



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»



ΔΟΜΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΤΕΡΕΩΣΗ
ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΝΑΟΥ ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΣΤΑΥΡΟΣ Ε. ΠΑΠΟΥΤΣΕΛΛΗΣ

ΔΙΠΛ.ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: **ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΑΚΟΣ**

ΑΘΗΝΑ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλα τα άτομα που συνέβαλλαν στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας. Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Κωνσταντίνο Σπυράκο, τόσο για την καθοδήγηση του και τις καίριες επισημάνσεις του, όσο και για την υπομονή του, σε όλη τη διάρκεια της μελέτης. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τόσο τους ιερείς του Αγ.Νικολάου, για τη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια της παραμονής μας στον Ι.Ν , όσο και το προσωπικό και τη διευθύντρια του Ιστορικού αρχείου του Δήμου Πειραιά, για την άμεση ανταπόκριση τους στο ζήτημα της ιστορικής αναδρομής του Ι.Ν Αγ.Νικολάου. Την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου οφείλω να εκφράσω επιπρόσθετα στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κυριακόπουλο, ο οποίος με την εμπειρία του και την έμπρακτη βοήθεια του αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου. Τέλος, πολλές ευχαριστίες αξίζουν, στην αρραβωνιαστικιά μου Ελευθερία, στα αδέρφια μου, Χρήστο και Βαγγέλη και τους γονείς μου, για την αμέριστη υποστήριξη, συμπαράσταση, αλλά και υπομονή τους απέναντι μου, σε όλο αυτό το διάστημα που κράτησε η εκπόνηση της διπλωματικής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκκλησία του Αγίου Νικολάου βρίσκεται στο λιμάνι του Πειραιά. Πρόκειται για έναν Ι.Ν. μνημείο που η θεμελίωση του έγινε 1887, ενώ το τέλος των εργασιών και η σημερινή του εικόνα χρονολογείται από το 1902. Ο Ιερός Ναός καταπονήθηκε και παρουσίασε σημαντικές βλάβες από τους πρόσφατους σεισμούς συμπεριλαμβανομένου και του σεισμού των Αθηνών το 1999. Οι βλάβες αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν στοιχεία στο φορέα, για τη θωράκισή του σε περίπτωση σεισμού. Για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του Ιερού Ναού, μια λεπτομερή μελέτη του κτιρίου διεξήχθη προκειμένου να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες και η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου καθώς και η σεισμική συμπεριφορά του μέσω εργαστηριακών και επιτόπου ελέγχων και μέσω της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Με βάση τα αποτελέσματα, προτείνονται μέτρα για την ενίσχυση και επισκευή του Ιερού Ναού, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό επεμβάσεων όπως ομογενοποίηση της τοιχοποιίας με ενέματα, ινοπλισμένα πολυμερή και ελκυστήρες.

ABSTRACT

The Church of St. Nikolaos is located at the port of Piraeus. The foundation was built in 1875 and the total temple was completed in 1902. A series of recent earthquakes, including the Athens 1999 earthquake, strained the temple and caused serious damages. These damages are mainly attributed to the absence of particular provisions to carry the earthquake loads. In order to evaluate the earthquake vulnerability of the church, a detailed study of the masonry structure was conducted in order to determine the mechanical properties, the building construction details and the current condition of the structure as well as its dynamic behavior through in situ and laboratory testing as well as through finite element analysis. Based on the results, strengthening and repair measures are proposed, using a combination of masonry consolidation techniques, fiber reinforced plastic materials (FRP) and steel tie rods.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	9
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	9
1.3 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	11
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΝΑΟΥ	17
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ.....	19
3.2 ΚΑΤΟΨΕΙΣ Ι.Ν ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΥ.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΝΑΟΥ	25
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ.....	27
4.2 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ.....	27
4.2.1 ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ.....	27
4.2.1.1 ΚΥΡΙΩΣ ΝΑΟΣ.....	27
4.2.1.2 ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΑ.....	35
4.2.2 ΥΓΡΑΣΙΑ.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΛΙΚΩΝ & ΔΟΜΗΜΑΤΟΣ Ι.Ν.	41
5.1 ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΑ.....	43
5.2 ΤΥΠΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.....	43
5.3 ΚΟΝΙΑΜΑ.....	45
5.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΝΗΣΕΩΝ.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- ΑΝΑΛΥΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ	59
6.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.....	61
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ.....	62
6.2.1 ΦΟΡΤΙΑ.....	62
6.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	65
6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΩΝ.....	67
6.3.1 ΦΟΡΤΙΑ.....	67
6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ Ι.Ν.	71
7.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	73
7.2 ΕΝΕΜΑΤΑ (Grouting).....	73
7.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ- ΑΝΘΡΑΚΟΪΦΑΣΜΑΤΑ.....	75
7.4 ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8- ΑΝΑΛΥΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ	79
8.1 ΦΟΡΕΑΣ.....	81
8.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ.....	81
8.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	81
8.2 ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΑ.....	83

8.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΩΝ.....	83
8.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121



ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Η τοιχοποιία είναι το αρχαιότερο δομικό υλικό. Σχεδόν όλα τα δομικά έργα της ανθρωπότητας μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, κατοικίες, εκκλησίες, ανάκτορα, γέφυρες, υδραγωγεία, οχυρωματικά έργα, είναι κατασκευασμένα από τοιχοποιία.

Σήμερα, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με την επισκευή και την αποκατάσταση κτιρίων πολιτιστικής σημασίας. Οι νέες επιστημονικές εξελίξεις στις περιοχές της ανάλυσης και του σχεδιασμού των κατασκευών, νέων δομικών υλικών και της κατασκευαστικής τεχνολογίας επιτρέπουν πλέον στο μηχανικό την επίλυση των προβλημάτων επισκευής, ενίσχυσης και αποκατάστασης παλαιών κατασκευών κατά τρόπο περισσότερο τεκμηριωμένο επιστημονικά και λιγότερο εμπειρικά.

Η παρούσα μελέτη εμβαθύνει κατά το δυνατό στην ιστορία του Μνημείου, πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την αιτιολόγηση τυχών παραδοχών. Προχωρά στην κατασκευαστική ανάλυση, τεκμηριώνει την παθολογία του και τέλος προτείνει τη θωράκισή του από μελλοντικούς σεισμούς.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Η ανάπτυξη της μελέτης πραγματοποιείται στα επόμενα κεφάλαια ως εξής:

- Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγικό κεφάλαιο στο οποίο περιγράφεται το αντικείμενο της διπλωματικής.
- Κεφάλαιο 2^ο: Ιστορική αναδρομή και ιστορικά στοιχεία που επιτρέπουν τόσο στον αναγνώστη να γνωρίσει την ιστορία του Μνημείου, όσο στο μελετητή να λάβει υπόψη του τον τόπο, χρόνο και τρόπο της κατασκευής.
- Κεφάλαιο 3^ο: Παρουσίαση του Ι.Ν Αγ.Νικολάου, κατόψεις και φωτογραφίες
- Κεφάλαιο 4^ο: Παθολογία του ναού. Καταγραφή του συνόλου των βλαβών του Ι.Ν.
- Κεφάλαιο 5^ο: Έλεγχοι του συνόλου των υλικών που αποτελούν το οικοδόμημα του ναού ,τοιχοποιια,κονίαμα και διαπίστωση των αντοχών τους.
- Κεφάλαιο 6^ο: Ανάλυση και αξιολόγηση του υφιστάμενου φορέα χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SAP2000 v.15
- Κεφάλαιο 7^ο: Προτάσεις ενισχύσεις του Ι.Ν και αναλυτική περιγραφή του τρόπου εφαρμογής τους.
- Κεφάλαιο 8^ο: Ανάλυση και αξιολόγηση του ενισχυμένου φορέα χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SAP2000 v.15

1.3 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η συνολική διαδικασία αποκατάστασης ενός μνημείου το οποίο έχει υποστεί σοβαρές βλάβες απαιτεί ακριβή προσδιορισμό, αφενός της παρούσας εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης, αφετέρου αυτής που θα προκύψει μετά τις επεμβάσεις για επισκευή και ενίσχυση. Το γεγονός αυτό απαιτεί πολύπλοκες και λεπτομερείς αναλύσεις της κατασκευής οι οποίες μπορούν να γίνουν μόνο με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων και ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η ανάλυση μνημείων και κτιρίων πολιτιστικής σημασίας γίνεται συνήθως με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η οποία εφαρμόζεται με την ανάπτυξη μοντέλου το οποίο προσομοιώνει την πραγματική κατασκευή με βάση στοιχεία που βασίζονται σε επιτόπου μετρήσεις της γεωμετρίας, των υλικών του φορέα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει ευρέως εφαρμοστεί στη λύση προβλημάτων που καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα του αντικειμένου του πολιτικού μηχανικού. Σύμφωνα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, μια γραμμικά ελαστική κατασκευή κάτω από στατικά φορτία, διακριτοποιείται σε ένα αριθμό στοιχείων πεπερασμένου μεγέθους τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω κόμβων. [1,2]

Με σκοπό τη βέλτιστη προσομοίωση του φορέα και την αξιόπιστη επίλυσή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν τριών ειδών στοιχεία:

1. **Στοιχεία Όγκου (solid elements)**- Τα στοιχεία όγκου αποτελούνται από 8 κόμβους με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο και χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της τοιχοποιίας του ναού και των κωδωνοστασίων.
2. **Επιφανειακά Στοιχεία (shell elements)**- Επιφανειακά στοιχεία (έξι βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο) χρησιμοποιούνται για επίπεδες επιφάνειες με πάχος πολύ μικρό σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις τους. Πρόκειται για τρίπλευρα ή τετράπλευρα στοιχεία που συνδυάζουν μεμβρανικές και καμπτικές δράσεις. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους για την προσομοίωση του κεντρικού τρούλου και των τρούλων των κωδωνοστασίων. Επίσης στοιχεία κελύφους χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των ανθρακούφασμάτων ενίσχυσης όπου κρίθηκε απαραίτητο.
3. **Γραμμικά Στοιχεία (beam elements- frames)**- Γραμμικό στοιχείο με έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, δηλαδή τρεις μετακινήσεις και τρεις στροφές κατά τους άξονες X, Y και Z. Τα εν λόγω στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την προσομοίωση των ελκυστήρων που θα τοποθετηθούν στις βάσεις των τόξων για την ενίσχυσή τους. Επίσης γραμμικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για τη σωστή σύνδεση και συνεργασία των στοιχείων όγκου με τα επιφανειακά στοιχεία.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

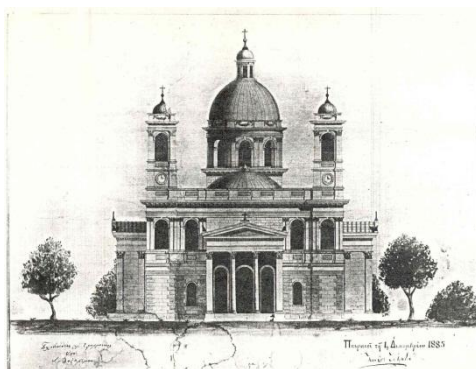
Ο Ι.Ν του Αγ.Νικολάου στον Πειραιά όπως τον γνωρίζουμε σήμερα, είναι ουσιαστικά ο τρίτος ναός που κατασκευάζεται στην περιοχή. Ως απλή μονόκλιτη βασιλική περιγράφεται ο πρώτος μικρός ναός του Αγ.Νικολάου κοντά στο Τελωνείο. Σχεδιάστηκε από τον δημοτικό αρχιτέκτονα Lorenzen το 1839 και η ανέγερση του θεωρήθηκε σημαντικός συντελεστής προόδου για τον τότε εκκολαπτόμενο Υδραϊκό συνοικισμό. Το αρχικό σχέδιο τροποποιήθηκε οσον αφορά στις διαστάσεις των ανοιγμάτων, τον αριθμό των θυρών και την προσθήκη γυναικωνίτη και ενοριακού γραφείου, ενώ οι εργασίες συνεχίζονται από το 1842 με τις συνδρομές των πιστών. Τα εγκαίνια της μικρής αυτής εκκλησίας γίνονται στις 23 Ιουλίου 1844.

Εκείνη την εποχή, όπως και σε άλλες περιπτώσεις οικοδομημάτων, η κακή κατασκευή και η έλλειψη ευρυχωρίας οδηγούν στην ανάγκη ανοικοδόμησης νέου ναού, δραστηριότητα που επαφίεται στην ιδιωτική χρηματοδότηση.

Τα σχέδια της νέας οικοδομής συντάσσονται από τον δημοτικό μηχανικό Ν.Πετιμεζιά το 1851, ενώ η ανέγερση του ξεκινά τον επόμενο χρόνο. Οι μόνες πληροφορίες από την κατασκευή της υπάρχουν από τον προϋπολογισμό, όπου φαίνεται ότι πρόκειται για μια βασιλική με τρούλο, περιφέρειας 19μ. και ύψους 9μ., πάνω από το κεντρικό τετράγωνο, που έχει πρόναο στηριζόμενο σε έξι μαρμάρινες κολώνες και δύο κωδωνοστάσια από πελεκητό μάρμαρο Υμηττού. Στις δύο πτέρυγες δημιουργείται γυναικωνίτης, προσπελάσιμος με μαρμάρινη σκάλα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του εσωτερικού χώρου είναι οι δέκα κολώνες ιωνικού ρυθμού και η πλακόστρωση με δίχρωμο μάρμαρο Καρράρας. Ο ναός αυτός συμπληρώνεται και επεκτείνεται στα τέλη του 1850. Εκείνη την περίοδο κατασκευάζονται τα κωδωνοστάσια, ενώ αρχίζει και η διαμόρφωση του εξωτερικού χώρου, όπου προστίθεται αργότερα μια νέα είσοδος με κλιμακοστάσιο προς την πλευρά της θάλασσας.

Ο τελικός ναός που βλέπουμε σήμερα στον Πειραιά, είναι σχεδιασμένος από τον Ι.Λαζαρίμο. Θεμελιώθηκε το 1897 και ολοκληρώθηκε μόλις το 1902, με τη συμβολή και του διαδόχου δημοτικού αρχιτέκτονα Γ. Ζίζηλα.

Ανήκει στον τύπο των σταυροειδών εγγεγραμμένων τετρακονίων νάων και η μορφή του ακολουθεί τα πρότυπα του νεοκλασσικού ρυθμού, με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του τα τρία μνημειώδη πρόπυλα στη δυτική, τη βόρεια και τη νότια όψη, που προσεγγίζουν τον τύπο του αρχαίου κορινθιακού ναΐσκου.

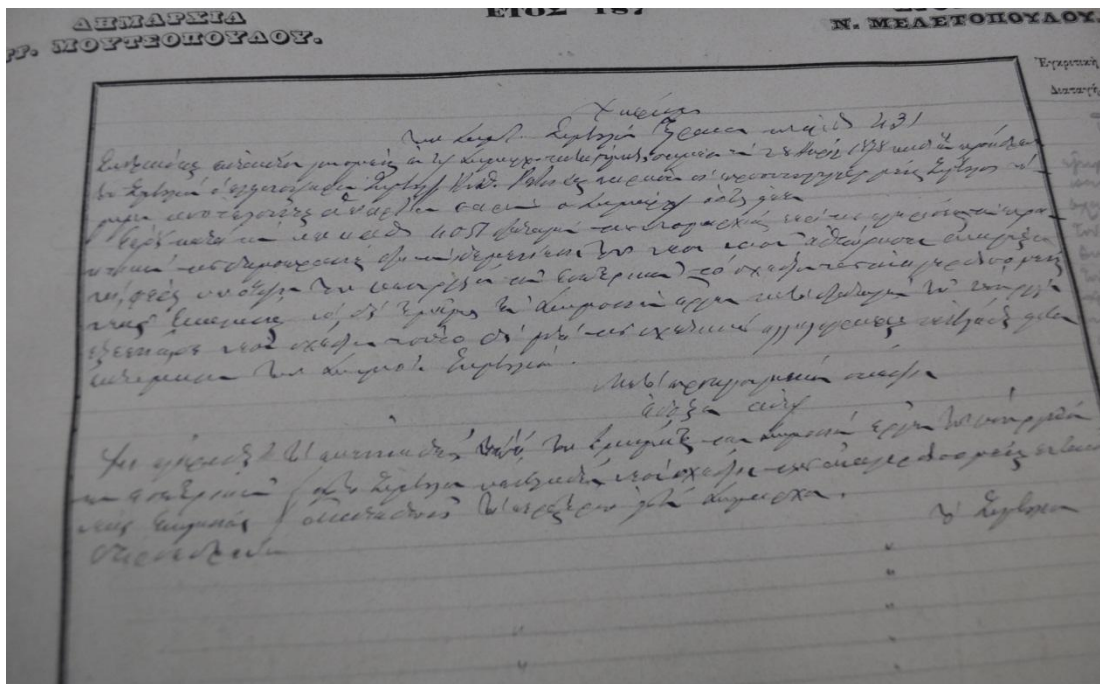


Η βασική κατασκευή διαρκεί από το 1881 έως το 1890, ενώ οι περισσότερες εργασίες αποπεράτωσης εκτελούνται στην τετραετία 1894-1899. Εκείνη την περίοδο, ανανεώνεται η πλακόστρωση των δαπέδων ,κατασκευάζονται τα μαρμάρινα παράθυρα, τα κωδωνοστάσια, τα πρόπυλα και τα κλιμακοστάσια στη δυτική και νότια όψη. Παράλληλα, συμπληρώνεται ο εσωτερικός διάκοσμος, ενώ αρχίζει να διαμορφώνεται και ο περίβολος, όπου χτίζονται και δύο δωμάτια με μία αποθήκη. Στο ίδιο διάστημα ανεγείρονται καταστήματα στη βορειοδυτική πλευρά. [3]

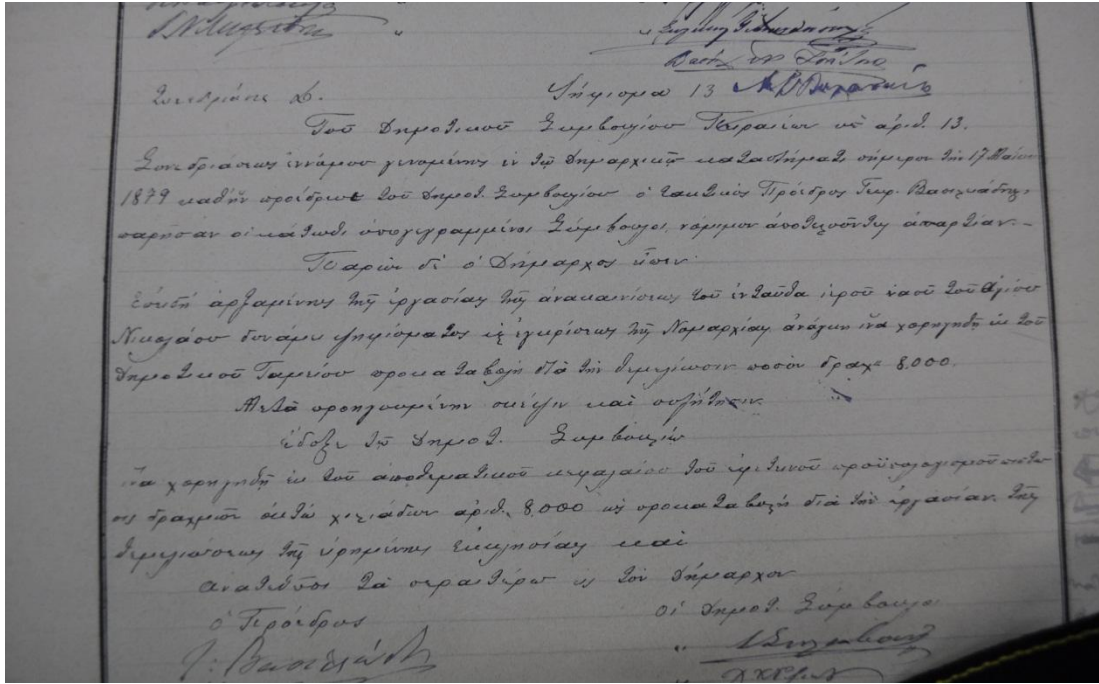


Εικόνα 2.1- Βόρεια όψη του Ιερού Ναού

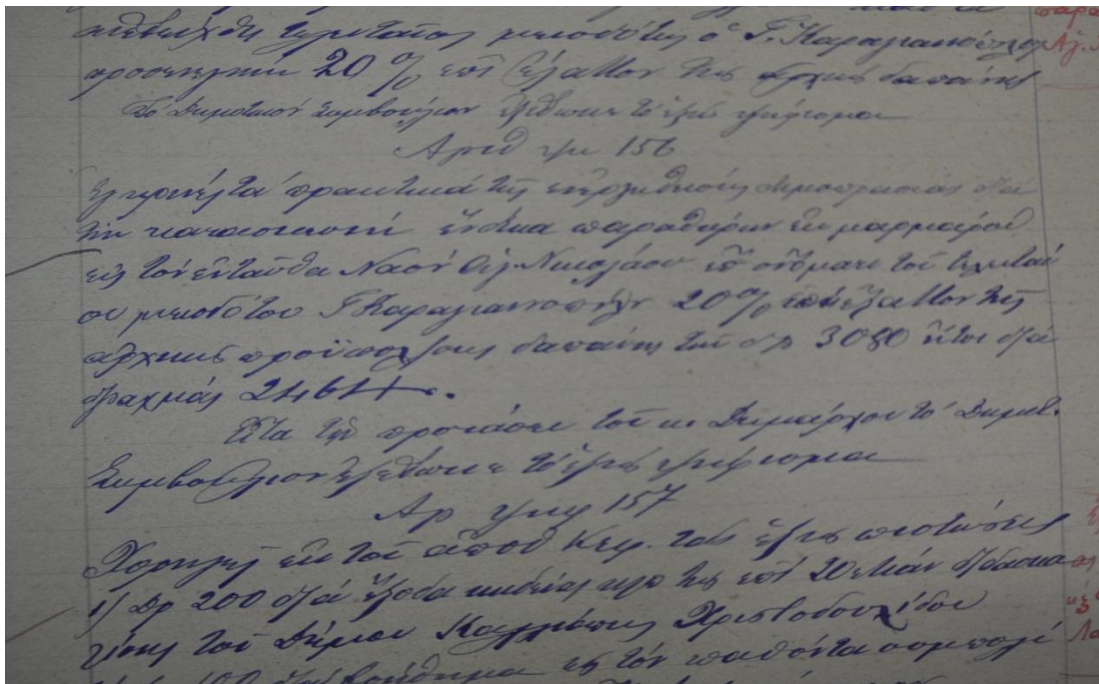
Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια έγγραφα από τα πρακτικά του Δήμου που αφορούν σε συζητήσεις και εγκρίσεις για την ανέγερση του Ι.Ν.



