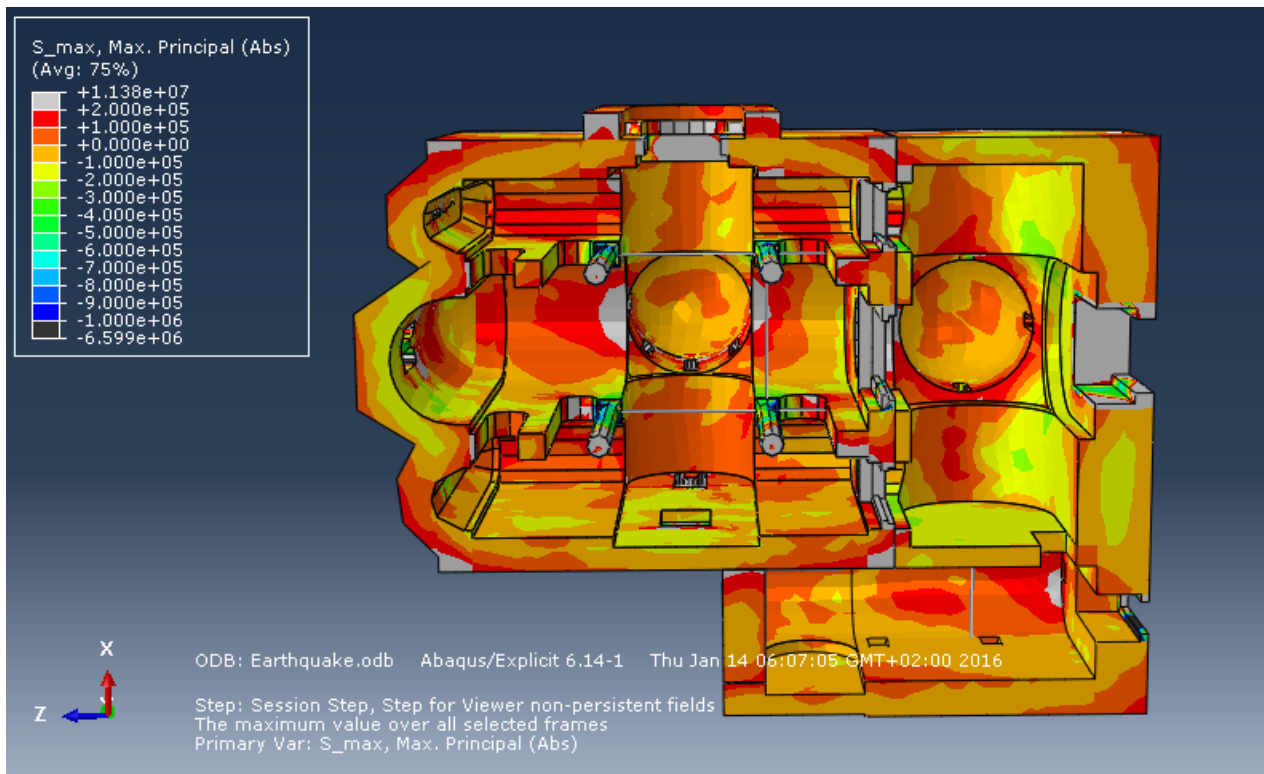


Εικόνα 9-15: Μετακινήσεις κορυφής του τρούλου του Νάρθηκα κατά τη διεύθυνση z με μέγιστη τιμή=2,00 mm στα 5,5 sec. Και εδώ παρατηρείται η μετατόπιση του κέντρου ταλάντωσης και εν συνεχεία μόνιμη μετατόπιση σε σχέση με την αρχική θέση (κατά 0,75 mm). Σε αρκετούς κύκλους μετακίνησης διακρίνονται “σπασίματα”.

Τάσεις: Για τις βλάβες που εμφανίζονται με την άσκηση σεισμικών διεγέρσεων στο Ναό και κατά τις δυο διεθύνσεις, λίγο πολύ προϋδεάζει η ένταση που αναπτύσσεται με την επιβολή των 2 συνιστωσών ξεχωριστά. Υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής παρουσιάζουν:

- Οι κορυφές των εσωτερικών απολήξεων των διαμήκων ημικυλινδρικών καμαρών (της ανατολικής και της δυτικής), δηλαδή με άλλα λόγια το ανατολικό και το δυτικό τόξο στο οποίο εδράζεται ο τρούλος του Κυρίως Ναού.
- Η κορυφή του ανατολικού τόξου του Νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού).
- Η βάση του τυμπάνου του τρούλου στην νοτιοδυτική της πλευρά.
- Η σύνδεση του τυμπάνου του τρούλου με τη βόρεια κεντρική ημικυλινδρική καμάρα.
- Οι γωνίες της βάσης του Κυρίως Ναού και των παραστάδων της βόρειας όψης (λόγω πάκτωσης του φορέα).
- Σε ιδιαίτερα μεγάλη έκταση το κωδωνοστάσιο.





Εικόνα 9-16: Περιβάλλουσα των μέγιστων κύριων εφελκυστικών τάσεων για σεισμική διέγερση και κατά τις 2 διευθύνσεις με εφαρμογή των χρονοϊστοριών εδαφικών επιταχύνσεων από τις 2 καταγραφές του σεισμού της Πάρνηθας στα Σεπόλια. Όπως γίνεται εμφανές, οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας περιορίζονται στις εσωτερικές απολήξεις των κύριων διαμήκων ημικυλινδρικών καμαρών (ανατολικής και δυτικής), στο ανατολικό τόξο του νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού), σε σχετικά μικρές περιοχές στο τύμπανο του τρούλου καθώς και σε μικρές περιοχές της περιμέτρου του Κυρίως Ναού. Εκτεταμένη υπέρβαση τάσεων αναπτύσσεται στο κωδωνοστάσιο.

Η σύγκριση με τις προγενέστερες σχετικές αναλύσεις (βλέπε εικόνα 8-18) αποδεικνύει ότι και σε αυτήν την περίπτωση, της άσκησης της σεισμικής δράσης και κατά τις 2 διευθύνσεις, η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στην προσομοίωση ασκεί καθοριστική επίδραση στα αποτελέσματα των εντατικών μεγεθών, ελαττώνοντάς τα δραστικά. Για την διασταύρωση και την προσπάθεια ποσοτικοποίησης αυτής της διαπίστωσης μορφώνεται ο παρακάτω πίνακας:

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ 1				ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ 2				ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ 3
	I.A.Φ.A.		T.H.		I.A.Φ.A.		T.H.		T.H.
	α1 (KN m)	(α1- β)/β %	α2 (KNm)	(α1- β)/β %	α3 (KN m)	(α1- β)/β %	α4 (KN m)	(α1- β)/β %	β (KNm)
Ροπή βάσης τρούλου Κυρίως Ναού	884, 6	+21,46 %	1569	+115,43 %	966, 7	+32,73 %	805, 2	+10,56 %	728,3

Πίνακας 9-2: Παρατίθενται οι μέγιστες τιμές της ροπής της βάσης του τρούλου του Κυρίως Ναού για σεισμό και κατά τις 2 διευθύνσεις, όπως αυτές προκύπτουν από τις εναλλακτικές προσομοιώσεις του φορέα και τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης που εφαρμόζονται επ'αυτών. Ως μέτρο σύγκρισης επιλέγονται τα αποτελέσματα του ρεαλιστικότερου προσομοιώματος 3.