Εικόνα 2.2- Έγκριση παρά του Υπ. Εσωτερικού για τα σχέδια του νέου Ναού (28-04-1878)



Εικόνα 2.3- Έγκριση για τη θεμελίωση του ανακαινιζόμενου ναού (04-12-1878)



Εικόνα 2.4- Έγκριση για την κατασκευή 11 μαρμάρινων παραθύρων (07-03-1894)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

ΙΕΡΟΣ ΝΑΟΣ ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ

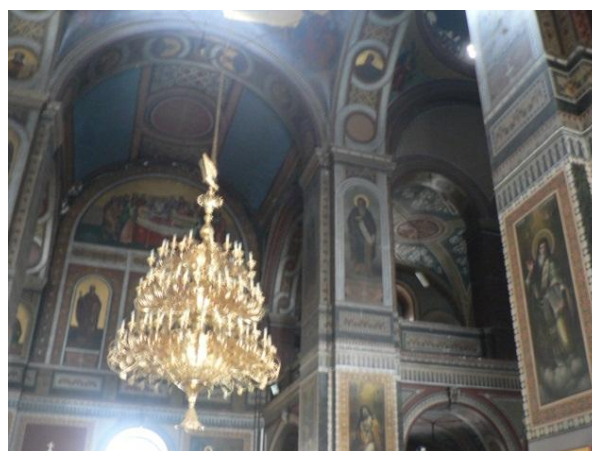
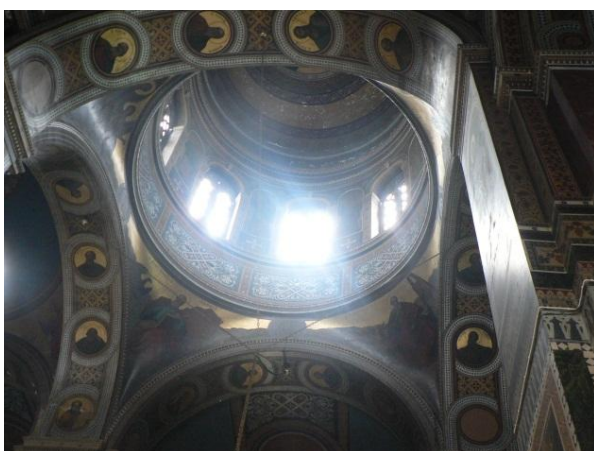
Όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο ο Ι.Ν ανήκει στον τύπο των σταυροειδών εγγεγραμμένων τετρακίονιων ναών. Επιβλητικός στην όψη χαρακτηρίζεται από τα τρία μνημειώδη πρόπυλα στη δυτική, τη βόρεια και τη νότια όψη, τους τρεις τρούλους και τα δύο κωδωνοστάσια.

Οι διαστάσεις του ναού είναι 33,75μ. στο βάθος επί 26,00μ. στην πρόσοψη, ενώ σε ύψος χωρίς τους τρούλους φτάνει στα 16,52μ. Η βάση του τρούλου φτάνει στα 28μ. ενώ η κορυφή του αγγίζει τα 30μ. Η περιμετρική τοιχοποιία του ναού είναι τρίστρωτη και έχει πλάτος 1,30μ. Γενικά τα υλικά που συναντάμε στο οικοδόμημα αυτό είναι πέτρα, μάρμαρο και κεραμίδι.



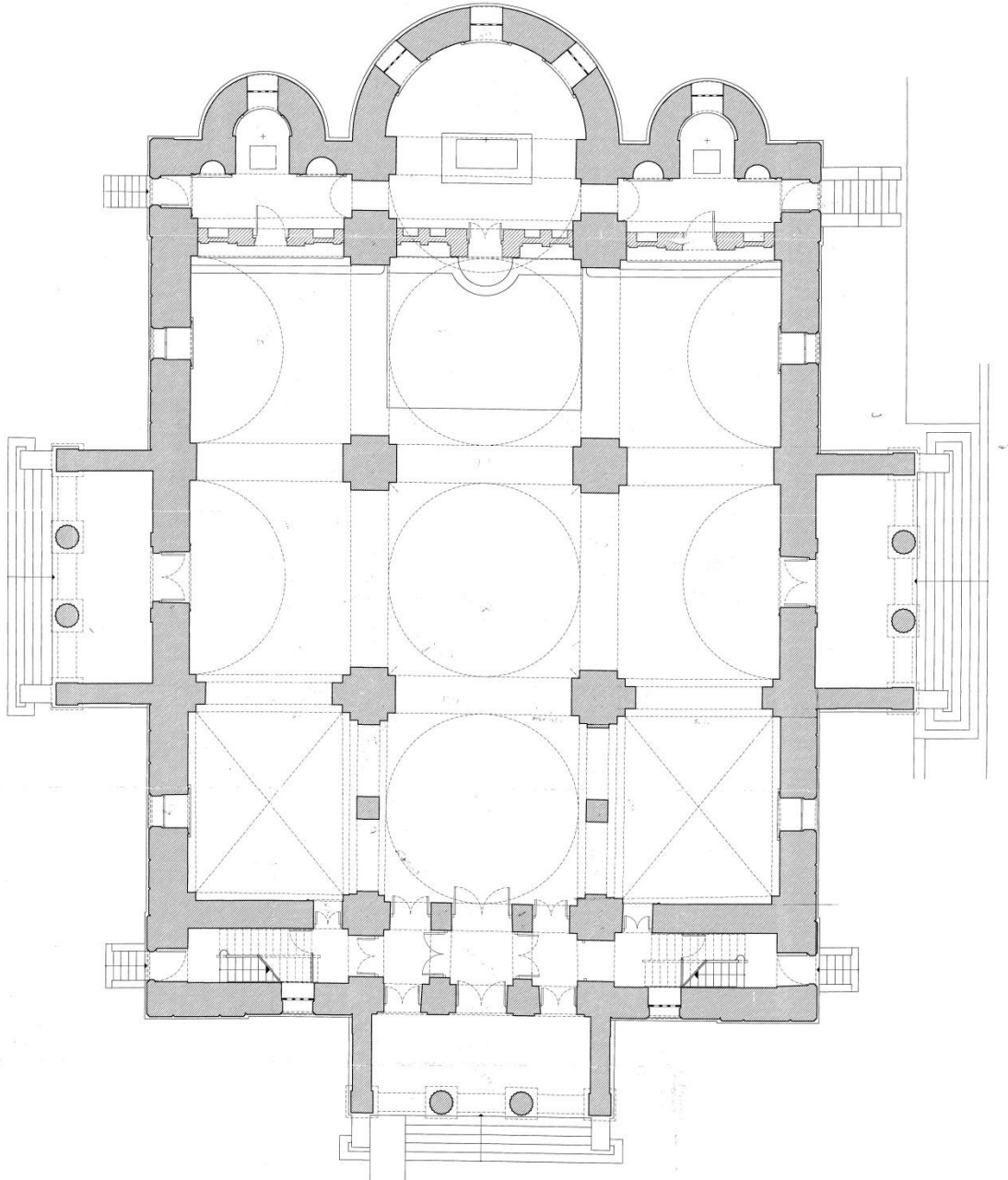
Εισερχόμενοι στο ναό συναντάμε δεξιά και αριστερά τους δύο γυναικωνίτες και τον πρώτο τρούλο. Προχωρώντας βρίσκουμε τις τέσσερις κολώνες που στηρίζουν τη βάση του μεγάλου τρούλου. Συνολικά υπάρχουν 6 μεγάλα υποστυλώματα διαστάσεων 1,50x1,50 τα οποία δημιουργούν στις συνδέσεις τους 10 κύρια τόξα. Λίγο πριν το ιερό υπάρχει το τέμπλο του ναού το οποίο αποτελείται από μια στρώση τοιχοποιίας 30 cm και μία στρώση 10 cm μάρμαρο.

Δεξιά και αριστερά από την κύρια είσοδο του Ι.Ν. υπάρχουν ξύλινα κλιμακοστάσια που οδηγούν προς τους γυναικωνίτες και τα κωδωνοστάσια.

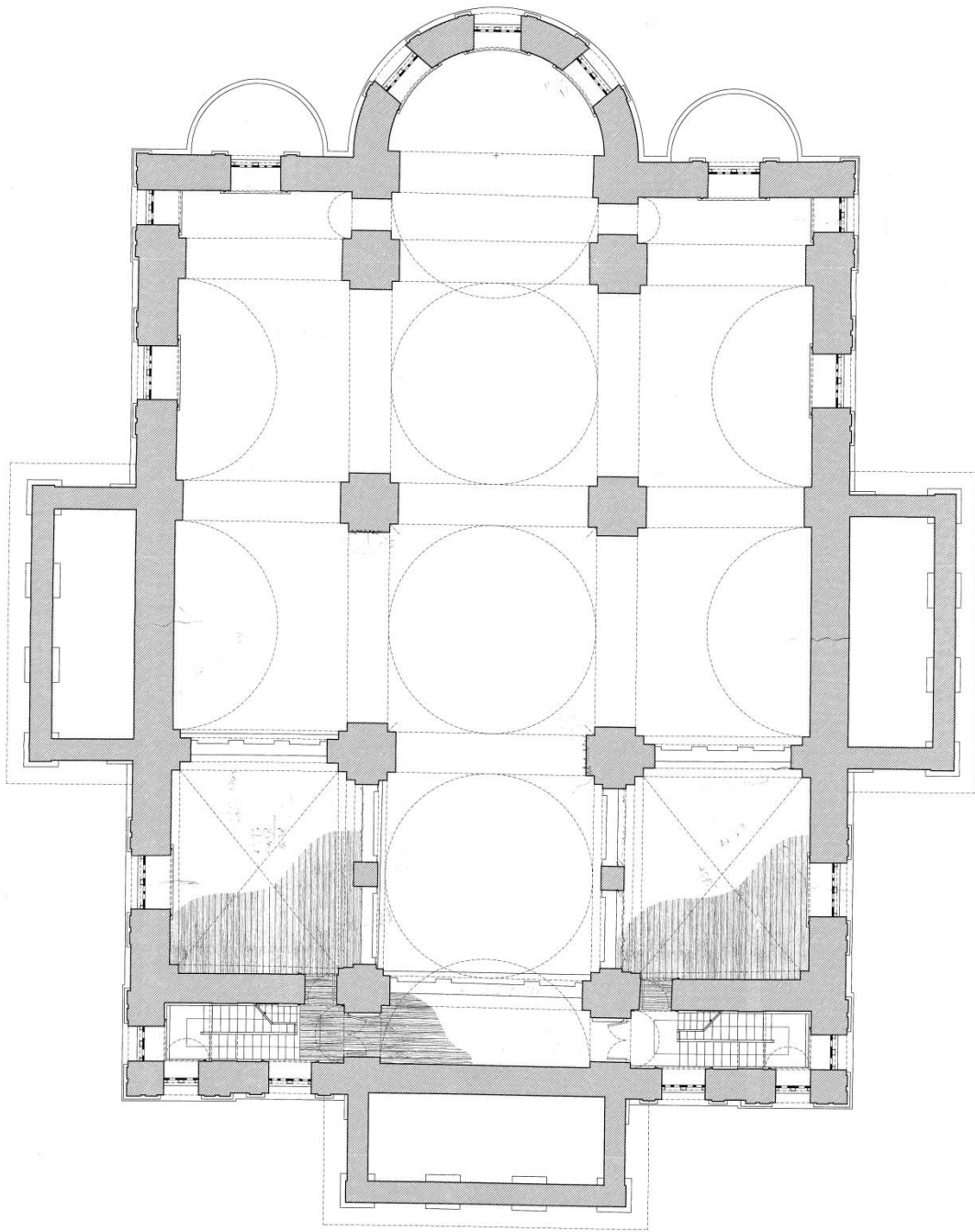


3.2 ΚΑΤΟΨΕΙΣ Ι.Ν ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΥ

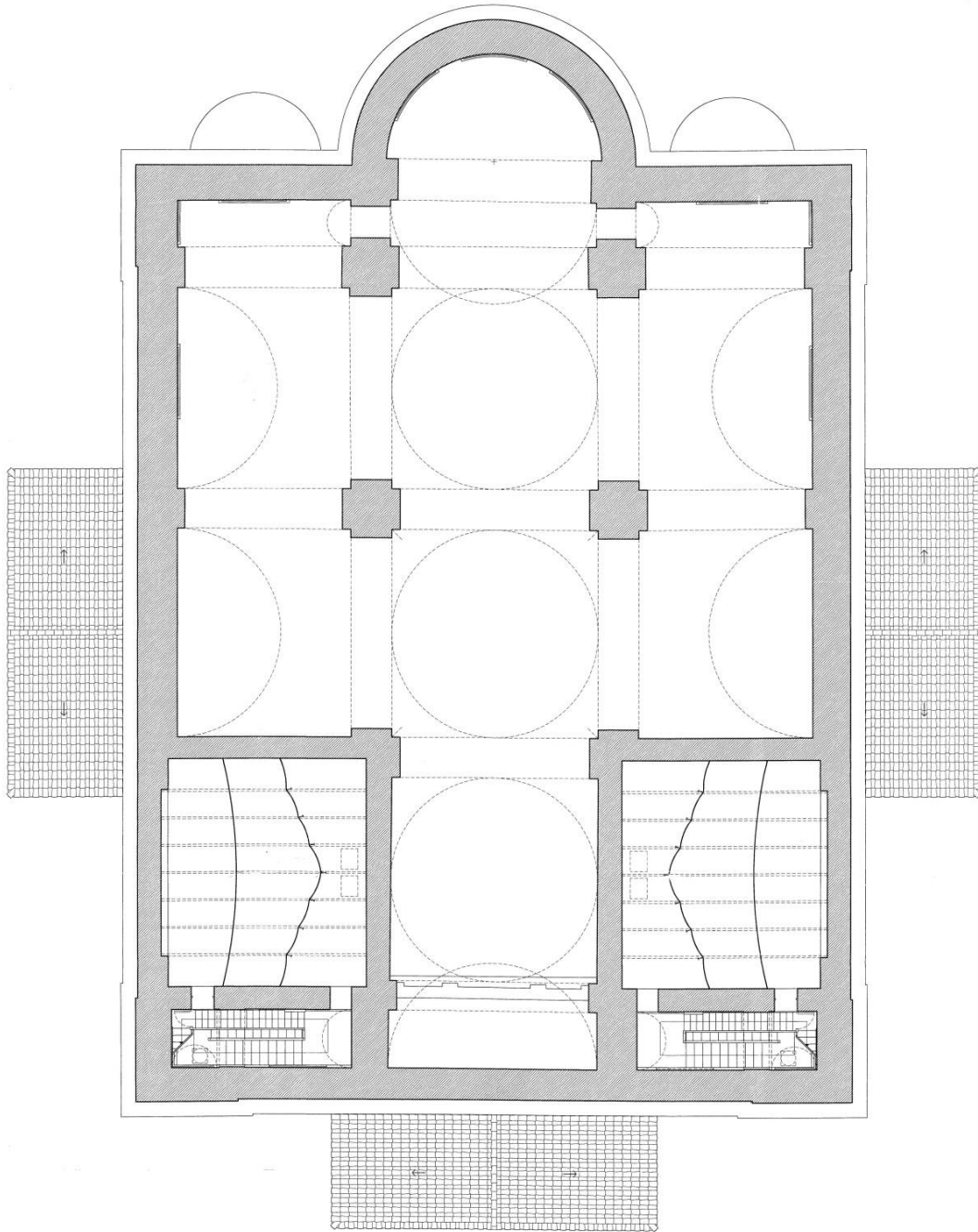
Οι αρχιτεκτονικές κατόψεις των χώρων παρουσιάζονται στη συνέχεια:



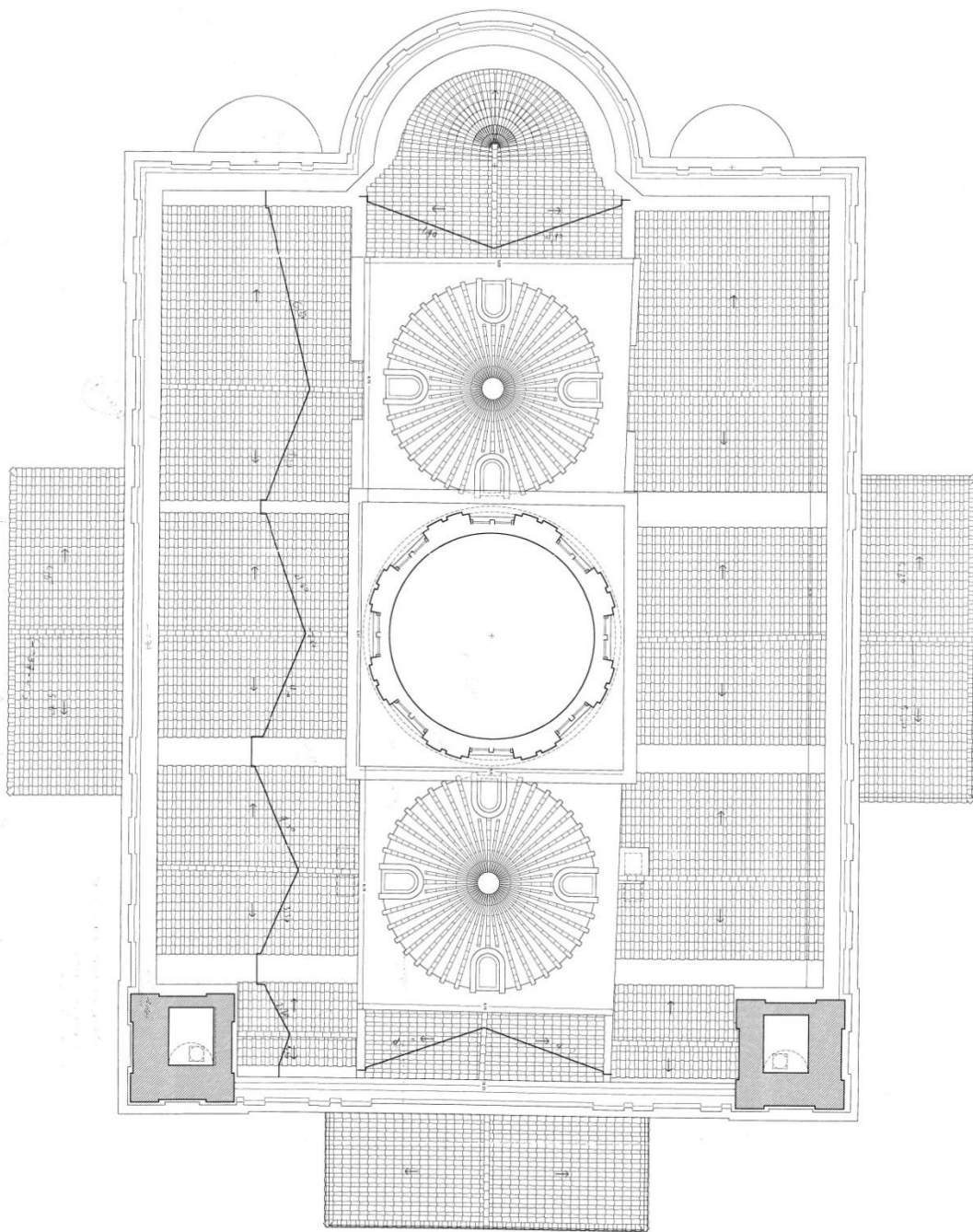
ΚΑΤΟΨΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ



ΚΑΤΟΨΗ ΓΥΝΑΙΚΩΝΙΤΗ



ΚΑΤΟΨΗ ΧΩΡΩΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΕΓΗ



ΚΑΤΟΨΗ ΣΤΕΓΩΝ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙV

ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΝΑΟΥ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

Όπως αναφέρθηκε και στην ιστορική αναδρομή, ο Ιερός Ναός υφίσταται με τη σημερινή μορφή από το 1902. Στη διάρκεια αυτών των 110 χρόνων έχει καταπονθεθεί αρκετές φορές τόσο από τους σεισμούς όσο και από την αποσάθρωση των υλικών με κύρια αιτία την υγρασία, γεγονός αναμενόμενο δεδομένης της θέσης του ναού (περίπου 100 μ. από το λιμάνι).

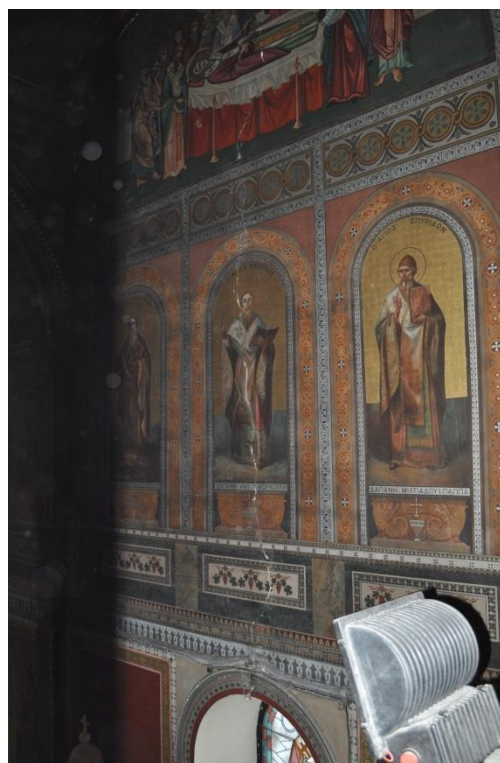
Συγκεντρωτικά λοιπόν οι βλάβες που παρουσιάζονται παρακάτω θα χωριστούν σε αυτές που έχουν προκληθεί από την υγρασία και την πολυκαιρία και σε αυτές που προκλήθηκαν λόγω σεισμών, συμπεριλαμβανομένου και του σεισμού της Αθήνας το 1999. Οι τελευταίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν στοιχεία στο φορέα, για την αντισεισμική του θωράκιση.

Οι ρωγμές εμφανίζονται σε αρκετά σημεία της φέρουσας τοιχοποιίας κυρίως εσωτερικά. Παρουσιάζονται σε συντριπτικό ποσοστό στην κάτω παρειά των τόξων. Οι πιο έντονες απ' αυτές βρίσκονται στην κάτω παρειά της θολοδομίας καθ' όλο το μήκος της στη διαμήκη και στην εγκάρσια διεύθυνση. Επίσης ρωγμές παρουσιάζουν και τα τόξα στα οποία εδράζονται οι τρούλοι, καθώς και τα τρίγωνα αποφόρτισης σε κάθε τρούλο.

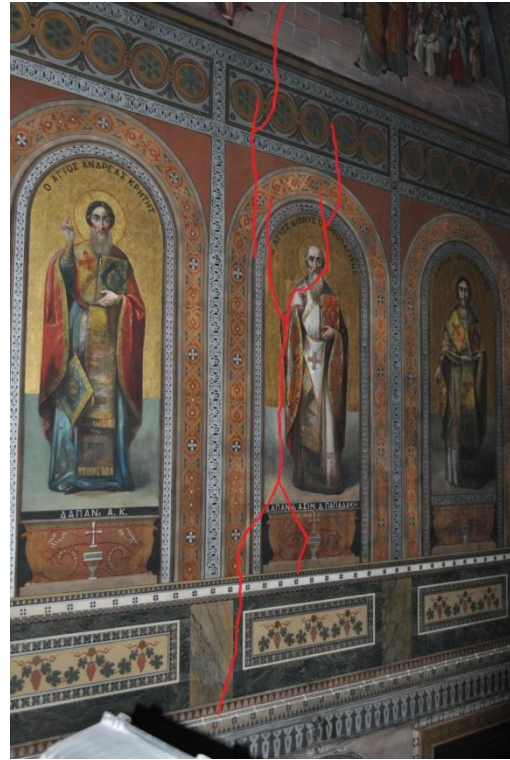
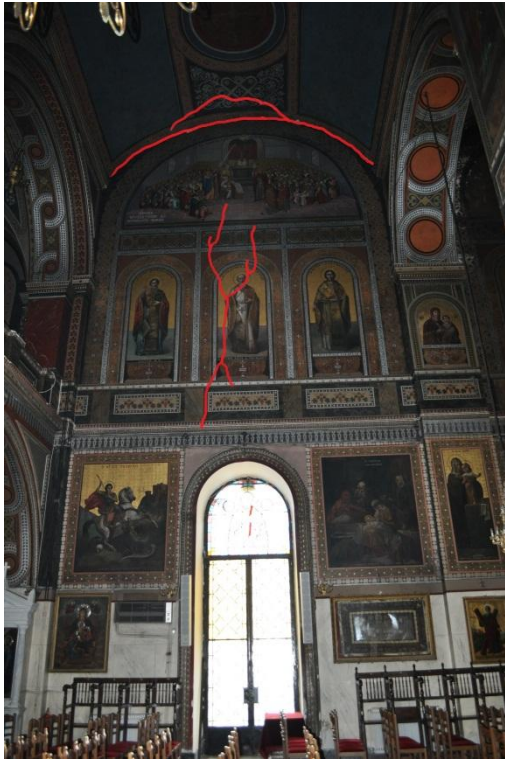
4.2 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

4.2.1 ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ

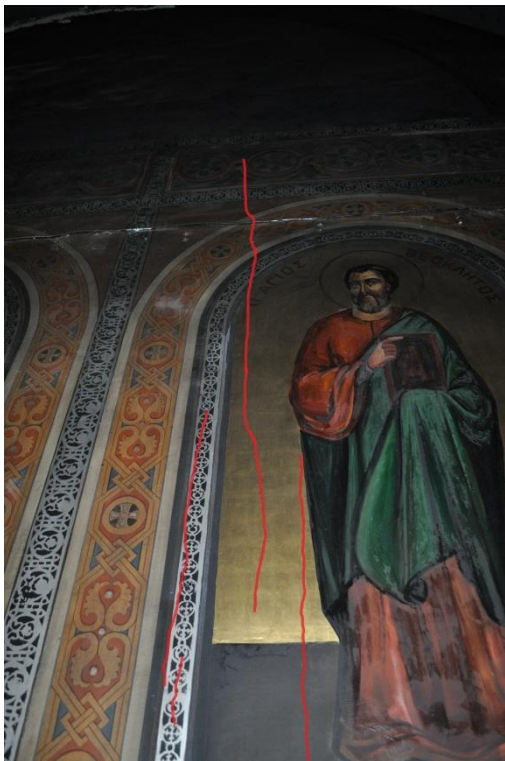
4.2.1.1 ΚΥΡΙΩΣ ΝΑΟΣ



Εικόνα 4.1- Διαμετρής ρωγμή και αποκόλληση του τυμπάνου στη νότια τοιχοποιία (δεξιά είσοδος)



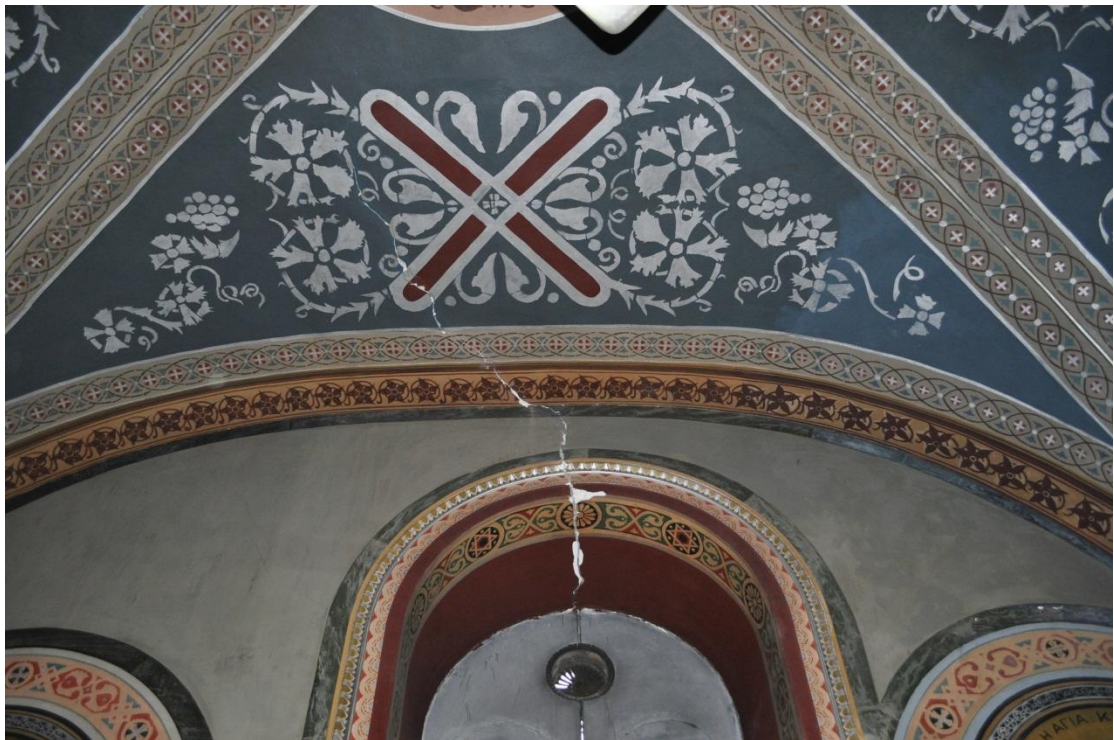
Εικόνα 4.2- Μεγάλη ρωγμή και αποκόλληση του τυμπάνου στη βόρεια τοιχοποιία (αριστερή είσοδος)



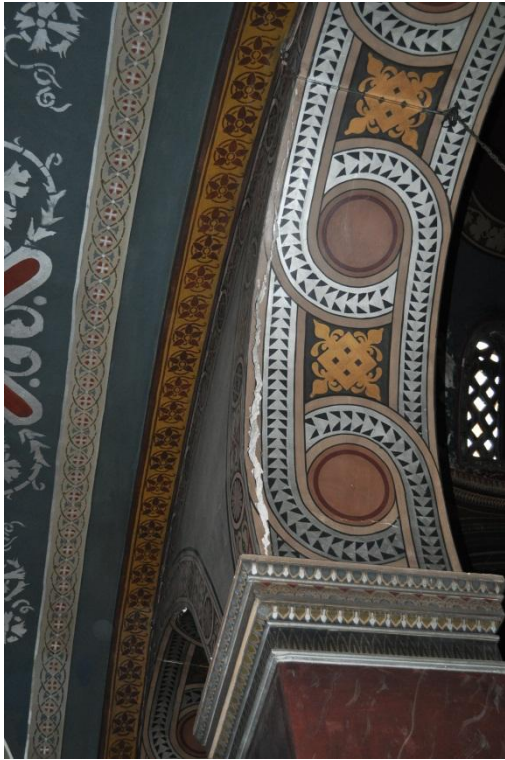
Εικόνα 4.3- Ρωγμές στη δυτική τοιχοποιία (κεντρική είσοδος)



Εικόνα 4.4- Ενδεικτικό μέγεθος ρωγμής



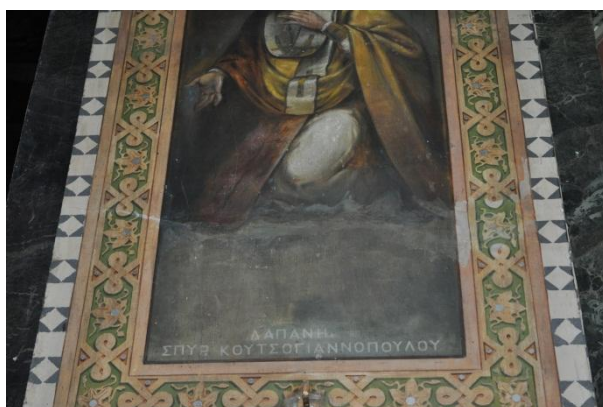
Εικόνα 4.5- Ρωγμή στην οροφή του γυναικονίτη



Εικόνα 4.6- Ρωγμές στα τόξα του γυναικωνίτη



Εικόνα 4.6- Ρωγμές σε τόξο του γυναικωνίτη



Εικόνα 4.7- Οριζόντιες ρωγμές στα δύο κεντρικά υποστυλώματα



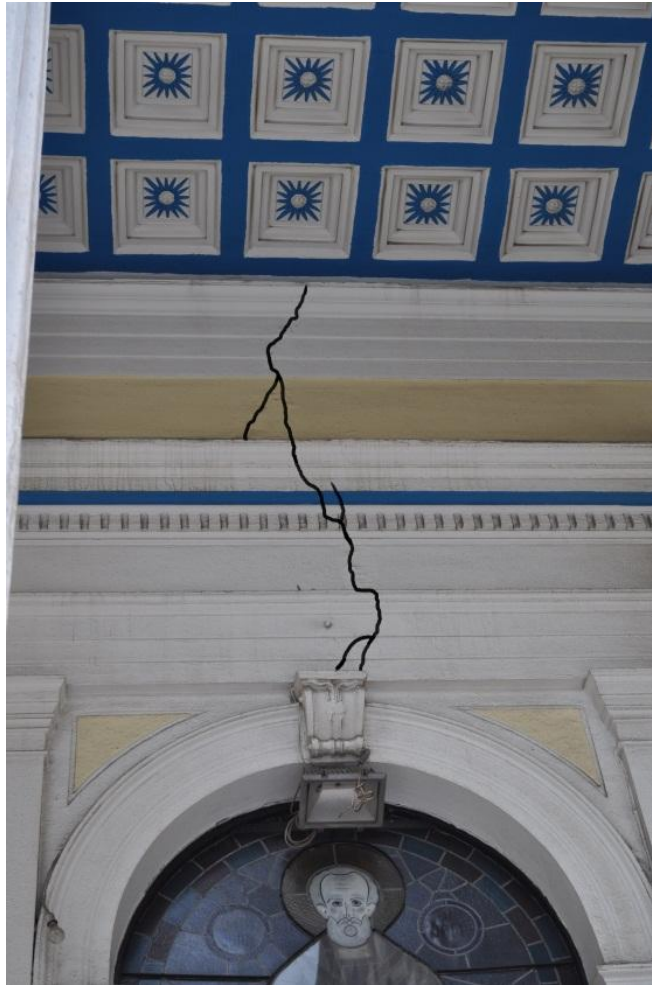
Εικόνα 4.8- Ρωγμή στη βόρεια όψη



Εικόνα 4.9- Ρωγμή στη βόρεια όψη



Εικόνα 4.10- Ρωγμή στη βόρεια όψη



Εικόνα 4.11- Ρωγμές πάνω από την είσοδο της νότιας όψης



Εικόνα 2.12- Ρωγμές στη θεμελίωση του Ιερού Ναού



Εικόνα 4.13- Μετατόπιση σφονδύλου του δυτικού κίονα του βόρειου Προπύλου εξαιτίας βομβαρδισμού κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου πολέμου



Εικόνα 4.14- (α) Ρηγμάτωση σε σφόνδυλο του βορείου Προπύλου, (β) διανοιγμένοι αρμοί στα μάρμαρα των παραθύρων του τρούλου

4.2.1.2 ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΑ



Εικόνα 4.15- Φθορές και ρηγματώσεις στο νότιο κωδωνοστάσιο

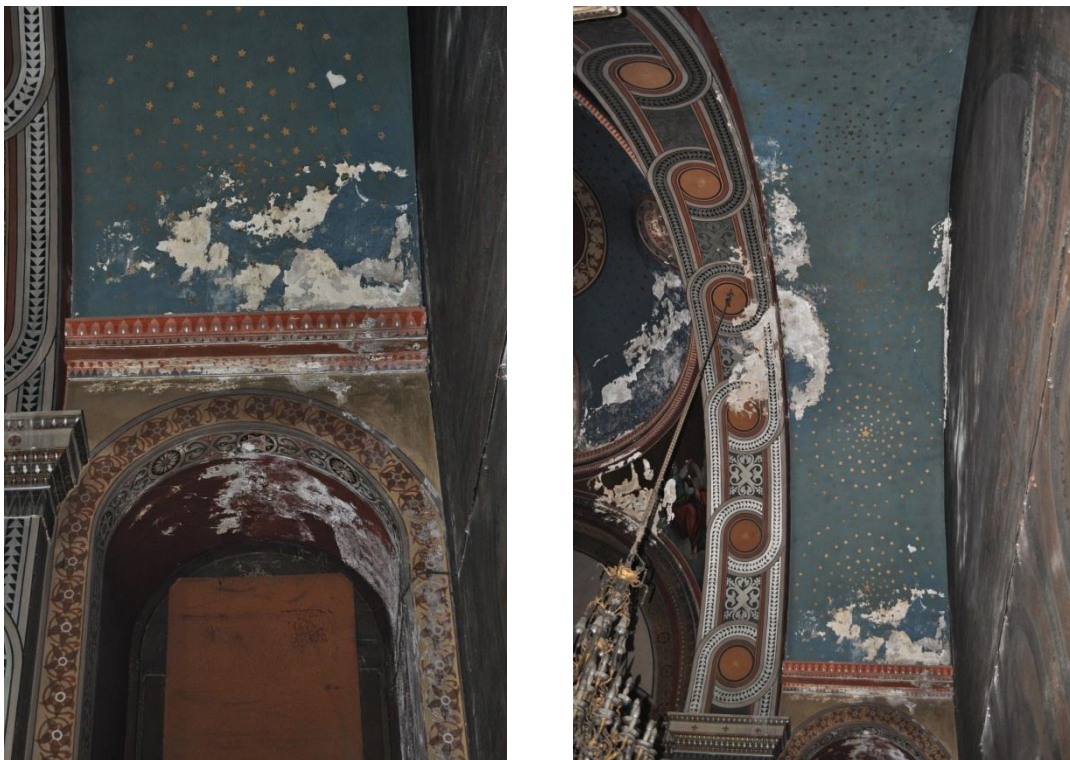


Εικόνα 4.16- Ρωγμή στη βάση του κωδωνοστασίου

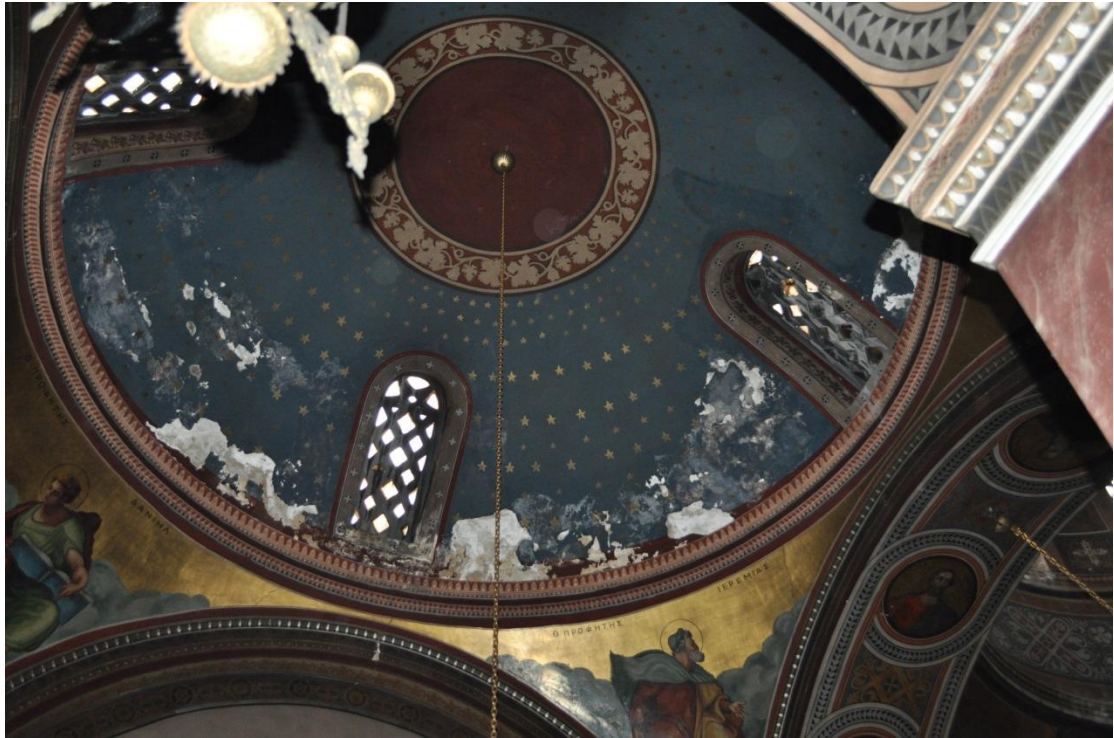


Εικόνα 4.17- Βλάβες εσωτερικά του κωδωνοστασίου

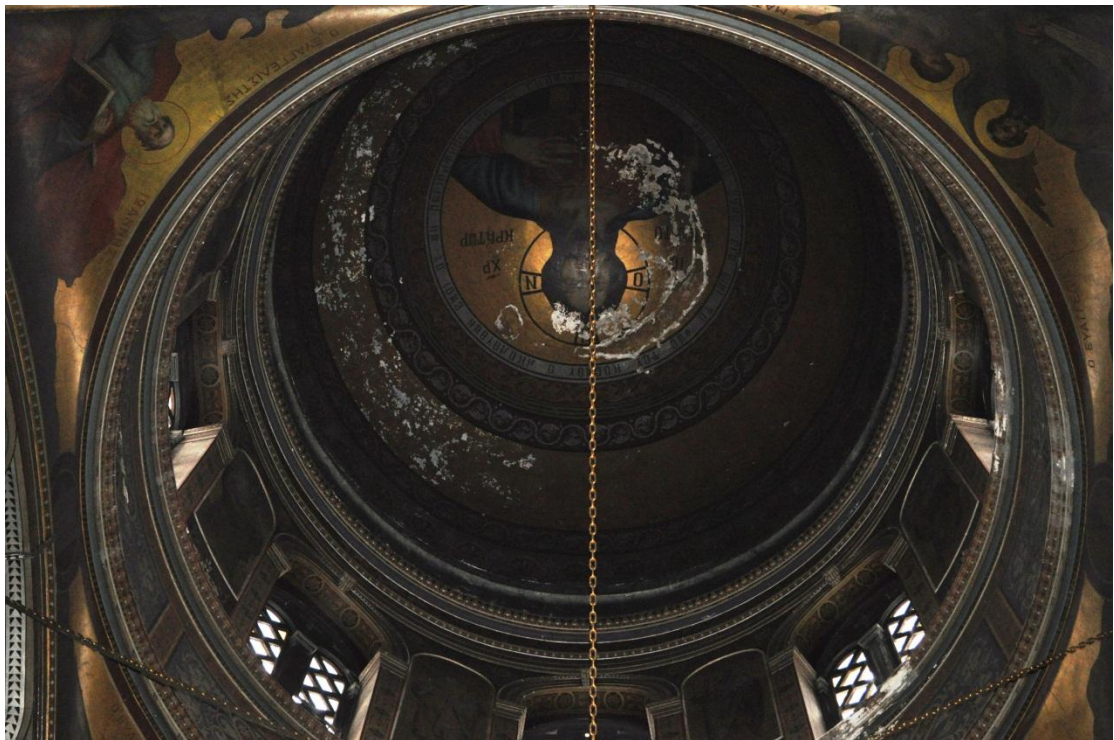
4.2.2 ΥΓΡΑΣΙΑ



Εικόνα 4.15- Υγρασία σε τόξα του γυναικωνίτη



Εικόνα 4.16- Υγρασία στο δυτικό τρούλο



Εικόνα 4.17- Υγρασία στον κεντρικό τρούλο



Εικόνα 4.18- Ρωγμές πάνω από την είσοδο της νότιας όψης



Εικόνα 4.19- Οι διανοιξίξεις και οι αποσαθρώσεις των αρμών των μαλτεζοπλακών



Εικόνα 4.20- Η επικάλυψη των περιφερειακών στηθαίων της στέγης



Εικόνα 4.21- Τα φθαρμένα επιχρίσματα στις βάσεις των τρούλων, η διαβρωμένη μόνωση και η βλάστηση η οποία έχει αναπτυχθεί σε πολλά σημεία.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

ΕΛΕΓΧΟΙ ΤΛΙΚΩΝ &
ΔΟΜΗΜΑΤΟΣ Ι.Ν.