Παρατείνεται ότι τα παραπάνω συγκριτικά αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τα συγκριτικά αποτελέσματα επί των μετακινήσεων που παρατίθενται στον πίνακα 9-1 και εν συντομία είναι τα εξής:

- Οι ροπές του τρούλου του Κυρίως Ναού **υπερεκτιμώνται από όλες τις αναλύσεις επί των προσομοιωμάτων "1" και "2"**.
- Μεταξύ των αναλύσεων αυτών, εκείνη που παρατηρείται ότι προσεγγίζει περισσότερο τα αποτελέσματα του προσομοιώματος 3 είναι **η ανάλυση χρονοϊστορίας επί του προσομοιώματος 2, δηλαδή επί του Κυρίως Ναού θεωρούμενου ως ένα ανεξάρτητο σώμα** γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με το συμπέρασμα της συγκριτικής αντιπαραβολής των μετακινήσεων του τρούλου του Κυρίως Ναού (βλέπε πίνακα 9-1 και σχετικό σχολιασμό).
- Επιβεβαιώνεται ότι η καλύτερη επιλογή γραμμικής ανάλυσης, είναι **η ανάλυση χρονοϊστορίας στον Κυρίως Ναό θεωρούμενο ως ανεξάρτητο σώμα**.

9.3 Διεξοδικότερη εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς του μνημείου

Στη φάση αυτή σκόπιμη κρίνεται μια διεξοδικότερη εξέταση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου, όπως αυτή προκύπτει από τα αποτελέσματα της εξεταζόμενης προσομοίωσης (προσομοίωμα 3) για άσκηση της σεισμικής διέγερσης και κατά τις 2 διευθύνσεις. Για τις ανάγκες αυτού του σκοπού επιλέγεται να εξεταστεί η εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση που αναπτύσσεται κατά τις δυσμενέστερες για κάθε κύρια διεύθυνση φάσεις της απόκρισης, μέσω τομών του φορέα κατά την ανάλογη διεύθυνση, κατά μήκος των 2 κύριων κλιτών του Καθολικού.

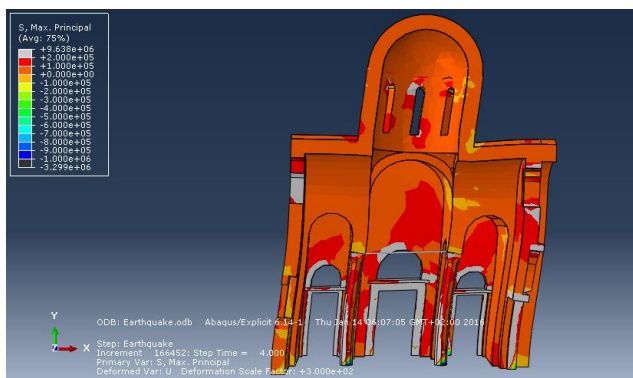
Για τη διαδικασία αυτή, αξιοποιείται κατάλληλα το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του φορέα το οποίο έχει εισαχθεί κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης και είναι το εξής:

- Ο άξονας 1 είναι παράλληλος στους οριζόντιους αρμούς.
- Ο άξονας 2 είναι κάθετος στους οριζόντιους αρμούς.
- Ο άξονας 3 είναι κάθετος στο πάχος της τοιχοποιίας με φορά προς τα έξω.

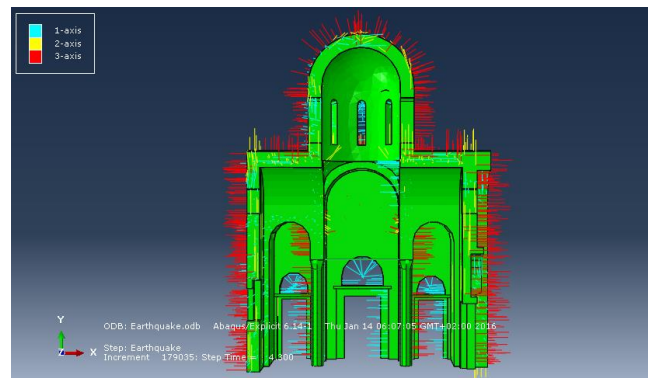
Χρονική στιγμή $t=4,00$ sec

Κατ'αυτή τη χρονική στιγμή ο φορέας αναπτύσσει τις μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις (βλέπε εικόνα 9-12). Η εξέταση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων αποκαλύπτει τα εξής για την εγκάρσια συμπεριφορά του Κυρίως Ναού:

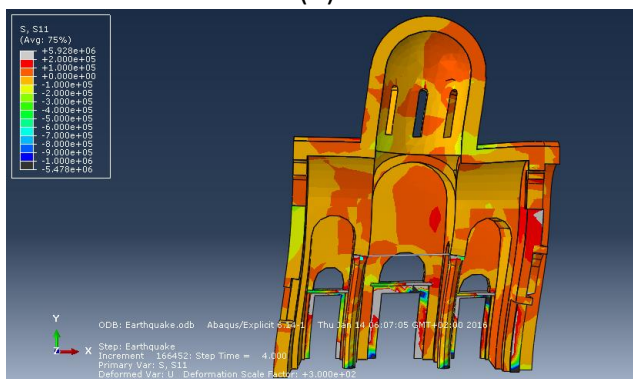
- Οι μέγιστες κύριες τάσεις είναι στο μεγαλύτερο μέρος του φορέα εφελκυστικές και σε αρκετές περιοχές ξεπερνούν τα 100 KPa (δηλαδή το 50% της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας).
- Περιορισμένη ύπαρξη περιοχών με υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής.
- Η κατανομή της s11 δείχνει ότι η αστοχία που εμφανίζεται στο τύμπανο της βόρειας κεραιάς (κάτω απ'το παράθυρο) οφείλεται σε οριζόντιο εφελκυσμό. Η προσδευτική διεύρυνσή της "γκρίζας" περιοχής προς την εξωτερική παρειά σε συνάφεια με την παραμορφωμένη εικόνα του φορέα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι **η αστοχία προκαλείται από εκτός του επιπέδου του τοίχου κάμψη**.
- Οι δυσανάλογα υψηλές θλιπτικές τάσεις s22 που αναπτύσσονται στους κατακόρυφους πεσσούς του βόρειου τμήματος (δεδομένου του προσανατολισμού των αρμών, πρόκειται για κατακόρυφη θλίψη) συνεπάγονται την ύπαρξη **σημαντικών ροπών ανατροπή**. Η διαπίστωση αυτή ενισχύεται από τον σχετικά υψηλό κύριο εφελκυσμό στις γωνίες της βάσης του Κυρίως Ναού για εγκάρσιο σεισμό που επισημαίνεται παραπάνω.
- Οι υψηλές ενδοεπίπεδες διατμητικές τάσεις (s12) που αναπτύσσονται στις εγκάρσιες ημικυλινδρικές καμάρες και κυρίως στον δυτικό τοίχο του Κυρίως Ναού υποδεικνύουν ως **κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς των οριζόντιων αδρανειακών φορτίων την διάτμηση εντός του επιπέδου της τοιχοποιίας**, ιδίως της οροφής και των περιμετρικών τοίχων, γεγονός που συνάδει με την εμφάνιση υψηλών ροπών ανατροπής.