5.1 ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΑ

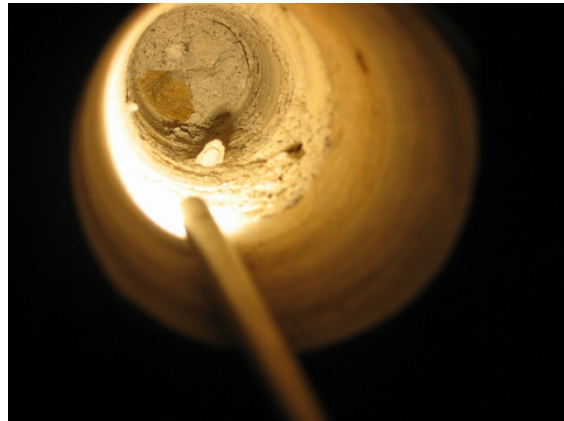
Όπως ήδη έχει αναφερθεί ο Ιερός Ναός του Αγ.Νικολάου στον Πειραιά αποτελείται απο τρίστρωτη φέρουσα τοιχοποιία. Με σκόπο να βρεθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών του οικοδομήματος διενεργήθηκαν κάποια πειράματα.

Συγκεκριμένα σε τρία χαρακτηριστικά σημεία του Ιερού Ναού, δύο σε τοιχοποιία και ένα σε πεσό, ανοίχθηκαν οπές διαστάσεων 50x50cm. Ακολούθως με χρήση κρουσιμέτρου μετρήθηκε η αντοχή των λίθων. Από τις μετρήσεις και σύμφωνα με τους κατάλληλους υπολογισμούς προέκυψε ότι η αντοχή των λίθων είναι:

$$f_{bc} = 40\text{Mpa}$$

5.2 ΤΥΠΟΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Για την εύρεση του τύπου της τοιχοποιίας, δηλαδή την εγκάρσια διάταξη των υλικών της, στα σημεία διάνοιξης των οπών έγινε λήψη πυρήνων και ενδοσκόπηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τοίχοι αποτελούνται από τρεις στρώσεις. Οι εξωτερικές στρώσεις αποτελούν αργολιθοδομή πάχους 30-35cm. Η εσωτερική στρώση αποτελείται από συμπαγές κονίαμα και μικρά λιθосώματα.



Οπή 1- Τοιχοποιία



Οπή 2- Υποστύλωμα



Οπή 3- Τοιχοποιία

Εικόνα 5.1- Ενδοσκόπηση

5.3 ΚΟΝΙΑΜΑ

Δείγμα του κονιάματος εστάλει στα εργαστήρια των Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ για ανάλυση. Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης προέκυψε ότι η αντοχή του κονιάματος είναι:

$$F_{mc} = 1\text{Mpa}$$

Αναλυτικά στο εργαστήριο έγιναν οι παρακάτω έλεγχοι:

- α) Φυσικός διαχωρισμός κονιάς και αδρανών.
- β) Περίθλαση ακτίνων X (XRD) τόσο στην κονία όσο και στα αδρανή
- γ) Θερμική ανάλυση TG-DTG τόσο στην κονία όσο και στα αδρανή

Διαχωρισμός κονιάς και αδρανών

Με χρήση αιχμηρού αντικειμένου, μικρού σφυριού, ήπιας θραύσης σε μηχανικό τριβείο και κοσκίνησης σε κόσκινο 63 μm διαχωρίζεται το κλάσμα της κονιάς από το αδρανές τμήμα αυτής. Για ασφαλέστερο διαχωρισμό το χονδρόκοκκο κλάσμα επεξεργάστηκε περαιτέρω και διαχωρίστηκε διαδοχικά σε 2 κλάσματα αυξανόμενης δυσκολίας στην τριβή και στον κοκκομετρικό διαχωρισμό.

Πρακτικά η παραπάνω διαδικασία σημαίνει ότι το δείγμα Κ χωρίστηκε σε 3 κλάσματα K1, K2 και K3. Από τα δείγματα αυτά το K1 προσεγγίζει την κονία και το K3 τα αδρανή. Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε

Όνομα δείγματος	Περιεχόμενο
K	Αρχικό δείγμα
K1	Κονία
K2	Ενδιάμεσο κλάσμα
K3	Αδρανή

Πίνακας 5.1- Κωδικοποίηση δειγμάτων κονιάματος προς έλεγχο

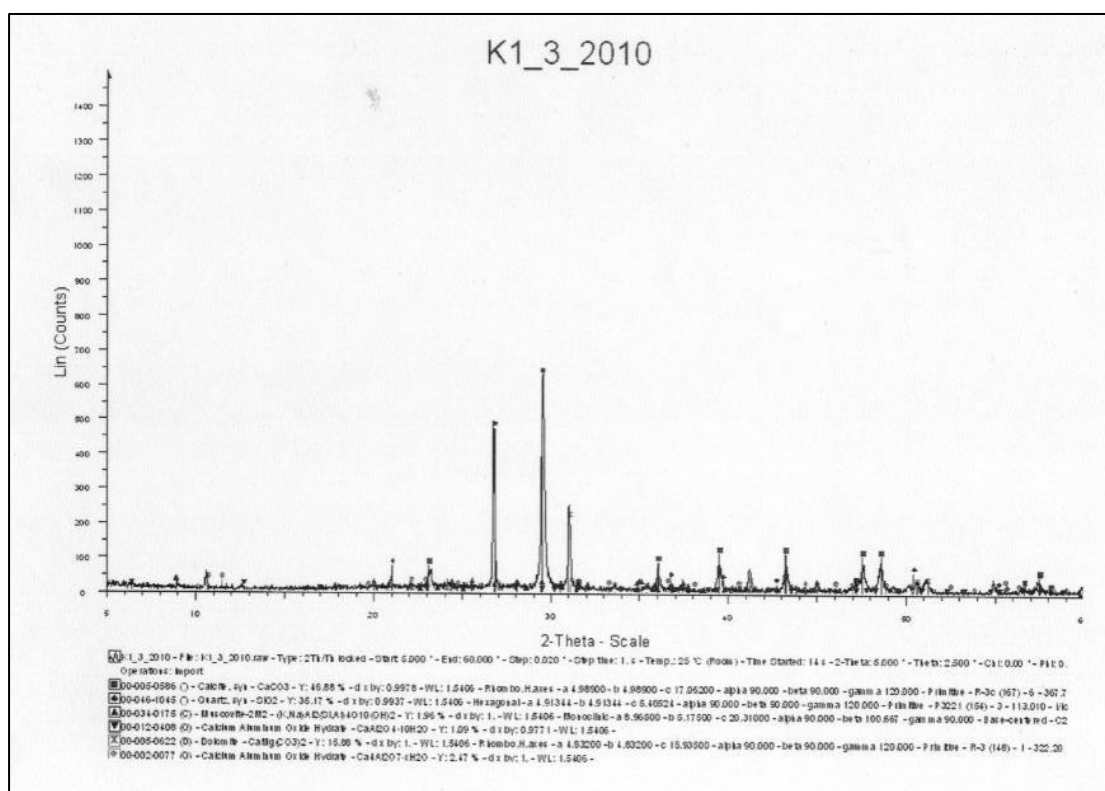
Περίθλαση ακτίνων X (XRD)

Η περίθλαση ακτίνων X είναι μια ενόργανη μέθοδος ανάλυσης και χρησιμοποιείται για την ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων. Μπορεί να εφαρμοστεί στον προσδιορισμό των ορυκτολογικών φάσεων των κονιαμάτων. Από αυτή την ανάλυση προκύπτει ότι το δείγμα περιέχει κύρια ασβεστίτη (καλσίτη), δολομίτη και χαλαζία (quartz). Τα συνοδά ορυκτά είναι μοσχοβίτης και αλβίτης.

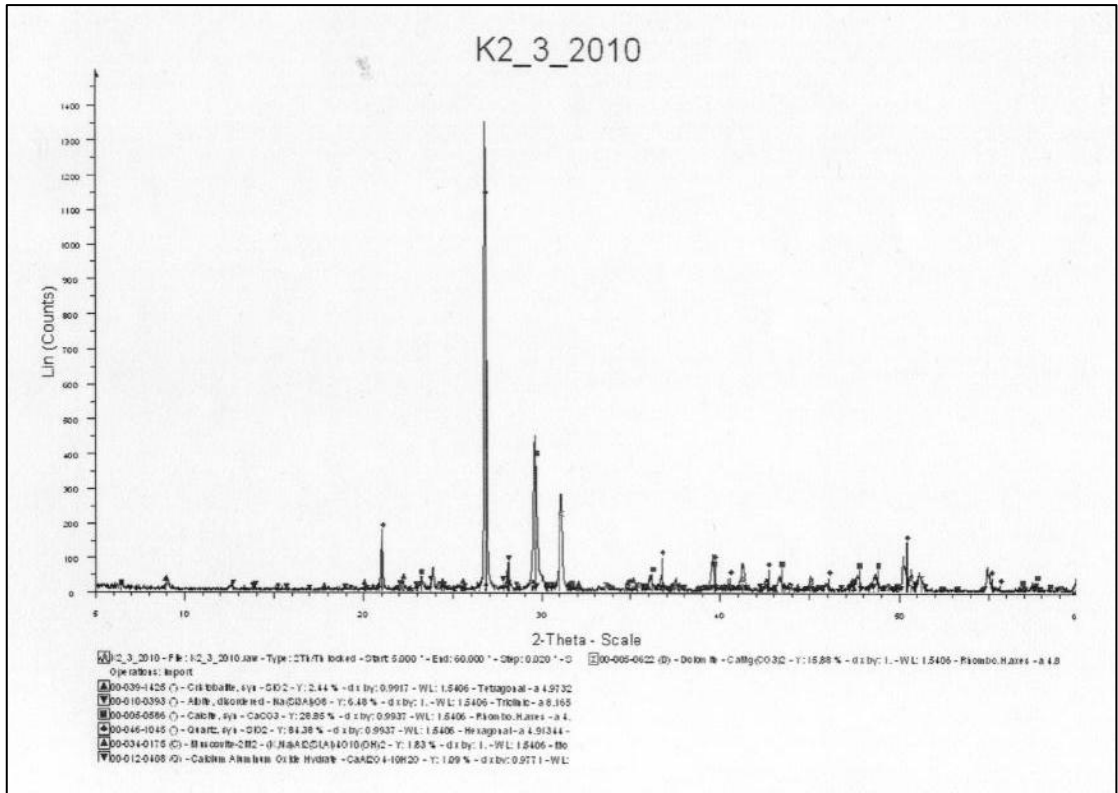
Επίσης δεν εντοπίστηκαν χαρακτηριστικές αργιλοπυριτικές φάσεις, ενυδατωμένες ή μη, που θα παρέπεμπαν στη χρήση κονιοποιημένων τούβλων, κεραμικών ή υδραυλικών κονιών (εκτός από την υδραυλική άσβεστο) σε επαρκείς ποσότητες στο αρχικό κονίαμα.

K1	K2	K3
Ασβεστίτης (CaCO ₃)	Ασβεστίτης (CaCO ₃)	Δολομίτης (CaMgCO ₃)
Χαλαζίας (SiO ₂)	Δολομίτης (CaMgCO ₃)	Χαλαζίας (SiO ₂)
Δολομίτης (CaMgCO ₃)	Χαλαζίας (SiO ₂)	Ασβεστίτης (CaCO ₃)
Μοσχοβίτης (K, Na)Al ₂ (Si, Al)O ₁₀ (OH) ₂	Μοσχοβίτης (K _v Al ₄)(Si _{8-v})O ₂₀ (OH) ₄	Μοσχοβίτης (K _v Al ₄)(Si _{8-v})O ₂₀ (OH) ₄
Ένυδρο αργιλικό ασβέστιο (Ca ₄ Al ₂ O ₇ xH ₂ O)	Ένυδρο αργιλικό ασβέστιο (Ca ₄ Al ₂ O ₄ 10H ₂ O)	Ένυδρο αργιλικό ασβέστιο (Ca ₄ Al ₂ O ₄ 10H ₂ O)

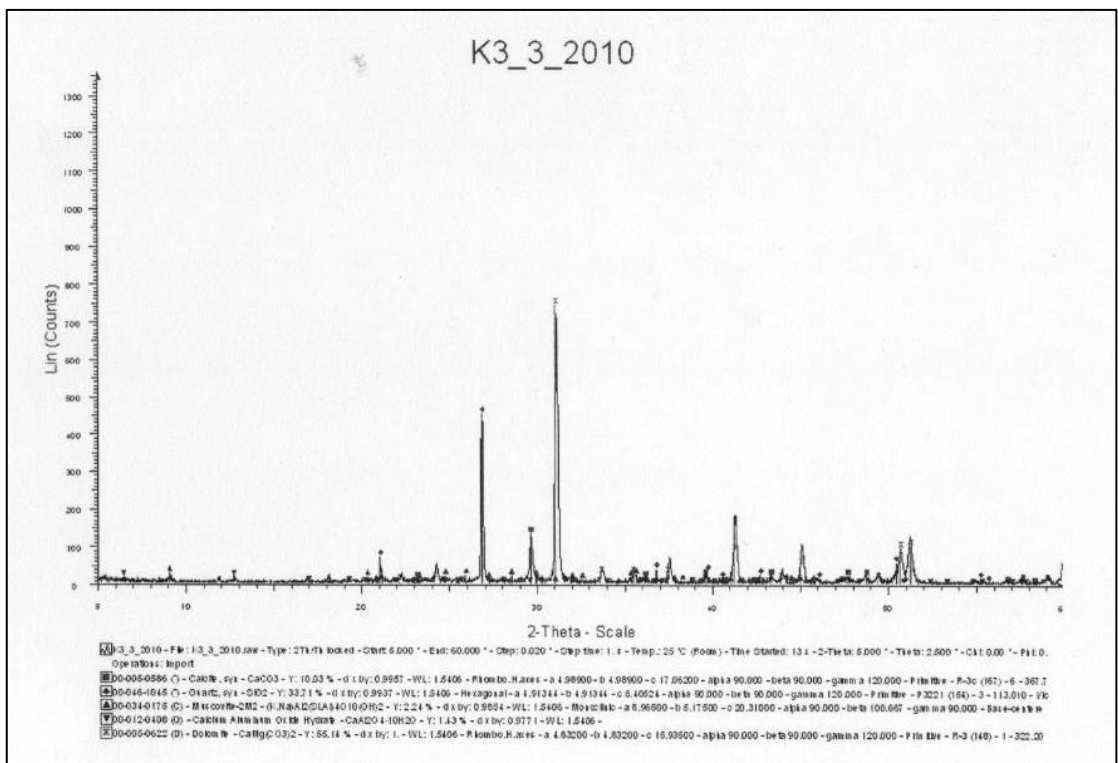
Πίνακας 5.2- Αποτελέσματα ελέγχου Περίθλασης ακτίνων X



Εικόνα 5.2- Αποτελέσματα Περίθλασης ακτίνων X για το δείγμα K1



Εικόνα 5.3- Αποτελέσματα Περίθλασης ακτίνων X για το δείγμα K2



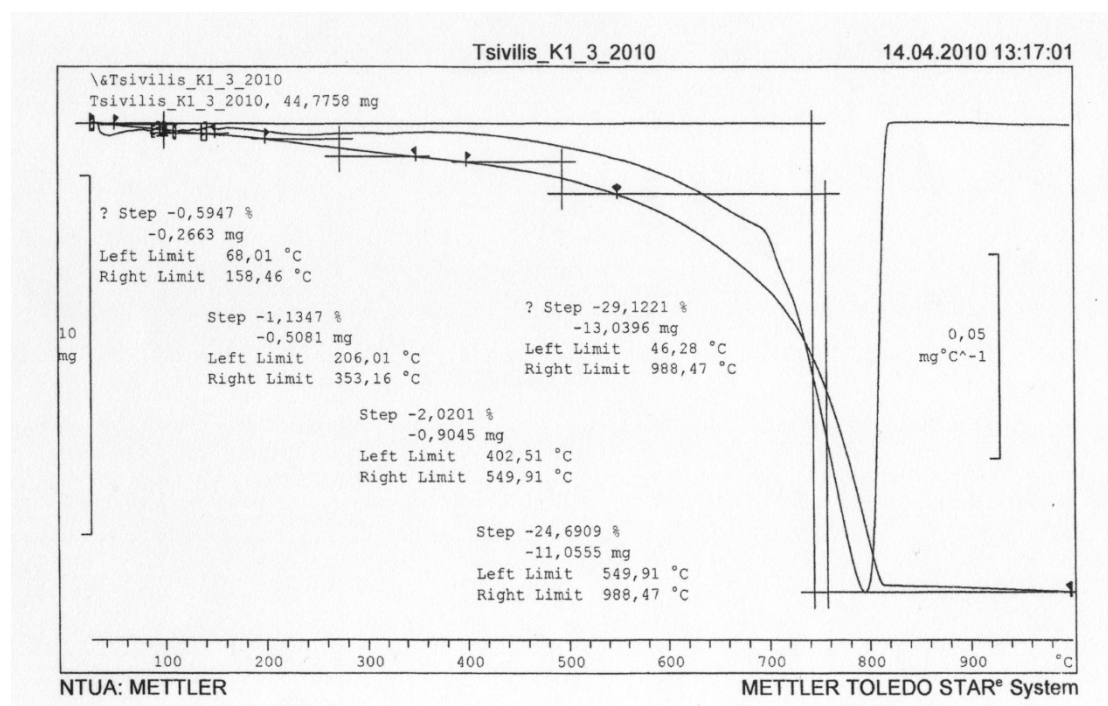
Εικόνα 5.4- Αποτελέσματα Περίθλασης ακτίνων X για το δείγμα K3

Θερμική ανάλυση (TG-DTG)

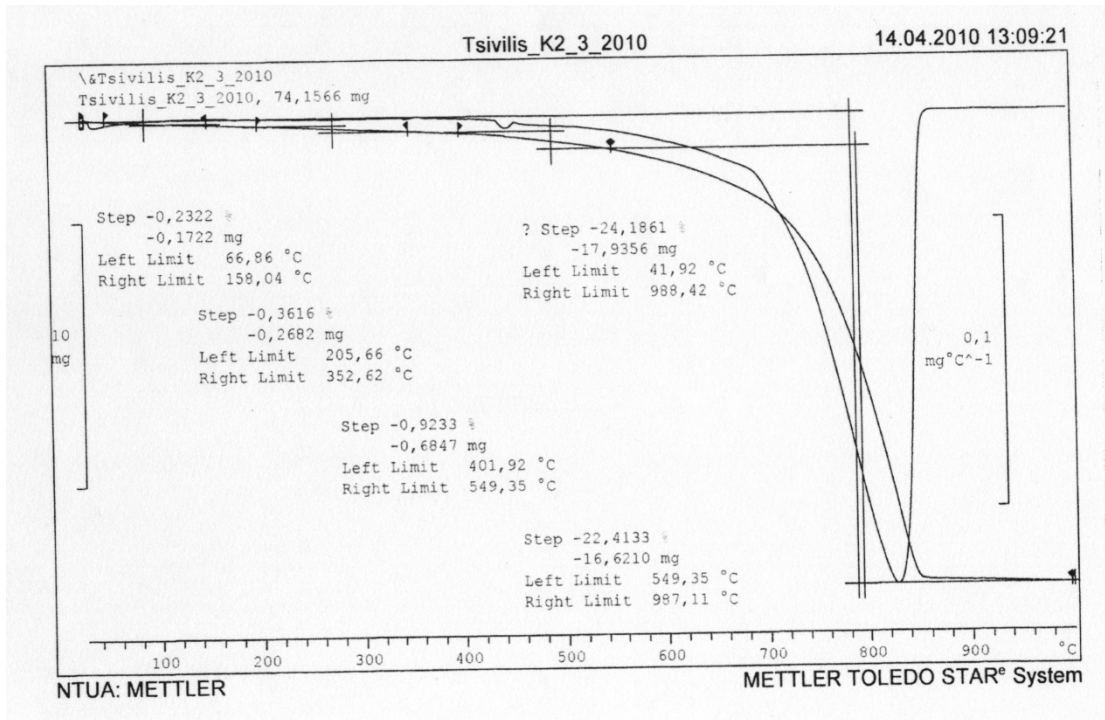
Η TG καταγράφει τις μεταβολές βάρους που υφίσταται το δείγμα κατά τη θέρμανσή του. Η DTG καμπύλη προκύπτει από την πρώτη παράγωγο της TG καμπύλης, παρουσιάζει καθαρές κορυφές και επιτρέπει τον εύκολο προσδιορισμό της αρχής και του τέλους μιας μεταβολής βάρους. Από τα διαγράμματα TG-DTG των δειγμάτων προέκυψε ότι οι απώλειες μάζας εντοπίζονται κύρια στην περιοχή 600-900 °C και αποδίδονται στη θερμική διαστολή του ασβεστίτη και του δολομίτη. Στα δείγματα δεν καταγράφεται απώλεια βάρους στην περιοχή 130-180 °C που θα ήταν ενδεικτική της παρουσίας γύψου.