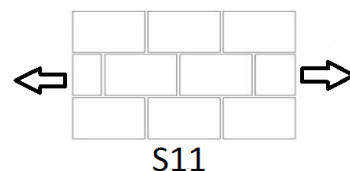
(α)

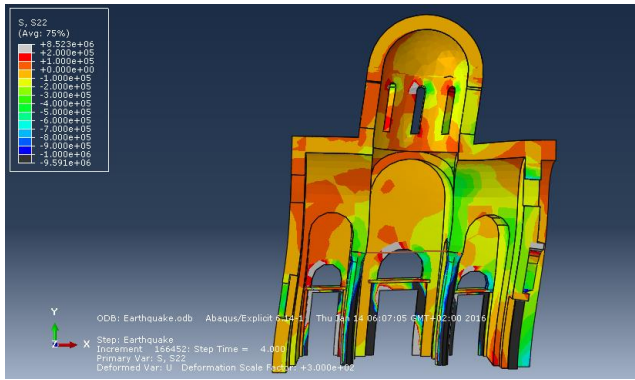


(ε)

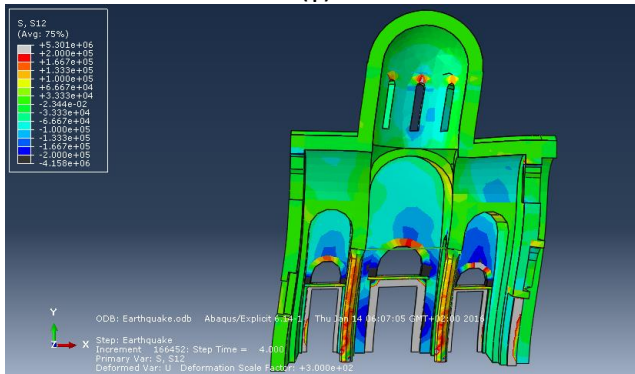


(β)





(γ)



(δ)

Εικόνα 9-17: Εντατική κατάσταση κατά τη χρονική στιγμή $t=4$ sec. (α) Μέγιστη κύρια εφελκυστική τάση, (β) Ορθή τάση παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς, (γ) Ορθή τάση κάθετη στους οριζόντιους αρμούς, (δ) Διάτμηση παράλληλη με τους αρμούς της τοιχοποιίας και (ε) προσανατολισμός αξόνων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

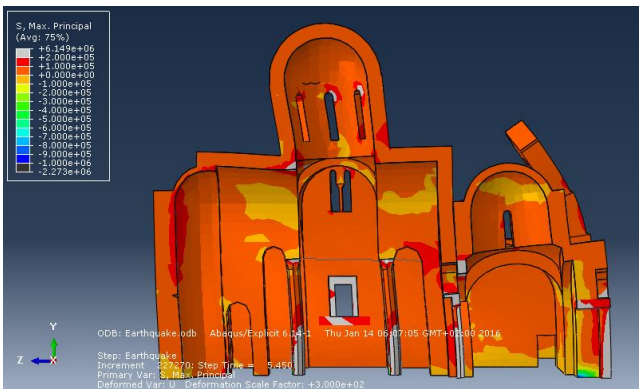
Χρονικές στιγμές $t=5,45$ sec και $t=5,50$ sec

Αυτές οι χρονικές στιγμές εντάσσονται σε περίοδο έντονων διαμήκων ανακυκλίσεων (βλέπε εικόνα 9-13). Η εξέταση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων αποκαλύπτει τα εξής για τη διαμήκη συμπεριφορά του μνημείου:

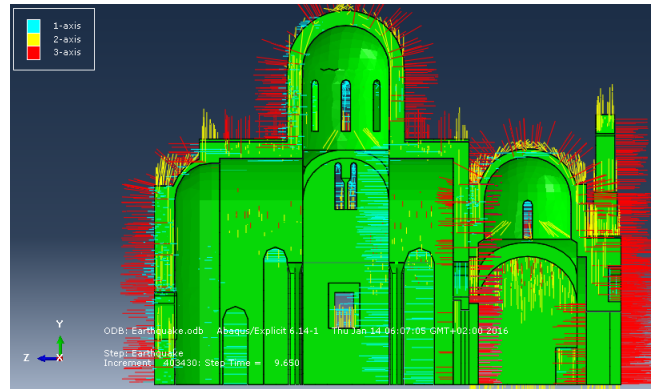
- Υψηλές μέγιστες κύριες τάσεις. Πολλές από τις υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας που εμφανίζονται στην περιβάλλουσα του μέγιστου κύριου εφελκυσμού (βλέπε εικόνα 9-6) αναπτύσσονται σε αυτές τις φάσεις:
 - Αστοχία της κορυφής της εσωτερικής απόληξης της ανατολικής ημικυλινδρικής καμάρας. ($t=5,45$ sec)
 - Αστοχία του ανατολικού κεντρικού τόξου του Νάρθηκα (που πλαισιώνει την κεντρική είσοδο του Κυρίως Ναού). ($t=5,45$ sec)
 - Αστοχίες πλησίον των άκρων των ανοιγμάτων του τρούλου του Κυρίως Ναού.
 - Αστοχία στη σύνδεση του τυμπάνου του τρούλου με την ανατολική ημικυλινδρική καμάρα. ($t=5,50$ sec)
- Η εξέταση της s11 δείχνει την ύπαρξη υψηλών οριζόντιων ορθών τάσεων που δρουν κατά μήκος των ημικυλινδρικών καμαρών (ιδίως για $t=5,50$ sec) οι οποίες είναι εντονότερες στη σύνδεση με το τύμπανο του τρούλου. Αυτό υποδεικνύει την **ύπαρξη μηχανισμού μεταβίβασης των τεμνουσών δυνάμεων του τρούλου από τις ημικυλινδρικές καμάρες μέσω οριζόντιων αξονικών δυνάμεων.**

- Οι τάσεις αυτές συμβάλλουν τα μέγιστα στην αστοχία της σύνδεσης του τυμπάνου του τρούλου με την ανατολική ημικυλινδρική καμάρα κατά τη χρονική στιγμή $t=5,50$ sec.

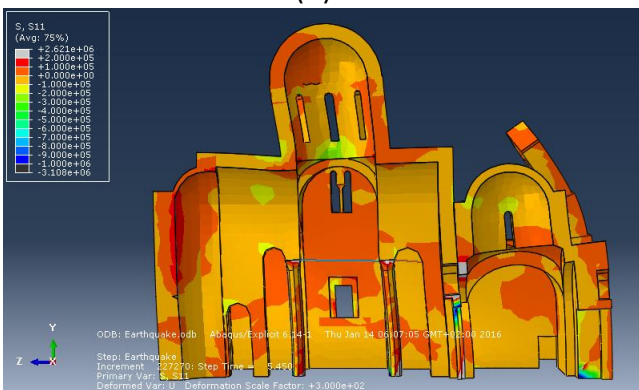
- Η αστοχία της κορυφής της εσωτερικής απόληξης της ανατολικής ημικυλινδρικής καμάρας ($t=5,45$ sec) ανάγεται στην ύπαρξη υψηλού εφελκυσμού που δρα κάθετα στους αρμούς (s22) και αποδίδεται στην κατακόρυφη – προς τα κάτω – δύναμη που προκύπτει από την κάμψη του τρούλου.
- Οι δυσανάλογα υψηλές s22 που αναπτύσσονται στους πεσσούς ακριβώς κάτω από την εκάστοτε “θλιβόμενη περιοχή” του τρούλου ($t=5,45$ και $5,50$ sec) αναδεικνύουν τον κυρίαρχο ρόλο που διαδραματίζουν οι κίνες στην παραλαβή των κατακόρυφων δυνάμεων οι οποίες προκύπτουν από την κάμψη του τρούλου.
- Τόσο στους εσωτερικούς πεσσούς όσο και στην περιμετρική τοιχοποιία, σε εκτεταμένες περιοχές αναπτύσσονται υψηλές (σε σχέση με τον κύριο εφελκυσμό) ενδοεπίπεδες διατμητικές τάσεις (s12), γεγονός που αποδεικνύει τον κυρίαρχο ρόλο τους στην μεταβίβαση των οριζόντιων αδρανειακών φορτίων του σεισμού.



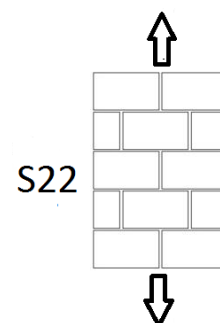
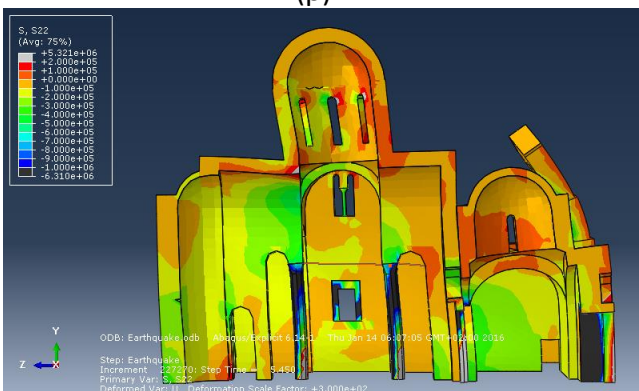
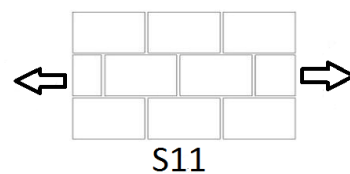
(α)

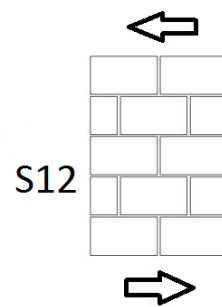
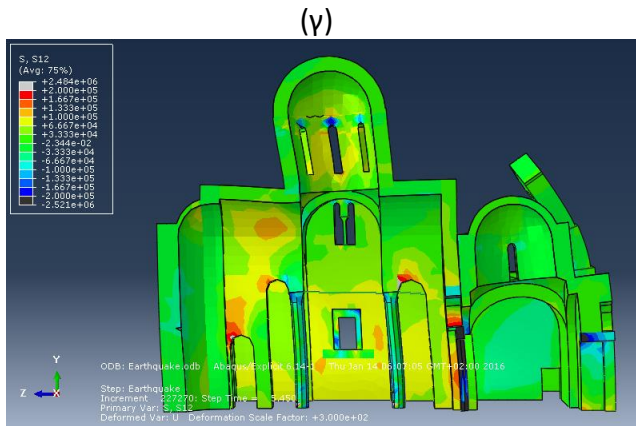


(ε)



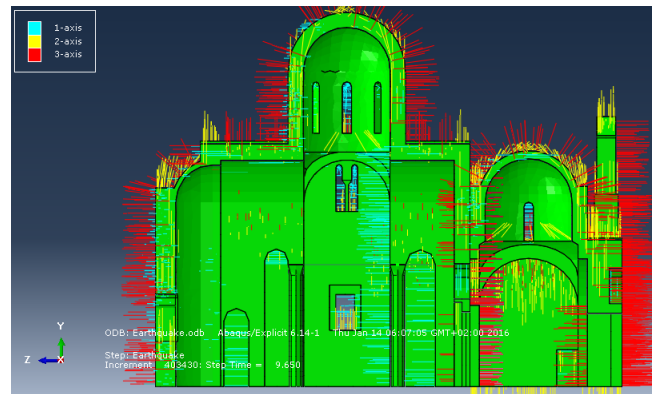
(β)



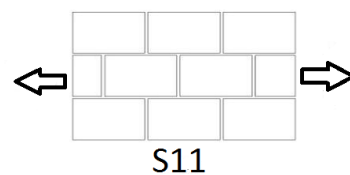
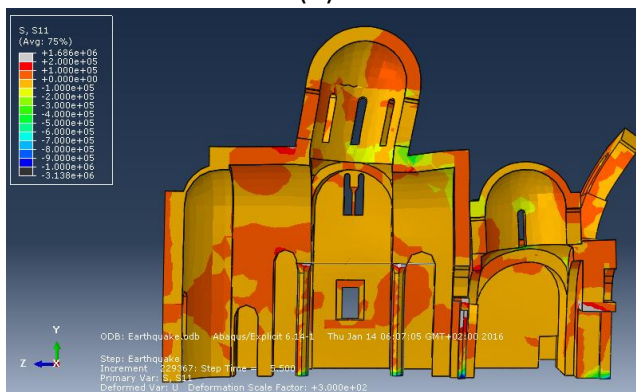