Δείγμα	Θερμοκρασιακές περιοχές				
	50-150 °C	200-350 °C	400-550 °C	550-1000 °C	20-1000 °C
K1	0,5947	1,1347	2,0201	24,6909	29,1221
K2	0,2322	0,3616	0,9233	22,4133	24,1861
K3	0,2076	0,3113	0,7597	35,3401	36,8345

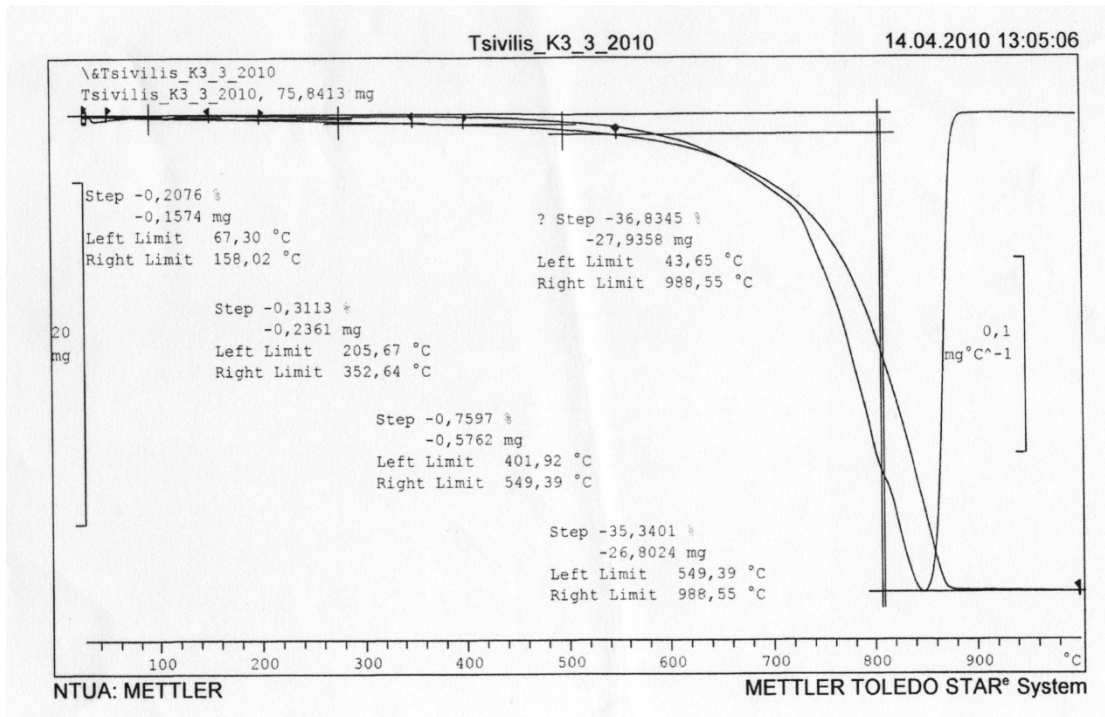
Πίνακας 5.3- Απώλειες μάζας (%) σε χαρακτηριστικές θερμοκρασιακές περιοχές



Εικόνα 5.5- Αποτελέσματα Θερμικής ανάλυσης για το δείγμα K1



Εικόνα 5.6- Αποτελέσματα Θερμικής ανάλυσης για το δείγμα K2



Εικόνα 5.7- Αποτελέσματα Θερμικής ανάλυσης για το δείγμα K3

Χαρακτηρισμός Κονιάματος

Από τις μετρήσεις που έγιναν και την παραπάνω ανάλυση προέκυψε ότι:

- Το αναλυθέν κονίαμα είναι κονίαμα υδραυλικής ασβέστου, δηλαδή η χρησιμοποιηθείσα συνδετική κονία είναι φυσική υδραυλική άσβεστος. Η περιεχόμενη κονία είναι περίπου 26%
- Τα αδρανή είναι μίγμα ασβεστολιθικής άμμου, δολομιτικής άμμου και πυριτικής άμμου. Το ποσοστό της πυριτικής άμμου εκτιμάται στο 35% της συνολικής άμμου
- Στο κονίαμα ταυτοποιήθηκε ως συνοδό ορυκτό ο μοσχοβίτης, γεγονός που φανερώνει την πιθανή κοινή προέλευση των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις κονίες και στα αδρανή.
- Εντοπίστηκαν ενυδατωμένες ασβεσταργλικές φάσεις, γεγονός που φανερώνει τη χρησιμοποίηση φυσικής υδραυλικής ασβέστου στο κονίαμα.

5.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΝΗΣΕΩΝ

Εισαγωγή

Η σεισμική συμπεριφορά ενός ναού εξαρτάται κύρια από τη σεισμική διέγερση, από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του (ιδιοπερίοδοι, ιδιοσχήματα, αποσβέσεις) και από τη σχέση που έχουν οι ιδιοπεριόδοί του με την ή τις δεσπόζουσες περιόδους της σεισμικής διέγερσης.

Ο βαθμός βλάβης μπορεί να προσδιοριστεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ελεύθερων ταλαντώσεών του. Ασυνέχεια στην καθ' ύψος ταλάντωση (ασυνέχεια γραμμής παραμόρφωσης και διαφορετικές περιόδοι ταλάντωσης) οφείλεται σε ασυνέχεια της ακαμψίας, που στις περισσότερες περιπτώσεις οφείλεται σε βλάβη του φέροντα οργανισμού.

Έχει διαπιστωθεί ότι οι ιδιοπερίοδοι μιας κατασκευής από λιθοδομή εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Από τον τρόπο σύνδεσης των φερόντων τοίχων στο επίπεδο και στο χώρο. Καθοριστικό ρόλο έχει η ύπαρξη διαφραγματικής λειτουργίας.
2. Από τις διαστάσεις της κάτοψης του μνημείου και κυρίως από το ύψος του.
3. Από τον τρόπο κατανομής των μαζών καθ' ύψος (θόλοι, τρούλοι, λοιπά συγκεντρωμένα φορτία).
4. Από τα δευτερεύοντα δομικά στοιχεία πλήρωσης του μνημείου.
5. Από το έδαφος και τον τρόπο θεμελίωσης.
6. Από τη σεισμικότητα της περιοχής που βρίσκεται το μνημείο, την ηλικία του, από τα χαρακτηριστικά των περιβαλλοντικών (μη σεισμικών) δονήσεων στις οποίες είναι σχεδόν μονίμως εκτεθειμένος (κυκλοφορία οχημάτων, μετρό, άνεμος) και το βαθμό συντήρησής του.

7. Σε ρηγματωμένα μνημεία, όπου οι ρωγμές διακόπτουν τη συνέχεια των φερόντων τοίχων καθ' ύψος ή οριζοντίως, το μέγεθος της μεταβολής της ακαμψίας και η μεταβολή της ακαμψίας καθ' ύψος του μνημείου εξαρτώνται από το μέγεθος, το είδος και τη διασπορά των βλαβών, που έχει πάθει το μνημείο.

8. Μετά την επισκευή οι ιδιοπερίοδοι, τα ιδιοσχήματα και οι αντίστοιχες αποσβέσεις εξαρτώνται από το είδος και την έκταση της επισκευής όπως και από το είδος και τα ποσοστά θραύσεων που υπήρχαν, προ της επισκευής.

9. Από το πλάτος της ταλάντωσης χωρίς όμως αυτό να ισχύει πάντοτε.

Είναι γεγονός ότι όλες οι κατασκευές και το έδαφος επειδή βρίσκονται πάνω στο φλοιό της Γης έχουν μια μόνιμη ταλάντωση. Διέγερσή τους είναι οι διάφορες διαταράξεις από το περιβάλλον όπως είναι ο συνηθισμένος άνεμος, τα κύματα της θάλασσας, η επίδραση του ήλιου, οι διάφορες μικροδονήσεις του φλοιού της Γης, η κυκλοφορία και δονήσεις που προέρχονται από τη δραστηριότητα του ανθρώπου.

Οι δονήσεις αυτές, που λέγονται περιβαλλοντικές (ambient vibrations), είναι μόνιμες, μικρού πλάτους και το σπουδαιότερο, το πεδίο συχνοτήτων του φάσματος διέγερσης έχει μεγάλο εύρος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να διεγερθούν πολλές κανονικές μορφές των οποίων η συχνότητά τους βρίσκεται στο φάσμα αυτό. [4,5,6]

Ιστορικό

Οι μετρήσεις Μικροδονήσεων στον Ιερό Ναό Αγίου Νικολάου της Ι.Μ. Πειραιώς πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή Κ. Σπυράκο.

Η παρούσα τεχνική έκθεση αναφέρεται στις μετρήσεις μικροδονήσεων για τον προσδιορισμό της θεμελιώδους και των ανώτερων ιδιομορφών των ναών στη σημερινή του κατάσταση και περιγράφει αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

Στους ναούς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροδονήσεων την 10^η Μαΐου 2010 προκειμένου να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους. Οι μετρήσεις δονήσεων πραγματοποιήθηκαν στους ναούς όπως αυτοί είναι σήμερα.

Προκειμένου να εκπληρωθεί ο στόχος της διερεύνησης αυτής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 2 διαφορετικές θέσεις. Οι ακριβείς θέσεις και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στη συνέχεια.

Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις και μέθοδος ανάλυσης, θέσεις και διευθύνσεις μετρήσεων

Για τις μετρήσεις έγινε χρήση ενός συστήματος με δύο κανάλια, τύπου VSS (Vibration Survey System) της Kinometrics με ηλεκτρομαγνητικούς λήπτες ταχύτητας τύπου SS-1 (Ranger Seismometer) με ιδιαίτερο ενισχυτή σημάτων που έχει κυκλώματα ολοκλήρωσης και διαφόρισης με σειρά βαθυπερατών φίλτρων τύπου SC-1 (Signal Conditioner).

Τα σήματα καταγράφονται ψηφιακά με τη χρήση αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα ακριβείας 24bit. Το σύστημα καταγραφής και συλλογής δεδομένων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.7.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολύ ευαίσθητα αφού μπορούν και καταγράφουν πολύ μικρές ταχύτητες. Η ευαισθησία αυτή είναι απαραίτητη γιατί χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι περιβαλλοντικές διεγέρσεις- ταλαντώσεις όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή. Η χρήση των βαθυπερατών φίλτρων έπαιξε σημαντικό ρόλο για τη διευκόλυνση των μετρήσεων και το διαχωρισμό των ιδιοπεριόδων.

Οι αναλύσεις έγιναν με χρήση κατάλληλων λογισμικών. Υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις μεταφοράς και τα φάσματα Fourier σε διάφορες θέσεις. Οι συντελεστές αναγωγής για κάθε αισθητήρα ανάλογα με το κέρδος που χρησιμοποιείται δίνεται στον Πίνακα 5.4.

Αισθητήρας	Κέρδος Ενισχυτή (db)			
	54	48	42	36
232	0.029477722	0.014812926	0.007425119	0.003719586
235	0.028666205	0.014405128	0.007220707	0.003617187
292	0.030474847	0.015313993	0.007676284	0.003845407

Πίνακας 5.4- Συντελεστές Αναγωγής από Τάση (V) σε ταχύτητα (mm/sec).



Εικόνα 5.8- Σύστημα καταγραφής και συλλογής δεδομένων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πραγματοποιήθηκαν συνολικά μετρήσεις σε 3 θέσεις. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στη στάθμη του δαπέδου του ισογείου, στο δάπεδο του γυναικωνίτη και στη στάθμη οροφής της κεντρικής θολοδομίας της οροφής. Στον Πίνακα 5.5 δίνεται συνοπτικά η θέση και η διεύθυνση κάθε μέτρησης.

Αρ. Μέτρησης	Θέση	Στάθμη (m)	Διεύθυνση
1	Δάπεδο Ισογείου Ναού	0.00	A-Δ
2	Δάπεδο Ισογείου Ναού	0.00	B-N
1	Δάπεδο γυναικωνίτη	+5.00	A-Δ
2	Δάπεδο γυναικωνίτη	+5.00	B-N
1	Οροφή - Κεντρική Θολοδομία Δυτική Όψη	+15.00	A-Δ
2	Οροφή - Κεντρική Θολοδομία Δυτική Όψη	+15.00	B-N

Πίνακας 5.5- Περιγραφή μετρήσεων- Θέση, στάθμη, διεύθυνση

Μετρήσεις στη θέση 1: Δάπεδο ισογείου- Οροφή Θολοδομίας - Διεύθυνση A-Δ

Κατά τις μετρήσεις αυτές τα όργανα τοποθετήθηκαν στη θέση όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8. Στον Πίνακα 5.5, δίνονται οι σχετικές πληροφορίες για την βαθμονόμησή τους.

Κανάλι	Διεύθυνση	Αρ. Οργάνου	Βαθυπερατό Φίλτρο (Hz)	Κέρδος (db)
1	A-Δ	232	20	48
2	A-Δ	235	20	48
3	A-Δ	292	20	48

Πίνακας 5.5- Θέσεις οργάνων

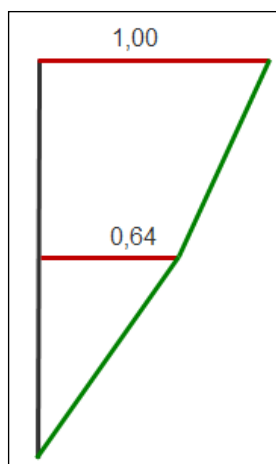


Εικόνα 5.9- Τοποθέτηση οργάνων στην οροφή θολοδομίας Κανάλι 3.

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες των κανονικών μορφών.

α/α Ιδιομορφής	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Λόγος απόσβεσης (%)
1	3,0518	4,2
2	5,3700	3,0

Πίνακας 5.6- Μέτρηση στη Θέση 1. Διεύθυνση Α-Δ.



Εικόνα 5.10- 1η Ιδιομορφή – Διεύθυνση Α-Δ.

Μετρήσεις στη θέση 2: Δάπεδο ισογείου- Οροφή Θεολοδομίας - Διεύθυνση Β-Ν

Κατά τις μετρήσεις αυτές τα όργανα τοποθετήθηκαν στη θέση όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.10. Στον Πίνακα 5.7, δίνονται οι σχετικές πληροφορίες για την βαθμονόμησή τους.

Κανάλι	Διεύθυνση	Αρ. Οργάνου	Βαθυπερατό Φίλτρο (Hz)	Κέρδος (db)
1	B-N	232	20	48
2	B-N	235	20	48
3	B-N	292	20	48

Πίνακας 5.7- Θέσεις οργάνων

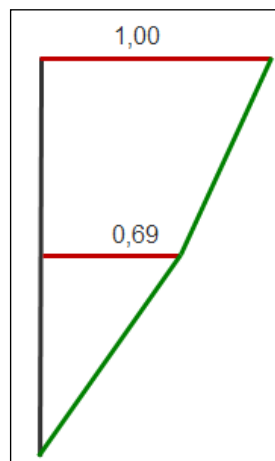


Εικόνα 5.11- Τοποθέτηση οργάνων στο δάπεδο ισογείου Κανάλι 3.

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες των κανονικών μορφών.

α/α Ιδιομορφής	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Λόγος απόσβεσης (%)
1	2,80762	2,0
2	5,37000	3,0

Πίνακας 5.8- Μέτρηση στη Θέση 2. Διεύθυνση Β-Ν.



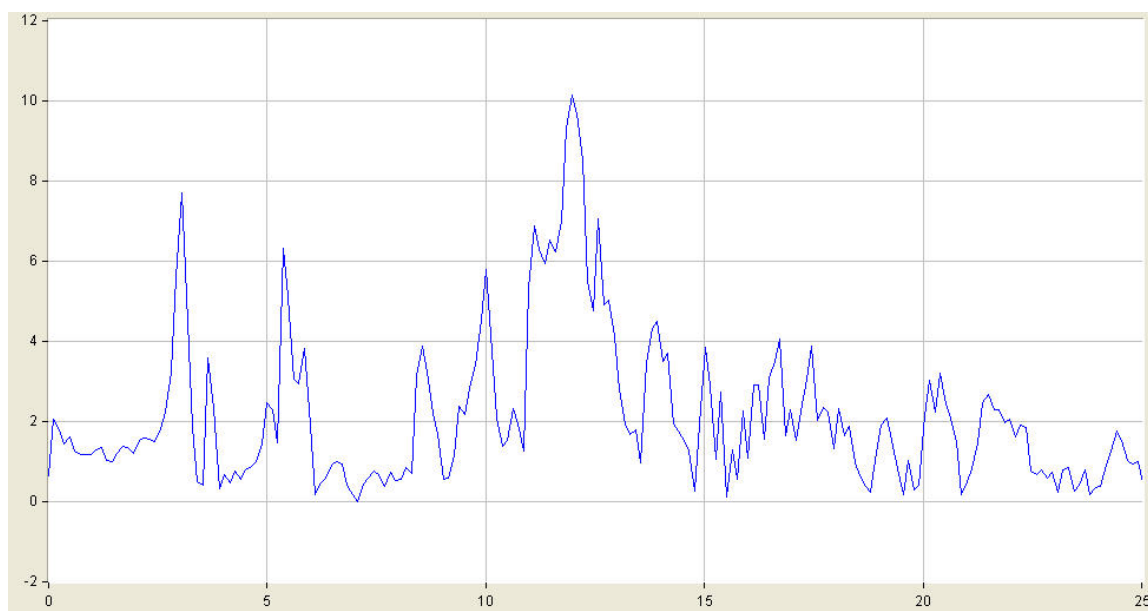
Εικόνα 5.12- 1η Ιδιομορφή – Διεύθυνση Β-Ν.

Αποτελέσματα μετρήσεων συμπεράσματα- παρατηρήσεις

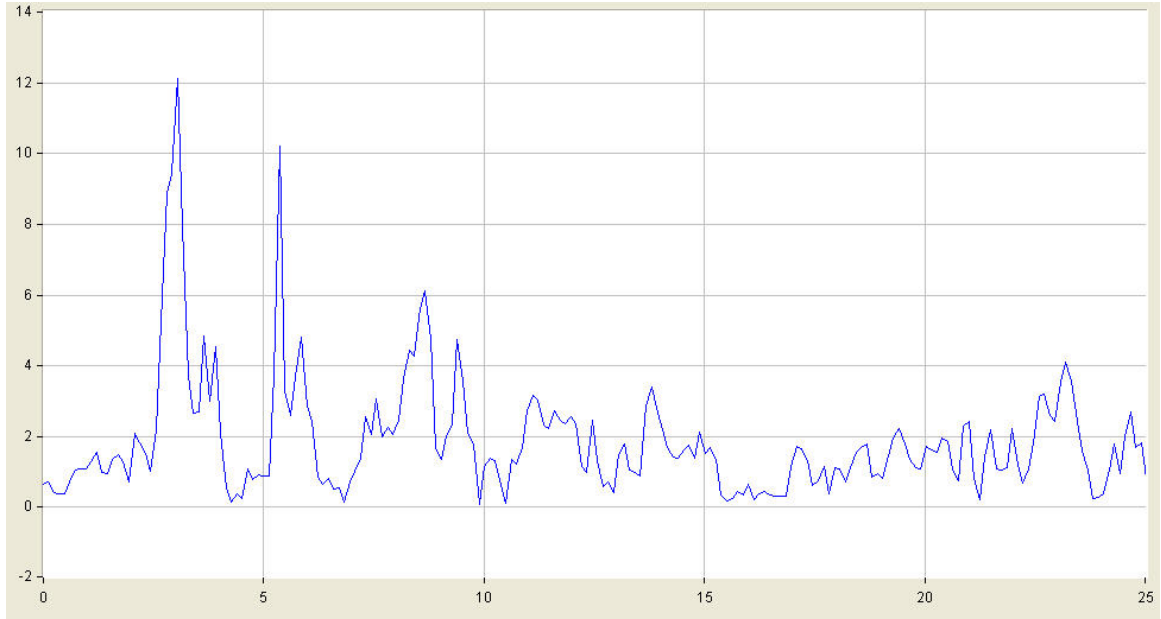
Κατά τη διεύθυνση Α-Δ, υπολογίστηκαν δυο ιδιομορφές με 3.0518Hz και απόσβεση 4.2% η πρώτη και ιδιοσυχνότητα 5.37Hz με απόσβεση 3% η δεύτερη. Κατά τη διεύθυνση Β-Ν, υπολογίστηκαν δυο ιδιομορφές με 2.80762Hz και απόσβεση 2% η πρώτη και ιδιοσυχνότητα 5.37Hz με απόσβεση 3% η δεύτερη. Συνεπώς, η δεύτερη ιδιομορφή επηρεάζει και τις δύο διευθύνσεις κίνησης του κτιρίου.

Επειδή οι μετρήσεις των μικροδονήσεων αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις με μικρά εύρη, οι ιδιοσυχνότητες οι οποίες υπολογίζονται από αυτές είναι μεγαλύτερες από αυτές οι οποίες θα αναπτυχθούν κατά τη σεισμική διέγερση του ναού.