(δ)

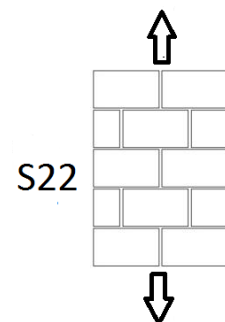
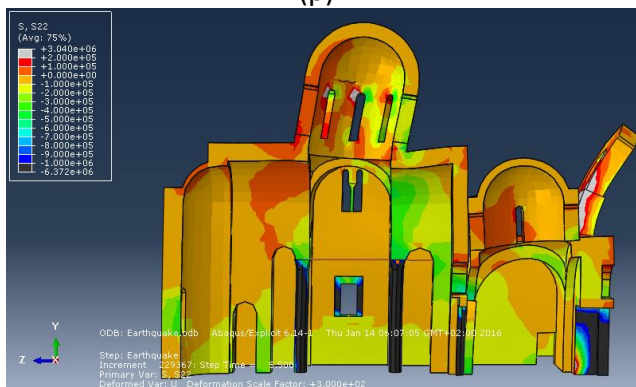
Εικόνα 9-18: Εντατική κατάσταση κατά τη χρονική στιγμή $t=5,45$ sec. (α) Μέγιστη κύρια εφελκυστική τάση, (β) Ορθή τάση παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς, (γ) Ορθή τάση κάθετη στους οριζόντιους αρμούς, (δ) Διάτμηση παράλληλη με τους αρμούς της τοιχοποιίας και (ε) προσανατολισμός αξόνων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

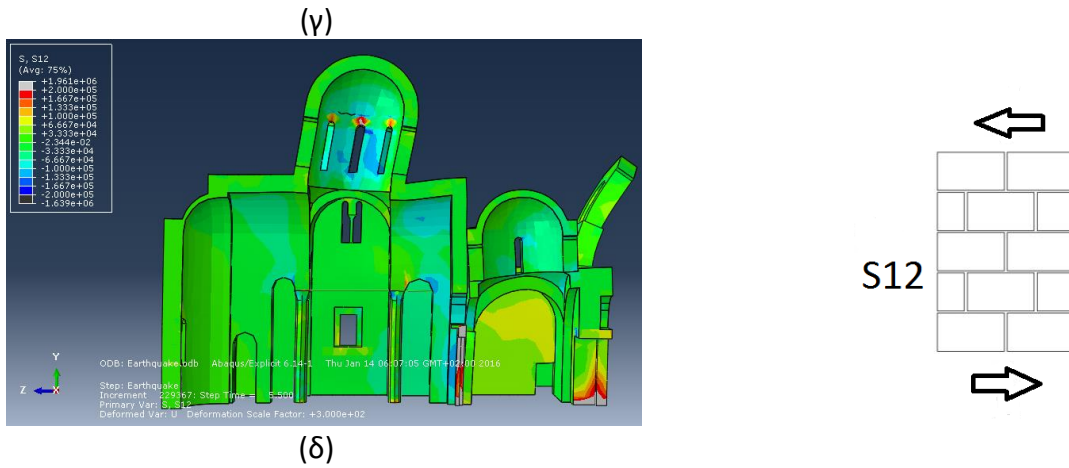


(ε)



(β)



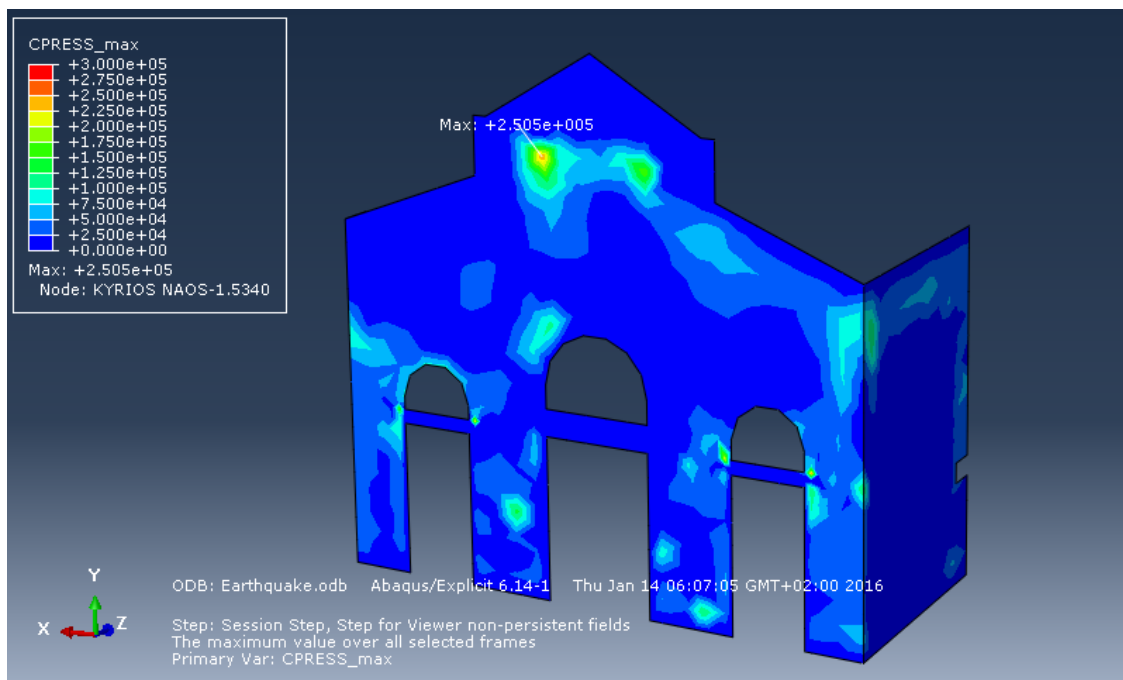


Εικόνα 9-19: Εντατική κατάσταση κατά τη χρονική στιγμή $t=5,50$ sec (α) Μέγιστη κύρια εφελκυστική τάση, (β) Ορθή τάση παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς, (γ) Ορθή τάση κάθετη στους οριζόντιους αρμούς, (δ) Διάτμηση παράλληλη με τους αρμούς της τοιχοποιίας και (ε) προσανατολισμός αξόνων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

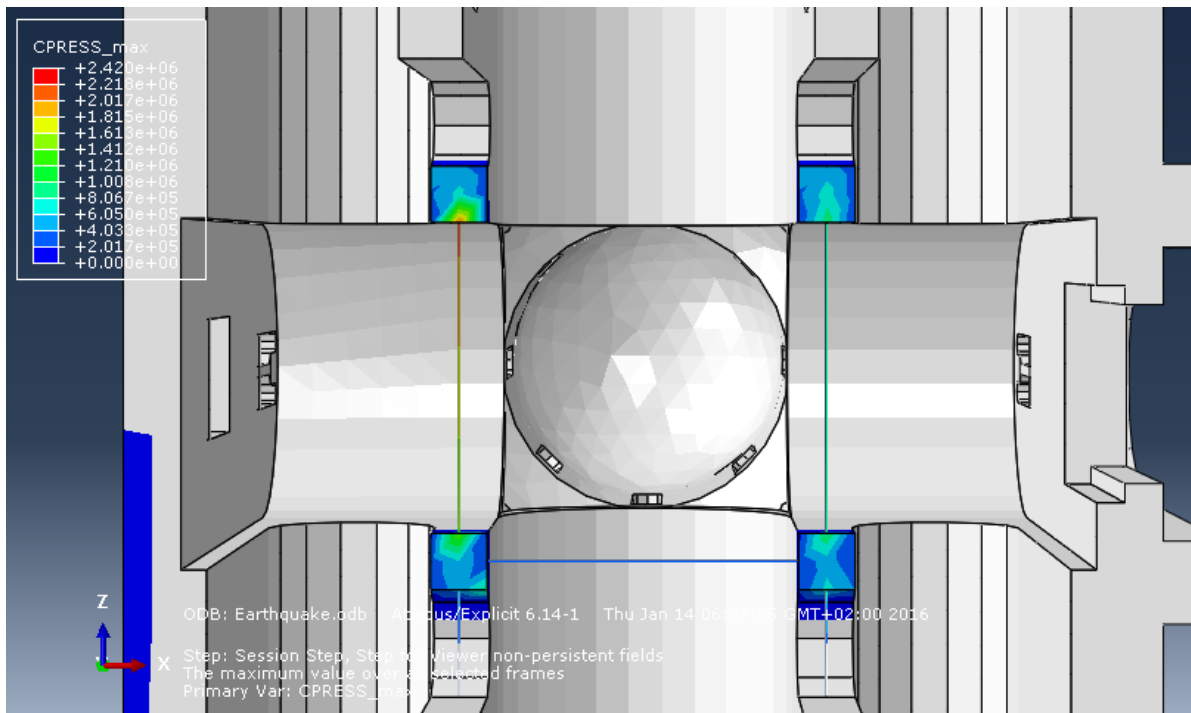
9.4 Προβλήματα των διεπιφανειών επαφής

Στο τέλος της εργασίας αυτής, κρίνεται σκόπιμη η απάντηση ορισμένων ερωτημάτων που εύλογα ανακύπτουν σχετικά με τη συμπεριφορά των διεπιφανειών επαφής:

Πίεση στη διεπιφάνεια ως αποτέλεσμα των κρουστικών φαινομένων



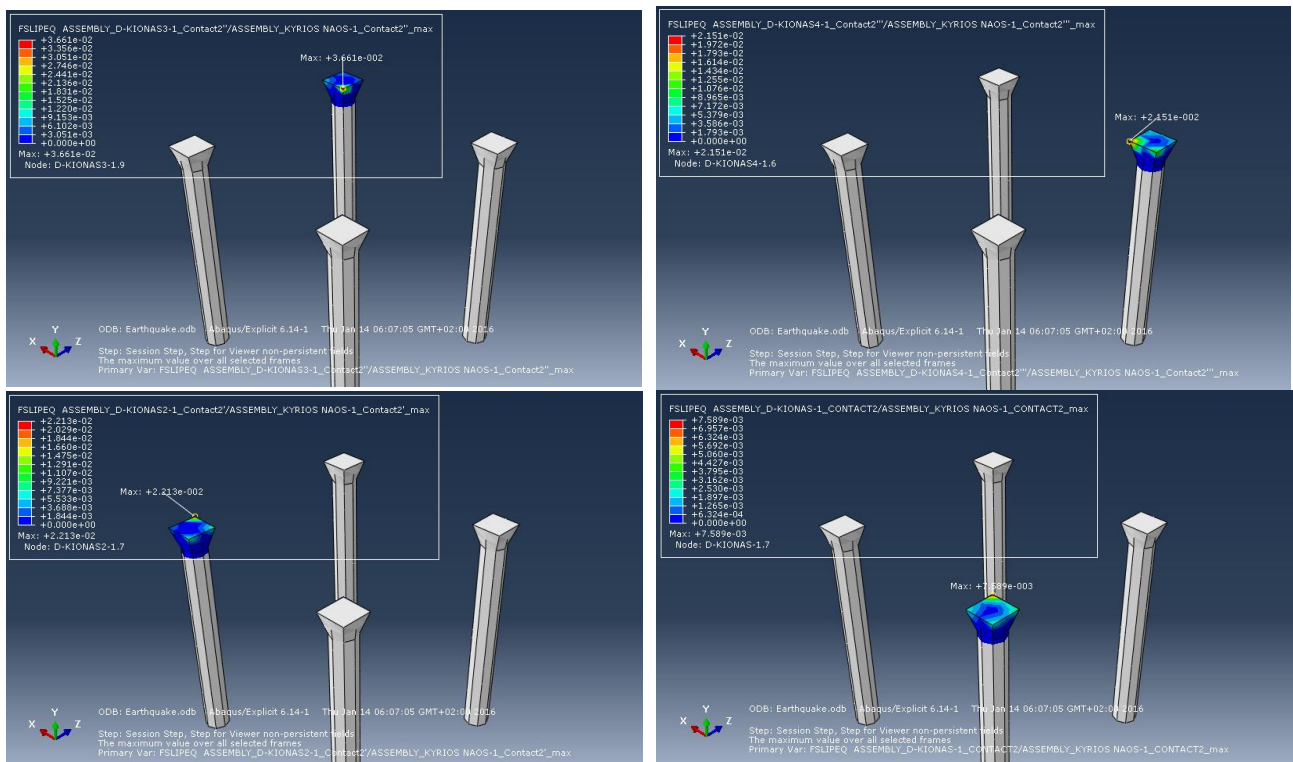
Εικόνα 9-20: Περιβάουσα των μέγιστων πιέσεων που ασκούνται λόγω της ύπαρξης κρουστικών φαινομένων στην επιφάνεια του Κυρίως Ναού. Όπως διακρίνεται, οι πιέσεις αυτές κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα και λαμβάνουν μέγιστη τιμή τα 250,5 KPa



Εικόνα 9-21: Περιβάλλουσα των μέγιστων πιέσεων που ασκούνται στην ανωδομή από τα κιονόκρανα. Οι τιμές τους κυμαίνονται σε επίπεδα χαμηλότερα από την θλιπτική αντοχή της εκεί τοιχοποιίας (2.420 KPa) και η μέγιστη τιμή τους ανέρχεται στα 2093 KPa.