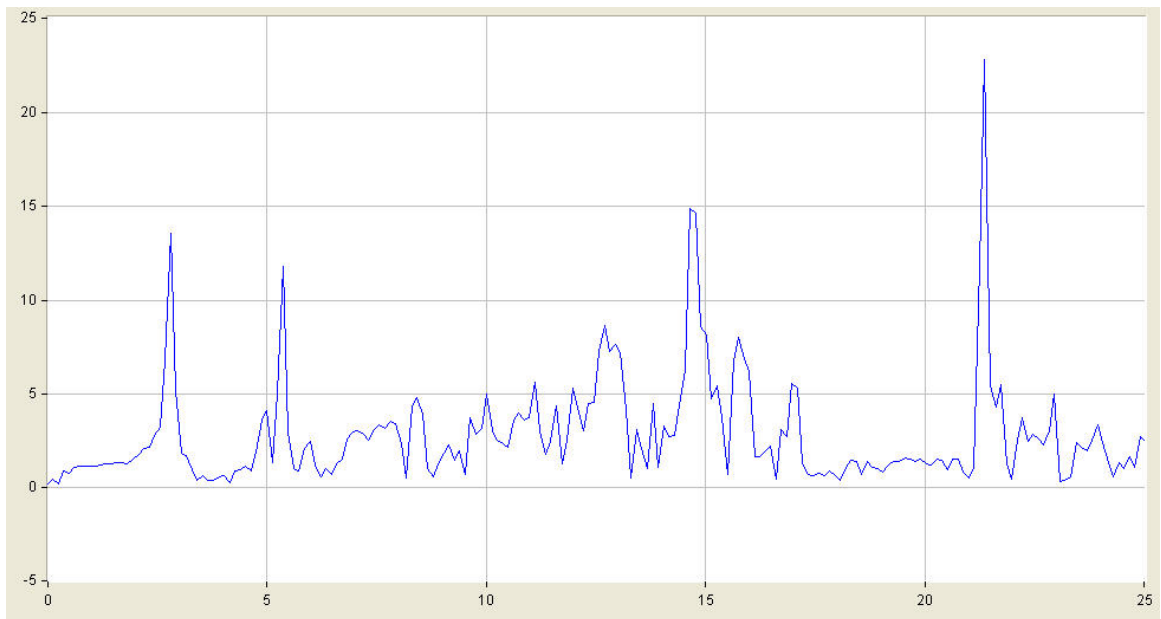
Για τη βαθμονόμηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της σεισμικής καταπόνησης του φορέα οι ιδιοσυχνότητες του αριθμητικού προσομοιώματος οφείλουν να είναι 1.30 φορές μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν με τη μέθοδο των μικροδονήσεων.



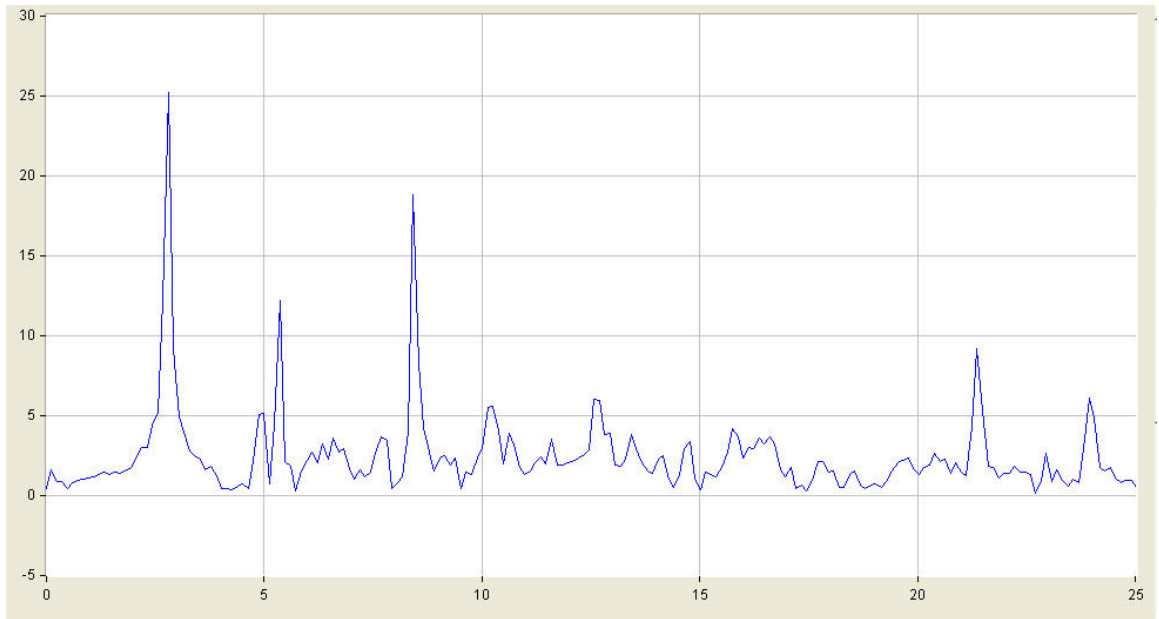
Εικόνα 5.13- Συνάρτηση Μεταφοράς Διεύθυνση Α-Δ (Γυναικωνίτης)



Εικόνα 5.14- Συνάρτηση Μεταφοράς Διεύθυνση Α-Δ (Οροφή θολοδομίας)



Εικόνα 5.15- Συνάρτηση Μεταφοράς Διεύθυνση Β-Ν (Γυμναστήριο)



Εικόνα 5.16- Συνάρτηση Μεταφοράς Διεύθυνση B-N (Οροφή θολοδομίας)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

ΑΝΑΛΥΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ

6.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

- **Θλιπτική Αντοχή Τοιχοποιίας**

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Τάσιου (1986) [7]:

$$f_{wc} = \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - a + \beta f_{mc}$$

Όπου:

f_{bc} και f_{mc} η θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος και του κονιάματος αντίστοιχα

a μειωτικός συντελεστής για τοιχοποιία από φυσικούς λίθους που λαμβάνεται ίσος με 1

β συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την συνεισφορά του κονιάματος στην αντοχή και για λιθοδομή είναι ίσος με 0,5

Από τα προηγούμενα δεδομένα προκύπτει ότι η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας είναι ίση με $f_{wc} = 3,71 \text{ Mpa}$.

- **Εφελκυστική Αντοχή Τοιχοποιίας**

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η εφελκυστική αντοχή θεωρήθηκε ίση με το ένα δέκατο της θλιπτικής αντοχής. Δηλαδή $f_{wt} = 0,371 \text{ Mpa}$.

- **Μέτρο Ελαστικότητας Τοιχοποιίας**

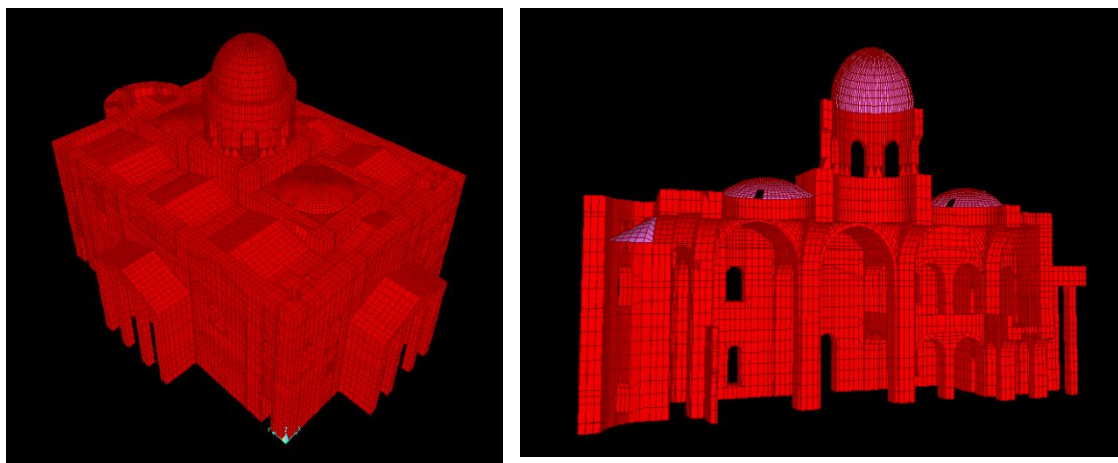
Βραχυχρόνιο: $E = 1000 f_{wc} = 3710 \text{ Mpa}$

Μακροχρόνιο: $E_{\infty} = \frac{E}{1 + \varphi_{\infty}} \cong E$ όπου $\varphi_{\infty} \approx 0$ για φυσικούς λίθους σύμφωνα με το

κεφάλαιο 3.7 του Ευρωκώδικα 6. [8]

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

Η δημιουργία και ανάλυση του προσομοιώματος του φορέα έγινε με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων SAP2000 v.15 [9]. Η τοιχοποιία και τα μάρμαρα μοντελοποιήθηκαν με στοιχεία όγκου οκτώ κόμβων, με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Επιφανειακά στοιχεία τεσσάρων κόμβων χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των τρούλων. Γραμμικά στοιχεία δύο κόμβων χρησιμοποιήθηκαν για τη σωστή σύνδεση των στοιχείων όγκου με τα επιφανειακά. Τα κωδωνοστάσια αναλύθηκαν ξεχωριστά από τον κυρίως ναό γιατί λόγω της ευκαμψίας τους επιρρέαζαν τις βασικές ιδιομορφές του ναού. Τα κωδωνοστάσια αποτελούνται από 2960 στοιχεία όγκου, 1024 επιφανειακά στοιχεία και 5570 κόμβους. Αντίστοιχα ο κυρίως ναός αποτελείται από 42180 στοιχεία όγκου, 3350 επιφανειακά στοιχεία και 63580 κόμβους.



Εικόνα 6.1- Τρισδιάστατο μοντέλο φορέα

6.2.1 ΦΟΡΤΙΑ

➤ Στατικά φορτία σχεδιασμού

Οι στατικοί και σεισμικοί συνδυασμοί επιλύθηκαν με τα ακόλουθα φορτία:

- Ίδιο βάρος: Το ίδιο βάρος του φορέα υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα με βάση τις διαστάσεις των στοιχείων και το ειδικό βάρος όπως αναγράφεται προηγουμένως. Τα κεραμίδια της οροφής προσομοιώθηκαν ως πρόσθετο βάρος ίσο με $0,9 \text{ kN/m}^2$.
- Κινητά φορτία: $5,0 \text{ kN/m}^2$. Αντιπροσωπεύει το κινητό φορτίο που ασκείται σε όλη την επιφάνεια του γυναικωνίτη.

➤ **Δυναμικά φορτία σχεδιασμού με βάση τον Ευρωκώδικα 8**

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με βάση το Φάσμα Σχεδιασμού που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 8 [10]. Όπως αναπτύσσεται ακολούθως σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8-1, το φάσμα σχεδιασμού Τύπου 1 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης στις δύο οριζόντιες και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για τον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα:

• **Οριζόντιες συνιστώσες**

Για τις οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής δράσης το φάσμα σχεδιασμού, $S_d(T)$, ορίζεται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

όπου

T είναι η περίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού συστήματος μιας ελευθερίας κίνησης

a_g είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A ($a_g = \eta \cdot a_{gR}$);

T_B είναι η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_C είναι η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_D είναι η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος

S είναι ο συντελεστής εδάφους

$S_d(T)$ είναι το φάσμα σχεδιασμού

q είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς

β είναι συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.

Μέγιστη Οριζόντια Σεισμική επιτάχυνση εδάφους: $a_{gR} = 0,16$

Ο Πειραιάς ανήκει στη Ζώνη I (πίνακας 2, Εθνικό προσάρτημα Ευρωκώδικα 8)

Συντελεστής σπουδαιότητας: $\eta = 1,2$

Η κατηγορία σπουδαιότητας λαμβάνεται Σ3, στην οποία ανήκουν Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.

Τύπος εδάφους: B

Για φάσματα Τύπου 1 ισχύουν: $S = 1,2$

$$T_B = 0,15$$

$$T_C = 0,5$$

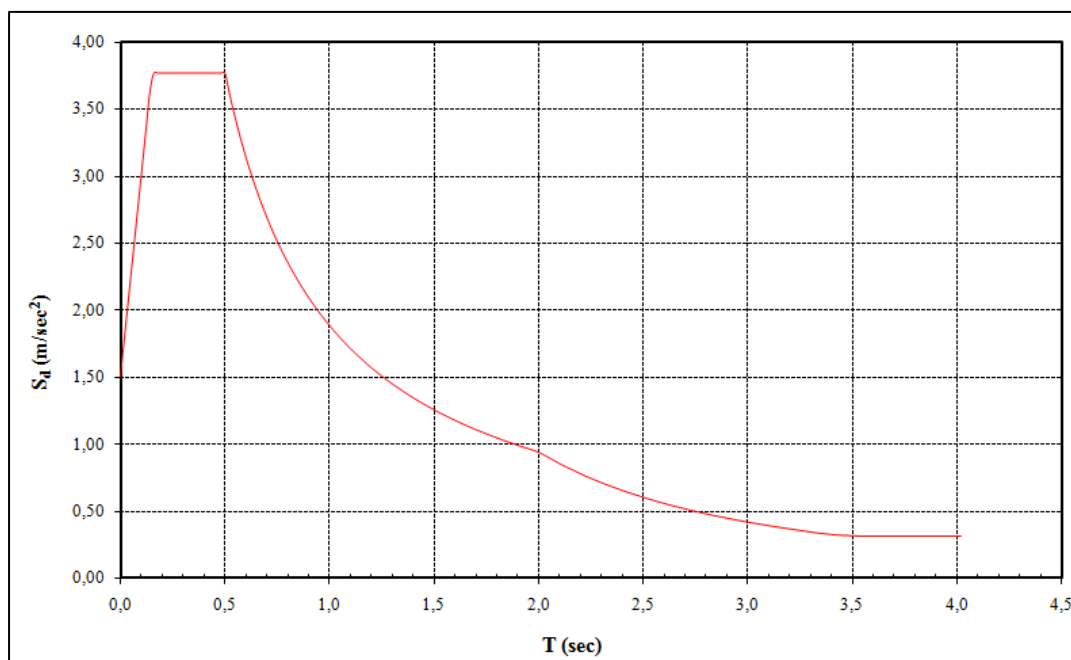
$$T_D = 2,0$$

Συντελεστής συμπεριφοράς: $q = 1,5$

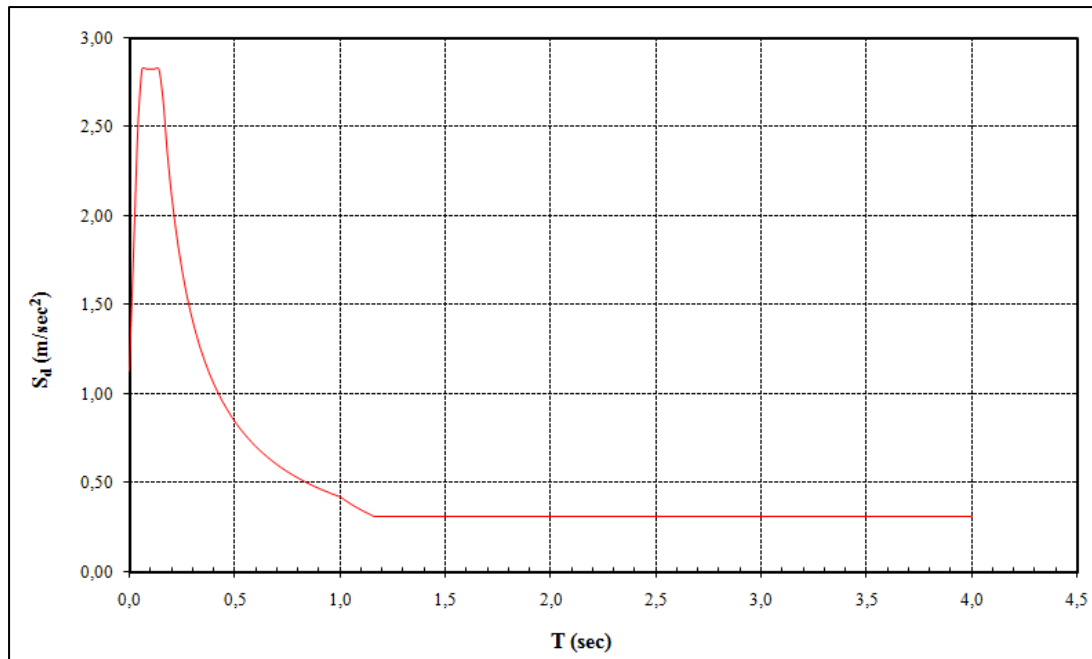
Συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού: $\beta = 0,20$

- **Κατακόρυφη συνιστώσα**

Για την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης, το φάσμα σχεδιασμού δίνεται από τις προηγούμενες εκφράσεις, με την εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού στην κατακόρυφη διεύθυνση, a_{vg} , να αντικαθιστά την a_g , ενώ ο S λαμβάνεται ως ίσος με 1.0, $T_B = 0.05$, $T_C = 0.15$, $T_D = 1.0$ και οι άλλες παράμετροι όπως ορίζονται παραπάνω. Το ποσοστό απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις συνιστώσες της σεισμικής δράσης είναι $\zeta = 5\%$



Εικόνα 6.2- Φάσμα σχεδιασμού οριζόντιας συνιστώσας της σεισμικής δράσης του κυρίως ναού



Εικόνα 6.3- Φάσμα σχεδιασμού κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής δράσης του κυρίως ναού

➤ **Συνδυασμοί δράσεων**

- Στατικός συνδυασμός: $1,35G + 1,5Q$
- Σεισμικοί συνδυασμοί: $1G + 0,5Q \pm E_x \pm 0,3E_y \pm 0,3E_z$
 $1G + 0,5Q \pm 0,3E_x \pm E_y \pm 0,3E_z$
 $1G + 0,5Q \pm 0,3E_x \pm 0,3E_y \pm E_z$

6.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

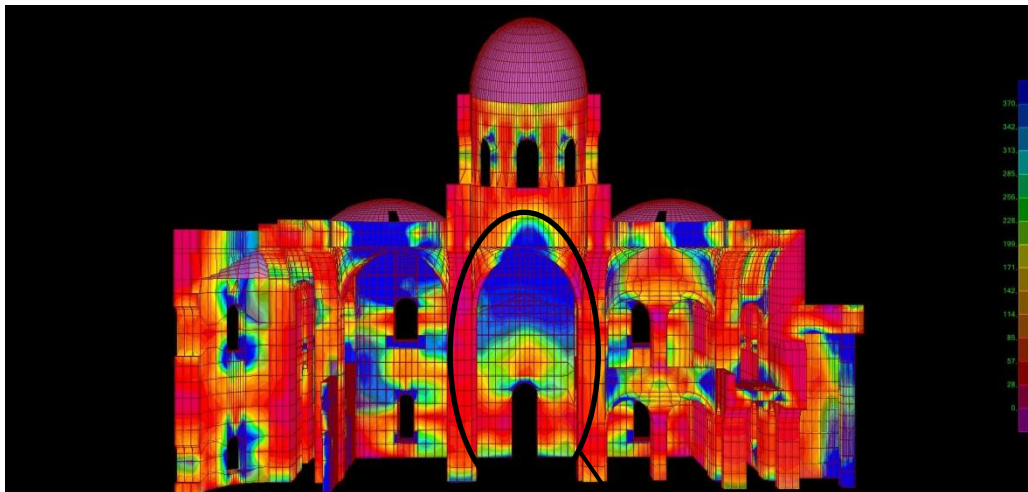
Ενδεικτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις τρεις πρώτες ιδιομορφές είναι:

Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	Συχνότητα (Hz)
1 ^η	0,290	3,44
2 ^η	0,263	3,80
3 ^η	0,196	5,11

Πίνακας 6.1- Ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες

Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	U _x	U _y	U _z	R _x	R _y	R _z
1 ^η	0,290	0,73	1,845E-05	0,00012	0,0001	0,32	0,357
2 ^η	0,263	8,18E-08	0,78	0,00071	0,26612	3,9E-04	0,182
3 ^η	0,196	0,00861	0,00024	7,16E-06	3,82E-06	2,66E-03	0,200

Πίνακας 6.2- Ποσοστό συμμετοχής μαζών σε μετακινήσεις (U) και στροφές (R)



Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται οι τάσεις S22 κατά τη διεύθυνση της τοιχοποιίας. Με σκούρο μπλε χρώμα είναι τα σημεία εκείνα που έχουμε υπέρβαση στην εφελκυστική αντοχή. Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα ταιριάζουν με τις πραγματικές βλάβες, αφού στα σημεία που έχουμε υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής εμφανίζονται και οι υπάρχουσες ρωγμές.



6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΩΝ

6.3.1 ΦΟΡΤΙΑ

➤ Στατικά φορτία σχεδιασμού

Τα σενάρια λειτουργίας επιλύθηκαν με τα ακόλουθα στατικά φορτία:

- Ίδιο βάρος: Το ίδιο βάρος του φορέα υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα με βάση τις διαστάσεις των στοιχείων και το ειδικό τους βάρος.

➤ Δυναμικά φορτία σχεδιασμού με βάση τον Ευρωκώδικα 8

Τα κωδωνοστάσια μελετήθηκαν ξεχωριστά από τον υπόλοιπο ναό, γεγονός που δεν τροποποιεί τα αποτελέσματα των αναλύσεων, αφενός του Ιερού Ναού και αφετέρου των κωδωνοστασίων λόγω του ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δύο φορέων διαφέρουν σημαντικά. Έγινε όμως μέριμνα αφενός μεν να συμπεριληφθεί η αδρανειακή συμμετοχή των κωδωνοστασίων στην απόκριση του υπόλοιπου φορέα του Ιερού Ναού, αφετέρου η σεισμική δράση στην έδραση των κωδωνοστασίων να υπολογιστεί με βάση την αναμενόμενη τροποποίησή της από την απόκριση του εδάφους με αυξανόμενα σεισμικά φορτία, όπως αναφέρεται στον Ευρωκώδικα 8-1 στην παράγραφο 4.3.5. Με αυτή τη διαδικασία κατέστη δυνατόν να υπολογιστεί η απόκριση του κάθε φορέα λαμβάνοντας υπόψη ικανού αριθμού ιδιομορφών και αντιστοιχών ιδιομορφικών μαζών. Η ανάλυση των κωδωνοστασίων έγινε με αυξημένα σεισμικά φορτία κατά S_a . Ο σεισμικός συντελεστής S_a μπορεί να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση:

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot [3(1 + z/H) / (1 + (1 - T_a/T_1)^2) - 0,5]$$

όπου

α είναι ο λόγος της εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A, a_g , προς την επιτάχυνση της βαρύτητας g ;

S είναι ο συντελεστής εδάφους;

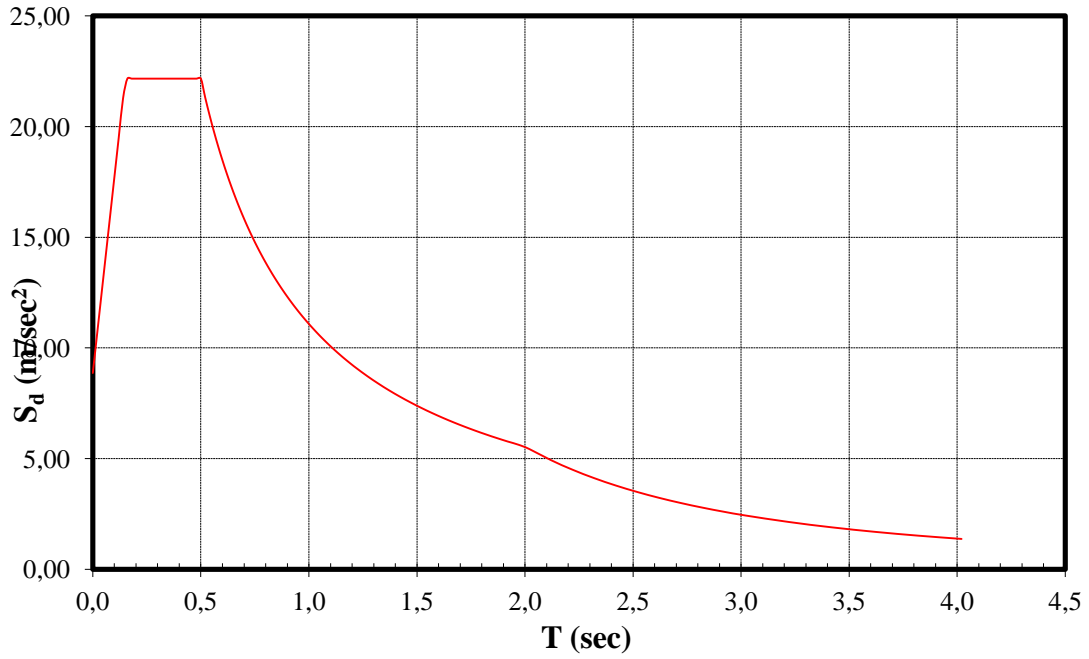
T_a είναι η θεμελιώδης περίοδος ταλάντωσης του προσαρτήματος;

T_1 είναι η θεμελιώδης περίοδος ταλάντωσης του κτιρίου στην αντίστοιχη διεύθυνση;

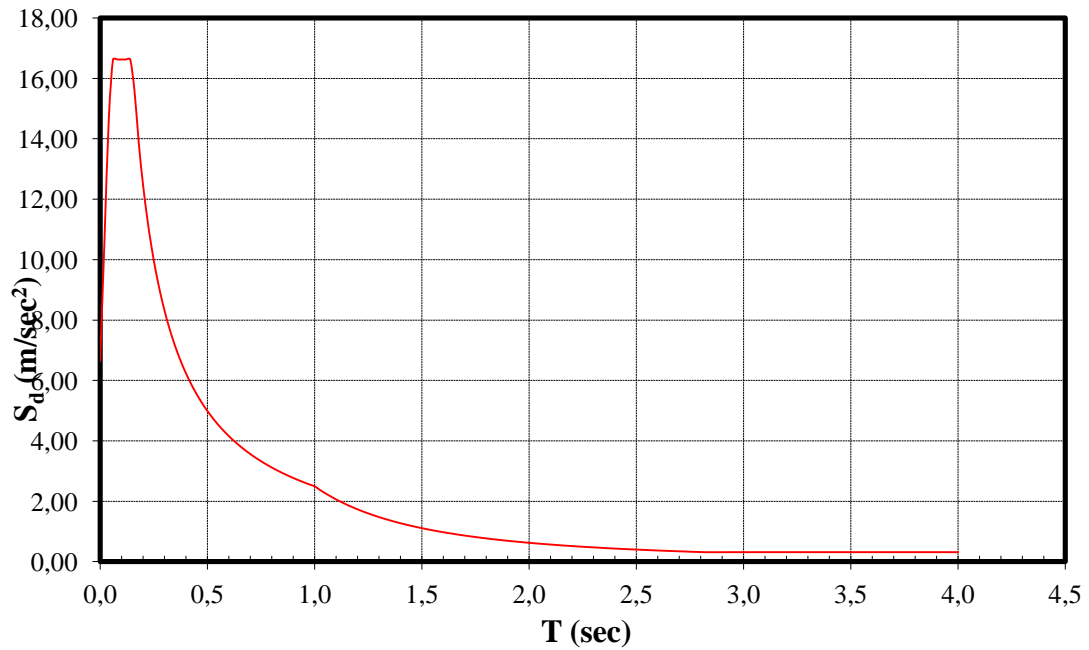
z είναι το ύψος στο οποίο βρίσκεται το προσάρτημα επάνω από το επίπεδο εφαρμογής της σεισμικής δράσης; και

H είναι το ύψος του κτιρίου που μετράται από την θεμελίωση ή από την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου.

Το ποσοστό απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις συνιστώσες της σεισμικής δράσης είναι $\zeta = 5\%$



Εικόνα 6.4- Φάσμα σχεδιασμού οριζόντιας συνιστώσας της σεισμικής δράσης του κωδωνοστασίου



Εικόνα 6.5- Φάσμα σχεδιασμού κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής δράσης του Κωδωνοστασίου

➤ **Συνδυασμοί δράσεων**

- Στατικός συνδυασμός: $1,35G + 1,5Q$
- Σεισμικοί συνδυασμοί: $1G + 0,5Q \pm E_x \pm 0,3E_y \pm 0,3E_z$
 $1G + 0,5Q \pm 0,3E_x \pm E_y \pm 0,3E_z$
 $1G + 0,5Q \pm 0,3E_x \pm 0,3E_y \pm E_z$

6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

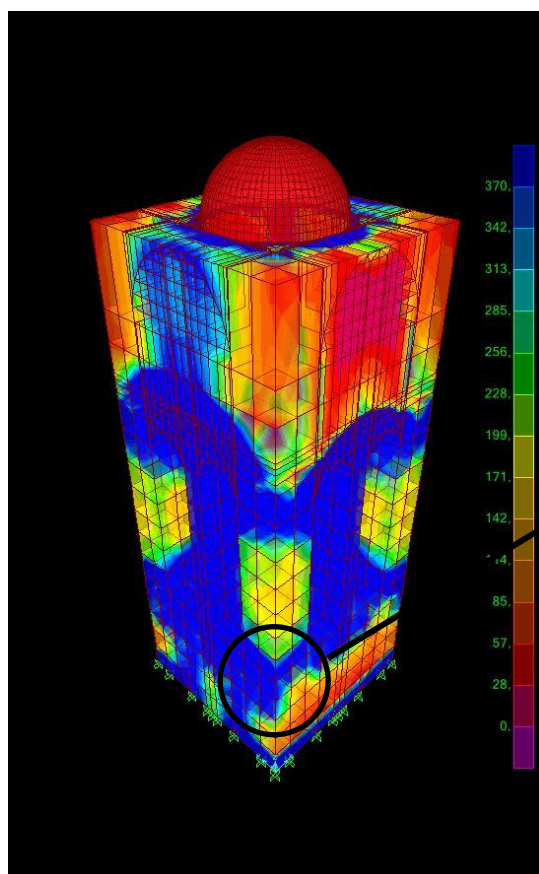
Ενδεικτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις τρεις πρώτες ιδιομορφές είναι:

Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	Συχνότητα (Hz)
1 ^η	0,219	4,56
2 ^η	0,219	4,56
3 ^η	0,143	7,01

Πίνακας 6.3- Ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες

Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	U _x	U _y	U _z	R _x	R _y	R _z
1 ^η	0,219	5,20E-07	0,60	4,77E-11	0,8771	7,73E-07	0,21
2 ^η	0,219	0,60	5,20E-07	9,55E-11	7,66E-07	0,8771	0,21
3 ^η	0,143	2,23E-09	2,23E-09	0,00	3,24E-09	3,24E-09	0,19

Πίνακας 6.4- Ποσοστό συμμετοχής μαζών σε μετακινήσεις (U) και στροφές (R)



Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε την ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων με πραγματική ρωγή στη βάση του κωδωνοστασίου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ Ι.Ν

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων του υφιστάμενου φορέα του Ιερού Ναού και των κωδωνοστασιών, προτείνεται η ενίσχυση του οικοδομήματος σε τρία διαφορετικά επίπεδα. Α) Με χρήση ενεμάτων, Β) Με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα (ΙΝΠΑ) και Γ) Με χρήση χαλύβδινων ελκυστήρων. Παρακάτω αναπτύσσονται αναλυτικά οι παραπάνω μέθοδοι και οι τρόποι εφαρμογής τους. [11]

7.2 ΕΝΕΜΑΤΑ (Grouting)

Η τεχνική των ενεμάτων, δηλαδή της έγχυσης στην τοιχοποιία λεπτόρρευστου μίγματος δια μέσου οπών, θα χρησιμοποιηθεί για την πλήρωση ρωγμών στη φέρουσα τοιχοποιία και την αποκατάσταση της συνέχειας της. Με τα ενέματα επιτυγχάνουμε την ενίσχυση της τοιχοποιίας, ενισχύοντας το συνδετικό κονίαμα της, χωρίς καμμία επίπτωση στη δομική μορφή του φορέα.

Για τον υπολογισμό της νέας θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε η σχέση των M.R. Valluzzi, F. Da Porto και C. Modena (2004) [12]:

$$f_{wc,s} = f_{wc,0} + 0,31(V_{inf}/V)f_{gr}^{1,18}$$

όπου:

$f_{wc,0}$ η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας χωρίς την ενίσχυση

V_{inf}/V το ποσοστό του όγκου του ενέσιμου υλικού προς το συνολικό όγκο

f_{gr} η θλιπτική αντοχή του ενέσιμου υλικού, είναι ίση με 10MPa

Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική για τη σεισμική ενίσχυση τρίστρωτης τοιχοποιίας από αργολιθοδομή με χρήση ενέματος με f_{gr} της τάξης των 10MPa, επιτυγχάνεται ομογενοποίηση της λιθοδομής στην οποία σε περίπτωση υπέρβασης τάσεων οι αστοχίες θα περιοριστούν στους αρμούς.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η καινούρια θλιπτική αντοχή της ενισχυμένης τοιχοποιίας είναι $f_{wc,s} = 5,6$ MPa, χρησιμοποιώντας ποσοστό όγκου ενέσιμου υλικού προς το συνολικό όγκο ίσο με $V_{inf}/V = 40\%$.

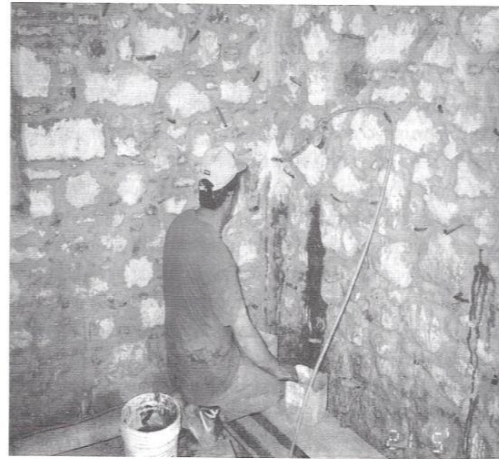
Το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει ίσο με 5600MPa και η εφελκυστική αντοχή $f_{wc,s} = 0,56$ MPa.

Μέθοδος εφαρμογής ενέσεων

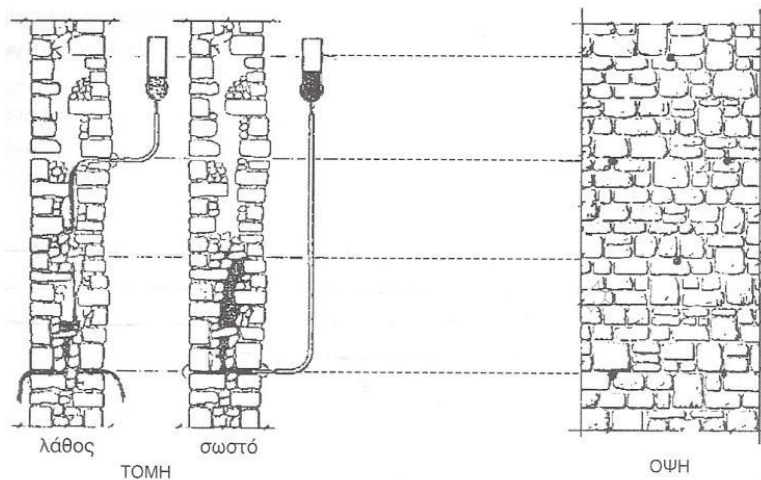
Στάδιο 1: Οι τοίχοι διαβρέχονται αρχικά με νερό.

Στάδιο 2: Διάνοιξη οπών μεταξύ των λίθων σε βάθος τουλάχιστον ίσο με το μισό πάχος του τοίχου σε σχήμα ρομβοειδούς κανάβου. Οι αποστάσεις μεταξύ των οπών κυμαίνονται από 0,30-0,60 μ. Η διάτρηση γίνεται με περιστροφικό τρυπάνι Φ14-Φ18. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται ώστε οι οπές που διανοίγονται να μην είναι «τυφλες» και να γίνονται συχνές διακοπες διάτρησης για την αποφυγή συντονισμού των δονήσεων.

Στάδιο 3: Τοποθέτηση μεταλλικών ή πλαστικών σωληνίσκων μέσα στις διανοιχθείσες ρωγμές σε βάθος αρκετών εκατοστών. Οι σωληνίσκοι αυτοί εξέχουν 40 cm από την επιφάνεια του τοίχου και στερεώνονται στους αρμούς μεταξύ των λίθων ώστε μέσα από αυτούς να εισέλθει το ένεμα.



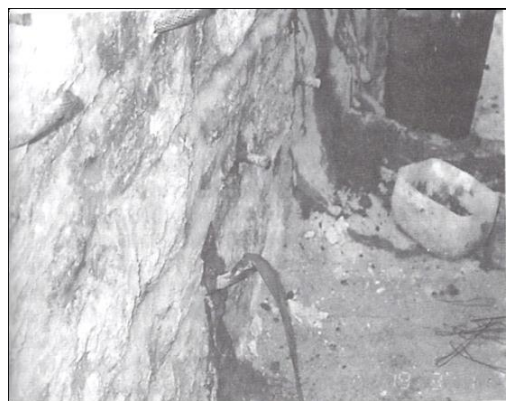
Στάδιο 4: Εισαγωγή του ενέματος. Οι ενέσεις εφαρμόζονται από κάτω προς τα πάνω. Η πίεση στο ακροφυσιο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1 MPa, προς αποφυγή του κινδύνου βλάβης στην τοιχοποιία λόγω υψηλής εσωτερικής πίεσης. Αν υπάρχει ελλειψη εξοπλισμού για τις ενέσεις, η επίδραση της βαρυτητας μπορεί να φανεί χρησιμη: το ένεμα χνεται στο σωληνα



εγκυσης από το δοχείο που τοποθετείται σε έναν υψηλότερο όροφο του κτιρίου. Επειδή το ένεμα λαμβάνει τη θέση του αέρα ή του τυχόντος ύδατος των κενών, πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια για την εξοδό τους από την τοιχοποιία, δηλαδή πρέπει σε κάθε περίπτωση να υπάρχουν τουλάχιστον δυο οπές σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Η

εφαρμογή του ενέματος διακόπτεται όταν εμφανίζεται ένεμα στον αμεσως υπερκείμενο σωληνίσκο. Τότε ο σωληνίσκος αφαιρείται και ο σωληνίσκος σφραγίζεται.

Στάδιο 5: Μετά από διακοπή 10-20 λεπτών η διαδικασία επαναλαμβάνεται στην αμεσώς ανώτερη στάθμη ή, εάν υπάρχουν πολλά σημεία εισαγωγής στην ίδια στάθμη, στο επόμενο σημείο εισόδου κατά μήκος του τοίχου, μέχρις ότου να ολοκληρωθεί η πλήρωση και σφραγιστούν όλοι οι σωληνίσκοι. Κατά τη διάρκεια των ενέσεων, η υπερχειλίση του ενεματος από τις ρωγμές και τους αρμούς μεταξύ των λίθων εμποδίζεται με την εφαρμογή ξηρου τσιμεντού ταχείας πήξης. Το μέγιστο υψος στο οποίο εφαρμόζονται ενέματα δεν πρέπει να υπερβαίνει το ένα μέτρο ανά ημέρα, ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη μεγάλης υδροστατικής πίεσης στο ένεμα που έχει ήδη εισαχθεί. [13]



7.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ- ΑΝΘΡΑΚΟΨΦΑΣΜΑΤΑ

Για την ανάληψη των εφελκυστικών τάσεων στην κάτω παρειά των τόξων και στην άνω παρειά της οροφής προτείνεται η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα (INPIA). Στην άνω παρειά της οροφής θα χρησιμοποιηθεί ύφασμα με ίνες δύο διευθύνσεων (2Δ) το οποίο θα τοποθετηθεί κάτω από τα κεραμύδια. Στην κάτω παρειά της οροφής και των τόξων το INPIA που επιλέχθηκε έχει ίνες μίας διευθύνσεως (1Δ). Και για τα δύο είδη (1Δ και 2Δ) έχουν $E = 240\text{GPa}$ και αντοχή σε θράυση $f_j = 3500\text{MPa}$.

Μέθοδος εφαρμογής INPIA

Στάδιο 1: Επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας που θα γίνει η επικόλληση, με αφαίρεση όλων των χαλαρών, σαθρών τμημάτων, πλήρωση των ρωγμών, εξασφαλίζοντας έτσι ένα υγιές υπόστρωμα και μια λεία επιφάνεια. Στόχος είναι η μεταφορά δυνάμεων στα σύνθετα υλικά με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ασφάλεια. Στην περίπτωση που το συνθετικό υλικό καλύπτει γωνίες, αυτές εξομαλύνονται και λειαίνονται για να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30 mm.

Στάδιο 2: Επαλείφουμε την επιφάνεια αναμονής με εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του φύλλου.

Στάδιο 3: Εφαρμόζεται ομοιόμορφη πίεση καθώς τοποθετείται το φύλλο του σύνθετου υλικού στην επιφάνεια αναμονής, με τρόπο που αποφεύγεται ο εγκλωβισμός του αέρα σε αυτό.

Στάδιο 4: Αν προβλέπεται η τοποθέτηση παραπάνω του ενός φύλλου, η διαδικασία επαναλαμβάνεται. [14]



Εικόνα 7.1- Θέση ΙΝΠΑ 1Δ στην οροφή του δωματός άνωθεν του γυναικωνίτη



Εικόνα 7.2- Θέση ΙΝΠΑ 2Δ στην άνω παρειά της οροφής

7.4 ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ

Για την ανάλυση των εφελκυστικών φορτίων θα τοποθετηθούν στη βάση των τόξων του Ιερού Ναού ελκυστήρες F430 διαμέτρου 40mm. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ελκυστήρων δίδονται στον επόμενο πίνακα. Οι θέσεις των ελκυστήρων φαίνονται στην Εικόνα 7.3

Τύπος υλικού	F430
Μέτρο Ελαστικότητας	$E= 200 \text{ GPa}$
Αντοχή διαρροής	$f_y= 379 \text{ MPa}$
Αντοχή θραύσης	$f_u= 552 \text{ MPa}$

Πίνακας 7.1- Μηχανικά χαρακτηριστικά των ελκυστήρων



Εικόνα 7.3- Θέσεις ελκυστήρων



ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII

ΑΝΑΛΥΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ Ι.Ν

8.1 ΦΟΡΕΑΣ

8.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

Η ανάλυση έγινε με τις ίδιες παραδοχές και φορτίσεις, αλλά με την προσθήκη των στοιχείων της ενίσχυσης (ενέματα, ελκυστήρες, ΙΝΠΙΑ). Οι ελκυστήρες προσομοιώθηκαν με γραμμικά στοιχεία και τα ΙΝΠΙΑ με τη χρήση επιφανειακών στοιχείων.