Σχετική ολίσθηση των κιονοκράνων ως προς την ανωδομή.

Ένας από τους λόγους που οι μαρμάρινοι κεντρικοί κίονες θεωρήθηκαν ξεχωριστά σώματα σε επαφή με την τοιχοποιία, είναι η παρατηρούμενη αμυδρή σχετική τους ολίσθηση ως προς την ανωδομή. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 9-22: Περιβάλλουσα των μέγιστων τιμών της σχετικής ολίσθησης μεταξύ των κιονοκράνων και της ανωδομής. Η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στον ΒΑ κίονα και ανέρχεται σε 3,66 cm. Για τους υπόλοιπους κίονες οι αναπτυσσόμενες μέγιστες μετακινήσεις είναι: 2,15 cm για το ΝΑ, 0,76 cm για τον ΝΔ και 2,21 cm για τον ΒΔ.

10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

10.1 Συμπεράσματα

- Για τις ανάγκες των γραμμικών αναλύσεων το “προσομοίωμα 1” (το Καθολικό θεωρούμενο ενιαίο σώμα) οδηγεί σε ευμενέστερα αποτελέσματα στην περίμετρο του κτηρίου καθώς η ιδιαίτερα δύσκαμπτη εξωτερική τοιχοποιία των προσθηκών φαίνεται να λειτουργεί σαν στήριγμα για το δυτικό τμήμα του Κυρίως Ναού.
- Με κριτήριο τις μετατοπίσεις του τρούλου του Κυρίως Ναού και τις ροπές της βάσης του, και με μέτρο σύγκρισης τα αποτελέσματα από την εισαγωγή των φαινομένων επαφής (“προσομοίωμα 3”), η καταλληλότερη γραμμική ανάλυση για τον Κυρίως Ναό είναι η ανάλυση χρονοϊστορίας που τον λαμβάνει ως μεμονομένο ανεξάρτητο κτίριο (“προσομοίωμα 2”).
- Οι γραμμικές χρονοϊστορίες (με εν χρόνω ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης) επιβεβαιώνουν την αξία της Ιδιομορφικής Ανάλυσης Φάσματος Απόκρισης (Ι.Α.Φ.Α.) ως σχεδιαστικής μεθόδου καθώς οδηγεί σε παρεμφερή και συχνά συντηρητικότερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτές.
- Η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στο προσομοίωμα οδηγεί σε πολύ ευμενέστερα αποτελέσματα.
- Τα κρουστικά φαινόμενα δεν προκαλούν τοπικά προβλήματα στην τοιχοποιία.
- Η αντοχή του μνημείου στον χρόνο επιβεβαιώνεται σε μεγάλο βαθμό, καθώς οι αναλύσεις που έγιναν πάνω στο ρεαλιστικότερο προσομοίωμα, που είναι αυτό στο οποίο τα τμήματα του Καθολικού που διαχωρίζονται από κατασκευαστικό αρμό θεωρούνται σώματα εν επαφή, οδηγεί στην εμφάνιση πολύ περιορισμένων βλαβών.
 - Οι σχετικά περιορισμένες αστοχίες που εμφανίζονται μένει να αξιολογηθούν από μια πληρέστερη ανάλυση του φορέα, με ρεαλιστικότερα προσομοιώματα, στην οποία **θα λαμβάνονται καλύτερα υπόψιν τα υλικά και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του μνημείου** .
 - Εξαίρεση στο παραπάνω αποτελεί το καμπαναριό το οποίο αποδεικνύεται ενδεχομένως εύρωστο σε μελλοντικό σεισμό.
- Σύμφωνα με όλα τα προσομοιώματα, το μνημείο είναι πιο ασθενές στη εγκάρσια διεύθυνση (Βορράς-Νότος) παρά στη διαμήκη (Ανατολή-Δύση).

- Κατά τη σεισμική απόκριση του μνημείου, οι 4 κεντρικοί κίονες διαδραματίζουν εξέχοντα ρόλο στην ανάληψη των κατακορύφων φορτίων που προκαλούνται από την κάμψη του τρούλου.
- Τα οριζόντια αδρανιακά φορτία του σεισμού παραλαμβάνονται κατά κύριο λόγο από τους εσωτερικούς πεσσούς και την περιμετρική τοιχοποιία μέσω διατμητικών τάσεων εντός του επιπέδου των τοίχων.

10.2 Προτάσεις

Το πέρας της εργασίας αυτής, μας φέρνει αντιμέτωπους με το συμπέρασμα ότι η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στην προσομοίωση οδηγεί σε σαφώς ευμενέστερα αποτελέσματα, το οποίο (συμπέρασμα) δεν είναι αναμενόμενο και χρήζει ερμηνείας και αξιολόγησης με συγκριτικά απλουστευτικά προσομοιώματα, πραγματοποίηση πρόσθετων αναλύσεων χρονοϊστορίας και υπολογισμού των χρονοϊστοριών και άλλων μεγεθών (όπως κινητικής ή δυναμικής ενέργειας).

Επιπλέον, τα χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα δεν διαθέτουν την δυνατότητα απόδοσης της ρηγμάτωσης του υλικού και της συνεπαγόμενης ανακατανομής των τάσεων. Αν και η τελική και πλέον πλήρης προσομοίωση καταλήγει, με την εξαίρεση του κωδωνοστασίου, στην εμφάνιση περιορισμένων βλαβών, θα ήταν ενδιαφέρουσα η βελτίωση του προσομοιώματος προς αυτήν την κατεύθυνση.

Ένα στοιχείο της εργασίας αυτής που επιδέχεται μεγάλης βελτίωσης είναι το χρησιμοποιούμενο κριτήριο αστοχίας, με την εισαγωγή ενός κριτηρίου αστοχίας που να λαμβάνει υπόψιν την διαξονικότητα (τουλάχιστον) της έντασης καθώς και την ανισοτροπία των αντοχών.

Τέλος, η προσομοίωση του φορέα θα μπορούσε να αναβαθμισθεί με την καλύτερη γνώση της συμπεριφοράς των υλικών και των κατασκευαστικών λεπτομεριών του φορέα, καθώς και των ιδιοτήτων επαφής στους κατασκευαστικούς αρμούς (συντεστής τριβής, απόσβεση κατά την κρούση...).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Boore, D.M., & Atkinson, G.M. (2008).** Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99–138.
- Comité Européen de Normalisation, CEN (2004).** Eurocode 8 (EC8-1), 2004: *Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*.
- Comité Européen de Normalisation, CEN (2005).** "Eurocode 6: Design of Masonry Structures— Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures." Comit Europen de Normalisation: Brussels, Belgium (2005).
- DASSAULT SYSTEMES, Simulia.** "Getting Started With ABAQUS/Standard." ABAQUS Documentation 6.
- Σπυράκος Κ., (2004).** Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία. Αθήνα: Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2004.
- Σπυράκος Κ., (2015).** Σύγχρονες Προσεγγίσεις για την Αντισεισμική Προστασία Κτισμάτων Πολιτιστικής Κληρονομιάς - Ανασκόπηση – Πρόταση. Εταιρεία Έρευνας και Προώθησης της Επιστημονικής Αναστήλωσης των Μνημείων (ΕΤΕΠΑΜ), 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων, Πρακτικά Θεσσαλονίκη, 26,27,28 Νοεμβρίου 2015
- Spyrakos C.C., (1995).** Finite Element Modeling in Engineering Practice, Pittsburg, PA, USA: Algor Publishing Division, 1995.
- Spyrakos C.C., Raftoyiannis J., (1997).** Linear and Nonlinear Finite Element Analysis, Pittsburg, PA, USA: Algor Publishing Division, 1997.
- Spyrakos C.C., Maniatakis C.A., (2006).** *Retrofitting of a Historic Masonry Building*. In Proceedings of the 10th National and 4th International scientific meeting on Planning, Design, Construction and Renewal in the construction industry iNDiS 2006, (535-544). Novi Sad-Serbia, 2006.
- Spyrakos C.C., Maniatakis C.A., Taflambas J., (2008).** *Evaluation of near source seismic records based on damage potential parameters: Case study: Greece*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 738-753, 2008.

- Spyrakos C.C., Kiriakopoulos P.D., Smyrou E., (2011).** Seismic Strengthening of the historic church of Sts Helen and Constantine in Piraeus, In: Proceedings of the 3rd International Conference on techniques methods in Structural dynamics and Earthquake Engineering COMPDYN Corfu, Greece (2011) 2401-2413.
- Spyrakos C.C., Toulaitos P., Patsilivas D., Pelekis G., Xampesis A., Maniatakis C.A., (2013).** *Seismic analysis and retrofit of a historic masonry building*, In S. Syngellakis Editor, Retrofitting of Heritage Structures - Design and evaluation of strengthening techniques (pp. 65-74). Southampton, UK: Wessex Institute of Technology Press, 2013.
- Spyrakos C.C., Francioso A., Kiriakopoulos P.D., Papoutsellis S., (2013).** *Seismic evaluation of the historic church of St. Nicholas in Piraeus before and after interventions*. M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris eds. COMPDYN 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12–14 (pp. 3015-3029), June 2013.
- Spyrakos C.C., Pugi F., Maniatakis C.A., Francioso A., (2015).** *Evaluation of the Dynamic Response for a Historic Byzantine crossed-dome church through Block joint and Kinematic analysis*. in: Proceedings of COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, 2015.
- Spyrakos C.C., (2015).** Seismic Risk of Historic Structures and Monuments: A need for a unified policy, in: Proceedings of COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, 2015.
- T.P. Tassios, Seismic Engineering of Monuments.** M. Garevski, A. Ansal. Editors, Earthquake engineering in Europe, Springer Netherlands, 1-42, 2010.
- T.M. Tsapanos, P.W. Burton,** Seismic hazard evaluation for specific seismic regions of the world. Tectonophysics, 194, 153–169, 1991.
- UNESCO. Greece:** Properties inscribed on the World Heritage List. (<http://whc.unesco.org/en/statesparties/gr>) retrieved 2015-03-15.
- A. Udías, Seismicity of the Mediterranean Basin.** In: Geological Evolution of the Mediterranean Basin, Raimondo Selli Commemorative Volume, D. J. Stanley, F.-C. Wezel Editors, 55-63, 1985.
- The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments.** First International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Athens, 1931.

- International Council on Monuments and Sites – ICOMOS.** International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964). Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, 1964.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare. n. 617 del 02 febbraio 2009.** Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni, §C8A.4, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 47 del 26 febbraio 2009, Supplemento ordinario n.27. (in Italian)
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri (D.P.C.M.).** Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008, 2011. (in Italian)
- Earthquake Planning Protection Organization (EPPO) and European Centre on Prevention and Forecasting of Earthquakes (ECPFE).** Draft framework regulatory document for structural interventions to and seismic protection of monuments, 2011.
- D. Dizhur, J. Ingham, L. Moon, M. Griffith, A. Schultz, I. Senaldi, G. Magenes, J. Dickie, S. Lissel, J. Centeno, C. Ventura, J. Leite, P. Lourenco,** Performance of masonry buildings and churches in the 22 February 2011 Christchurch earthquake. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 44(4), 279-296, 2011.
- GEER-EERI-ATC. (2014).** Earthquake Reconnaissance January 26th/ February 2nd 2014 Cephalonia, Greece events. GEER Association Report No. GEER-034 in collaboration with EERI and ATC, Version 1: June 6, 2014.
- E. Mele, A. De Luca, A. Giordano,** Modeling and analysis of a basilica under earthquake loading. Journal of Cultural Heritage, 4, 355–367, 2003.
- I.N. Psycharis, H.P. Mouzakis, A. Miltiadou, E.P. Pavlopoulou, I.M. Taflampas,** Investigation of the seismic response of a Byzantine church and evaluation of the effectiveness of proposed interventions. Earthquake Spectra, 26(2), 473-497, 2010.
- A. Pantelidou-Alexiadou,** Kaisariani Monastery, Archaeological Receipts Fund, Ministry of Tourism and Culture, 2011.
- N. Gkioles,** Byzantine Church Architecture (600-1204 AD), Kardamitsa Editions, 1987. (in Greek)
- C. Mango,** Byzantine Architecture (History of World Architecture), Electa / Rizzoli Publisher, 1985.
- R. Krautheimer,** Early Christian and Byzantine Architecture, The Yale University Press, 1984.
- C. Bouras,** History of Architecture, Melissa Editions, 1994. (in Greek)

- A. Barzoukas, Monastère de Kaisariani, Le Catholicon.** Drawings from the Collection and Archive of Architectural Research, Institute of Architectural Morphology, National Technical University of Athens, 1957.
- D. D'Ayala, E. Speranza,** Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. *Earthquake Spectra*, 19(3), 479–509, 2003.
- K. Syrmakizis, O. Mavrouli, P. Papaevaggeliou, E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou,** Finite element analysis and fragility curves for the evaluation of restoration mortars behavior regarding the earthquake protection of historic structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54, 61-65, 2013.