8.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Ενδεικτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις τρεις πρώτες ιδιομορφές είναι:

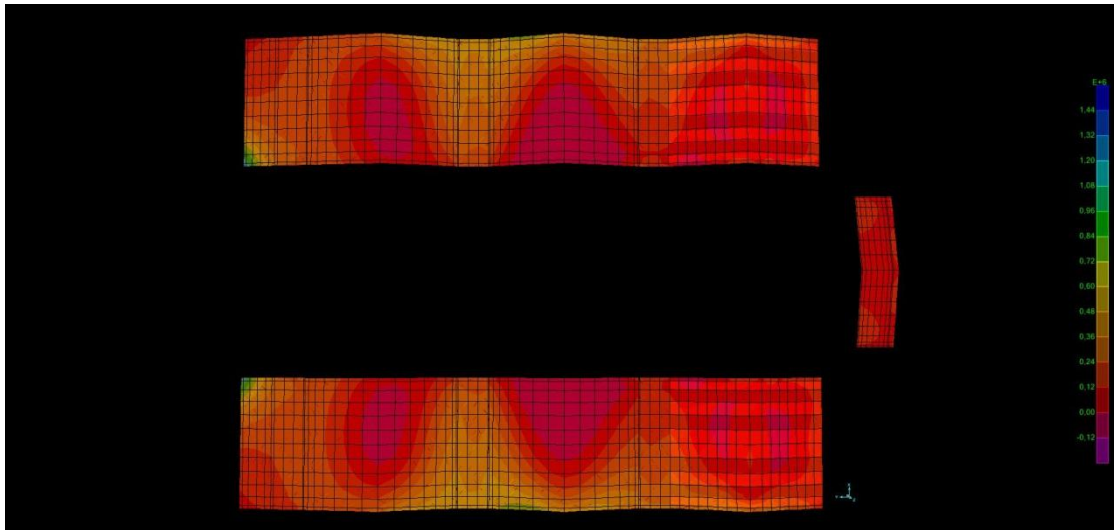
Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	Συχνότητα (Hz)
1 ^η	0,267	3,745
2 ^η	0,226	4,426
3 ^η	0,168	5,941

Πίνακας 8.1- Ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες

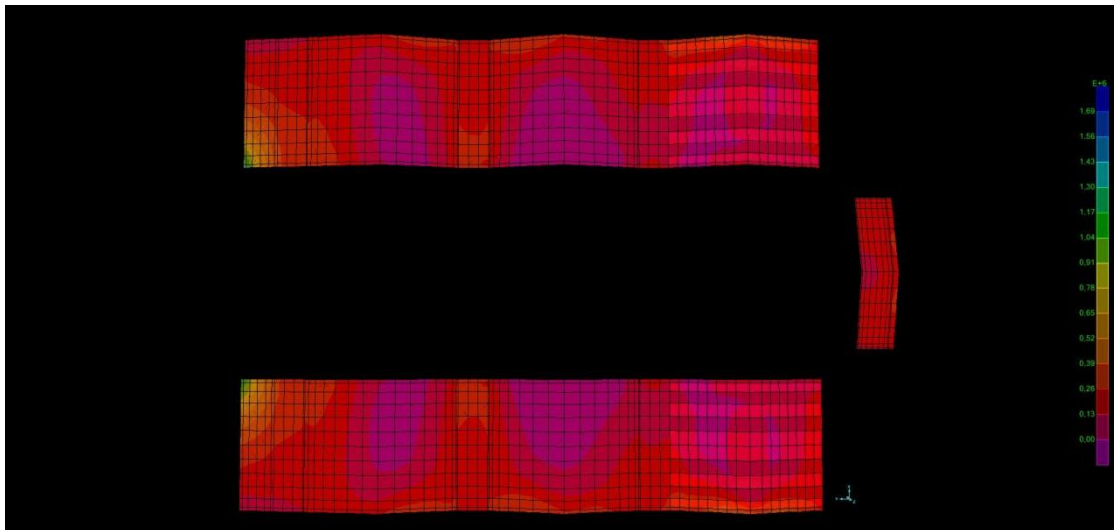
Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz
1 ^η	0,267	0,749	4,05E-06	1,18E-06	1,29E-05	0,35	0,337
2 ^η	0,226	4,571E-06	0,783	6,1E-04	0,264	2,2E-04	0,190
3 ^η	0,168	1,43E-03	7,11E-09	2,98E-08	5,49E-07	9,4E-04	0,207

Πίνακας 8.2- Ποσοστό συμμετοχής μαζών σε μετακινήσεις (U) και στροφές (R)

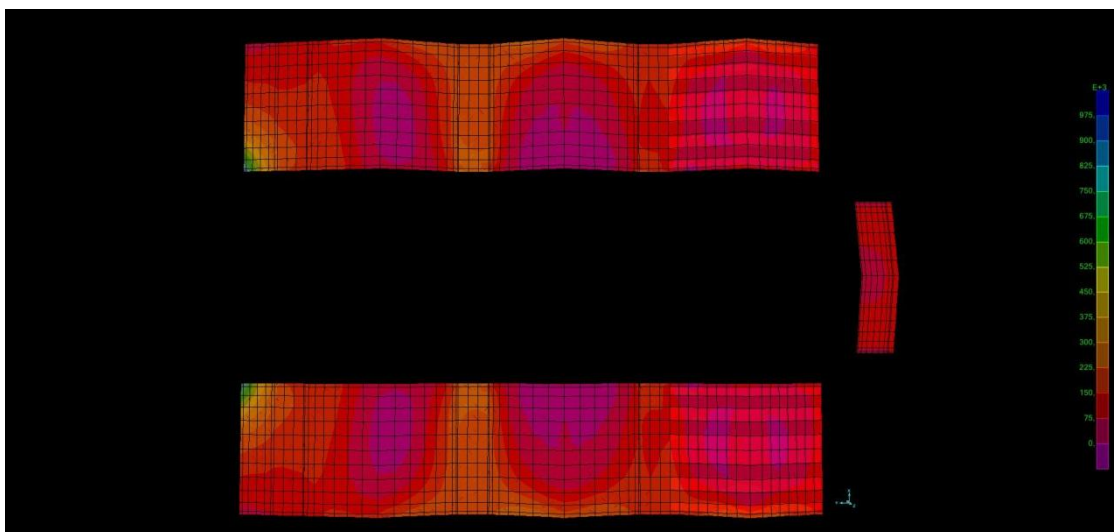
Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται συγκριτικές εικόνες με απεικόνιση τάσεων πριν και μετά την ενίσχυση.



Εικόνα 6.1 Τάσεις S22 (Δ/νση Α-Δ) στα ΙΝΠΑ για τον 1ο σεισμικό συνδυασμό



Εικόνα 6.1- Τάσεις S22 (Δ/νση Α-Δ) στα ΙΝΠΑ για τον 2ο σεισμικό συνδυασμό



Εικόνα 6.1 Τάσεις S22 (Δ/νση Α-Δ) στα ΙΝΠΑ για τον 2ο σεισμικό συνδυασμό

Όπως παρατηρείται οι τάσεις που αναπτύσσονται στο μανδύα είναι κατά πολύ μικρότερες της αντοχής του.

8.2 ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΑ

8.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΩΝΟΣΤΑΣΙΩΝ

Η ανάλυση έγινε με τις ίδιες παραδοχές και φορτίσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 για τα κωδωνοστάσια, αλλά με την προσθήκη των στοιχείων ενίσχυσης (ενέματα).

8.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	Συχνότητα (Hz)
1 ^η	0,186	5,368
2 ^η	0,186	5,368
3 ^η	0,124	8,075

Πίνακας 8.3- Ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες

Ιδιομορφές	Περίοδος (sec)	U _x	U _y	U _z	R _x	R _y	R _z
1 ^η	0,186	7,508E-07	0,594	0	0,875	1,102E-6	0,206
2 ^η	0,186	0,594	7,508E-07	0	1,102E-6	0,875	0,205
3 ^η	0,124	2,561E-09	2,554E-09	0	3,736E-09	3,745E-09	0,189

Πίνακας 8.4- Ποσοστό συμμετοχής μαζών σε μετακινήσεις (U) και στροφές (R)

Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται συγκριτικές εικόνες με απεικόνιση τάσεων πριν και μετά την ενίσχυση.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΧ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας όλα τα προηγούμενα κεφάλαια σημειώνουμε πως ο ιερός ναός μελετήθηκε ως προς τη σημερινή φέρουσα ικανότητα του. Καταγράφηκε το σύνολο των βλαβών που έχουν δημιουργηθεί στο ναό στα σχεδόν 130 χρόνια ζωής του. Προτάθηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι ενίσχυσης α)Ενέματα, β) ΙΝΠΑ, γ) Ελκυστήρες που λειτουργούν όμως συνολικά στο κτίριο. Τέλος μελετήθηκε η συμπεριφορά του ενισχυμένου δομήματος σε σεισμική επιτάχυνση 0,16 g και 0,08 g. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής:

- Τόσο το γεγονός ότι η διαφραγματική λειτουργία απουσιάζει από τέτοια είδους μνημεία, όσο και το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος Ι.Ν δεν μπορεί να ενταχθεί στην κατηγορία των απλών κτιρίων, λόγω της γεωμετρίας και του όγκου του, η ανάλυση του φορέα με την Ισοδύναμη στατική μέθοδο κρίθηκε εκ των προτέρων ακατάλληλη.
- Τα αποτελέσματα της δυναμικής φασματικής μεθόδου, και συγκεκριμένα το γεγονός ότι η απεικόνιση των τάσεων αντιπροσωπεύει καλύτερα την πραγματική κατάσταση του φορέα προσδιορίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τις βλάβες του, (βλ.Κεφ.6) καθιστά τη δυναμική φασματική μέθοδος πιο κατάλληλη για την ανάλυση φορέων τέτοιου τύπου.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του φορέα του Ιερού Ναού και των κωδωνοστασίων, δεν παρουσιάζονται υπερβάσεις της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας μετά την ομογενοποίησή της με τα ενέματα.
- Η εμφάνιση υπερβάσεων εφελκυστικής αντοχής στην εξωτερική τοιχοποιία είναι μειωμένη λόγω των ενισχύσεων, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό που να κρίνεται ικανοποιητική με αποτέλεσμα να χρήζει περαιτέρω διερεύνηση και ενίσχυση σύμφωνα πάντα με το κανονιστικό πλαίσιο που ορίζει η εφορία αρχαιοτήτων.
- Στο εσωτερικό του ναού (οροφή, τόξα κ.α.) η μείωση των υπερβάσεων είναι μεγαλύτερη καθώς συμβάλουν στην ενίσχυση της αντοχής τα ανθρακούφασματα και οι ελκυστήρες.
- Το γεγονός ότι οι ιδιοτιμές που προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση του Ιερού Ναού είναι μεγαλύτερες αυτών που προέκυψαν από τις μετρήσεις αποτελεί ισχυρή ένδειξη της μείωσης της δυσκαμψίας του φορέα του Ιερού Ναού λόγω των βλαβών.

Η συγκεκριμένη μελέτη ενίσχυσης και αποκατάστασης αποτελεί ένα πρώτο βήμα για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του Ι.Ν. Διαφαίνεται η ανάγκη αναλύσεων διαφόρων τύπων σε επιμέρους στοιχεία, όπως τόξα και τρούλοι.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ιδιοπερίοδοι και Ιδιοσυχότητες του υφιστάμενου φορέα						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,290433	3,4431	21,634	468,02
MODAL	Mode	2	0,262923	3,8034	23,897	571,09
MODAL	Mode	3	0,195633	5,1116	32,117	1031,5
MODAL	Mode	4	0,166505	6,0058	37,736	1424
MODAL	Mode	5	0,159107	6,2851	39,49	1559,5
MODAL	Mode	6	0,152631	6,5518	41,166	1694,6
MODAL	Mode	7	0,149409	6,6931	42,054	1768,5
MODAL	Mode	8	0,147514	6,779	42,594	1814,2
MODAL	Mode	9	0,134292	7,4465	46,788	2189,1
MODAL	Mode	10	0,126407	7,9109	49,706	2470,7
MODAL	Mode	11	0,123834	8,0754	50,739	2574,4
MODAL	Mode	12	0,116272	8,6005	54,039	2920,2
MODAL	Mode	13	0,111953	8,9323	56,123	3149,8
MODAL	Mode	14	0,109411	9,1398	57,427	3297,9
MODAL	Mode	15	0,109001	9,1742	57,643	3322,8
MODAL	Mode	16	0,106265	9,4105	59,128	3496,1
MODAL	Mode	17	0,103256	9,6847	60,851	3702,8
MODAL	Mode	18	0,1005	9,9503	62,519	3908,7
MODAL	Mode	19	0,099973	10,003	62,849	3950
MODAL	Mode	20	0,099585	10,042	63,094	3980,8
MODAL	Mode	21	0,097477	10,259	64,458	4154,8
MODAL	Mode	22	0,094634	10,567	66,394	4408,2
MODAL	Mode	23	0,092293	10,835	68,079	4634,7
MODAL	Mode	24	0,091366	10,945	68,769	4729,2
MODAL	Mode	25	0,087917	11,374	71,467	5107,5
MODAL	Mode	26	0,087208	11,467	72,049	5191
MODAL	Mode	27	0,087181	11,47	72,07	5194,1
MODAL	Mode	28	0,086447	11,568	72,682	5282,7
MODAL	Mode	29	0,085302	11,723	73,658	5425,6
MODAL	Mode	30	0,084342	11,856	74,496	5549,7
MODAL	Mode	31	0,083871	11,923	74,915	5612,2
MODAL	Mode	32	0,083596	11,962	75,161	5649,2
MODAL	Mode	33	0,08329	12,006	75,438	5690,9
MODAL	Mode	34	0,079687	12,549	78,848	6217,1
MODAL	Mode	35	0,079099	12,642	79,434	6309,8
MODAL	Mode	36	0,077341	12,93	81,24	6600
MODAL	Mode	37	0,076868	13,009	81,74	6681,5
MODAL	Mode	38	0,076349	13,098	82,295	6772,5

MODAL	Mode	39	0,076254	13,114	82,399	6789,5
MODAL	Mode	40	0,075123	13,311	83,638	6995,4
MODAL	Mode	41	0,074245	13,469	84,628	7161,9
MODAL	Mode	42	0,074045	13,505	84,857	7200,7
MODAL	Mode	43	0,072824	13,732	86,279	7444
MODAL	Mode	44	0,071879	13,912	87,413	7641
MODAL	Mode	45	0,070682	14,148	88,894	7902,1
MODAL	Mode	46	0,069759	14,335	90,071	8112,7
MODAL	Mode	47	0,069192	14,453	90,808	8246,1
MODAL	Mode	48	0,069062	14,48	90,979	8277,2
MODAL	Mode	49	0,068281	14,645	92,019	8467,5
MODAL	Mode	50	0,067994	14,707	92,409	8539,4
MODAL	Mode	51	0,066497	15,038	94,489	8928,1
MODAL	Mode	52	0,065941	15,165	95,284	9079,1
MODAL	Mode	53	0,065489	15,27	95,943	9205,1
MODAL	Mode	54	0,06537	15,297	96,117	9238,4
MODAL	Mode	55	0,064746	15,445	97,044	9417,5
MODAL	Mode	56	0,064464	15,513	97,468	9500,1
MODAL	Mode	57	0,064211	15,574	97,852	9574,9
MODAL	Mode	58	0,063996	15,626	98,181	9639,5
MODAL	Mode	59	0,063543	15,737	98,881	9777,5
MODAL	Mode	60	0,063376	15,779	99,142	9829
MODAL	Mode	61	0,061516	16,256	102,14	10432
MODAL	Mode	62	0,061241	16,329	102,6	10526
MODAL	Mode	63	0,060319	16,579	104,17	10851
MODAL	Mode	64	0,060203	16,611	104,37	10892
MODAL	Mode	65	0,059969	16,675	104,77	10977
MODAL	Mode	66	0,059035	16,939	106,43	11327
MODAL	Mode	67	0,058906	16,976	106,66	11377
MODAL	Mode	68	0,057972	17,25	108,38	11747
MODAL	Mode	69	0,057726	17,323	108,85	11847
MODAL	Mode	70	0,057398	17,422	109,47	11983

Ιδιοπερίοδοι και Ιδιοσυχνότητες του ενισχυμένου φορέα						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,267002	3,7453	23,532	553,77
MODAL	Mode	2	0,225916	4,4264	27,812	773,51
MODAL	Mode	3	0,168327	5,9408	37,327	1393,3
MODAL	Mode	4	0,158095	6,3253	39,743	1579,5
MODAL	Mode	5	0,14753	6,7783	42,589	1813,8
MODAL	Mode	6	0,145298	6,8824	43,243	1870
MODAL	Mode	7	0,134729	7,4223	46,636	2174,9
MODAL	Mode	8	0,127929	7,8168	49,115	2412,2
MODAL	Mode	9	0,11537	8,6678	54,461	2966
MODAL	Mode	10	0,111751	8,9484	56,225	3161,2
MODAL	Mode	11	0,106499	9,3897	58,997	3480,7
MODAL	Mode	12	0,101412	9,8608	61,957	3838,7
MODAL	Mode	13	0,097955	10,209	64,144	4114,4
MODAL	Mode	14	0,097421	10,265	64,495	4159,6
MODAL	Mode	15	0,096962	10,313	64,801	4199,1
MODAL	Mode	16	0,0945	10,582	66,488	4420,7
MODAL	Mode	17	0,093264	10,722	67,37	4538,7
MODAL	Mode	18	0,091684	10,907	68,531	4696,5
MODAL	Mode	19	0,090561	11,042	69,381	4813,7
MODAL	Mode	20	0,087391	11,443	71,898	5169,3
MODAL	Mode	21	0,08578	11,658	73,247	5365,2
MODAL	Mode	22	0,085527	11,692	73,465	5397,1
MODAL	Mode	23	0,08475	11,799	74,138	5496,4
MODAL	Mode	24	0,083709	11,946	75,06	5634
MODAL	Mode	25	0,083461	11,982	75,283	5667,5
MODAL	Mode	26	0,081646	12,248	76,956	5922,3
MODAL	Mode	27	0,079756	12,538	78,78	6206,3
MODAL	Mode	28	0,078991	12,66	79,543	6327
MODAL	Mode	29	0,076768	13,026	81,847	6698,9
MODAL	Mode	30	0,076432	13,084	82,206	6757,9
MODAL	Mode	31	0,075801	13,193	82,891	6870,9
MODAL	Mode	32	0,074766	13,375	84,038	7062,5
MODAL	Mode	33	0,074592	13,406	84,234	7095,4
MODAL	Mode	34	0,072956	13,707	86,123	7417,2
MODAL	Mode	35	0,071333	14,019	88,082	7758,4
MODAL	Mode	36	0,070531	14,178	89,084	7935,9
MODAL	Mode	37	0,06984	14,318	89,965	8093,8
MODAL	Mode	38	0,069293	14,431	90,676	8222,1

MODAL	Mode	39	0,067643	14,783	92,887	8628
MODAL	Mode	40	0,066988	14,928	93,796	8797,7
MODAL	Mode	41	0,066259	15,092	94,828	8992,4
MODAL	Mode	42	0,065903	15,174	95,339	9089,6
MODAL	Mode	43	0,064931	15,401	96,767	9363,8
MODAL	Mode	44	0,064308	15,55	97,704	9546,1
MODAL	Mode	45	0,064086	15,604	98,042	9612,3
MODAL	Mode	46	0,063585	15,727	98,815	9764,5
MODAL	Mode	47	0,063132	15,84	99,524	9905
MODAL	Mode	48	0,062883	15,903	99,919	9983,7
MODAL	Mode	49	0,061524	16,254	102,13	10430
MODAL	Mode	50	0,060803	16,447	103,34	10678
MODAL	Mode	51	0,060225	16,604	104,33	10884
MODAL	Mode	52	0,060058	16,651	104,62	10945
MODAL	Mode	53	0,059375	16,842	105,82	11198
MODAL	Mode	54	0,058904	16,977	106,67	11378
MODAL	Mode	55	0,058227	17,174	107,91	11644
MODAL	Mode	56	0,057479	17,398	109,31	11949
MODAL	Mode	57	0,056682	17,642	110,85	12288
MODAL	Mode	58	0,055836	17,91	112,53	12663
MODAL	Mode	59	0,055077	18,156	114,08	13014
MODAL	Mode	60	0,054903	18,214	114,44	13097
MODAL	Mode	61	0,053788	18,592	116,81	13646
MODAL	Mode	62	0,053505	18,69	117,43	13790
MODAL	Mode	63	0,053141	18,818	118,24	13980
MODAL	Mode	64	0,052689	18,979	119,25	14220
MODAL	Mode	65	0,052559	19,026	119,55	14291
MODAL	Mode	66	0,052119	19,187	120,55	14533
MODAL	Mode	67	0,052084	19,2	120,64	14553
MODAL	Mode	68	0,051775	19,314	121,36	14727
MODAL	Mode	69	0,051219	19,524	122,67	15048
MODAL	Mode	70	0,051154	19,549	122,83	15087



П А Р А Р Т Н М А В

Ιδιοπερίοδοι και Ιδιοσυχνότητες του υφιστάμενου κωδωνοστασίου						
utputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,218956	4,5671	28,696	823,47
MODAL	Mode	2	0,218956	4,5671	28,696	823,47
MODAL	Mode	3	0,142704	7,0075	44,029	1938,6
MODAL	Mode	4	0,040404	24,75	155,51	24183
MODAL	Mode	5	0,040403	24,751	155,51	24184
MODAL	Mode	6	0,036264	27,576	173,26	30021
MODAL	Mode	7	0,032538	30,733	193,1	37289
MODAL	Mode	8	0,028942	34,552	217,1	47132
MODAL	Mode	9	0,027284	36,652	230,29	53034
MODAL	Mode	10	0,027284	36,652	230,29	53034
MODAL	Mode	11	0,025218	39,653	249,15	62076
MODAL	Mode	12	0,02512	39,808	250,12	62562
MODAL	Mode	13	0,024394	40,993	257,57	66341
MODAL	Mode	14	0,024054	41,572	261,21	68229
MODAL	Mode	15	0,024054	41,572	261,21	68229
MODAL	Mode	16	0,022941	43,59	273,88	75013
MODAL	Mode	17	0,02183	45,809	287,83	82845
MODAL	Mode	18	0,019873	50,32	316,17	99965
MODAL	Mode	19	0,019872	50,322	316,18	99969
MODAL	Mode	20	0,018964	52,731	331,32	109770
MODAL	Mode	21	0,018964	52,732	331,33	109780
MODAL	Mode	22	0,01874	53,361	335,28	112410
MODAL	Mode	23	0,017753	56,328	353,92	125260
MODAL	Mode	24	0,017512	57,104	358,79	128730
MODAL	Mode	25	0,015785	63,353	398,06	158450
MODAL	Mode	26	0,015785	63,353	398,06	158450
MODAL	Mode	27	0,015611	64,059	402,5	162000
MODAL	Mode	28	0,014759	67,754	425,71	181230
MODAL	Mode	29	0,014623	68,385	429,68	184620
MODAL	Mode	30	0,014182	70,513	443,04	196290
MODAL	Mode	31	0,014179	70,527	443,14	196370
MODAL	Mode	32	0,014178	70,53	443,15	196380
MODAL	Mode	33	0,014	71,431	448,81	201430
MODAL	Mode	34	0,013842	72,243	453,92	206040
MODAL	Mode	35	0,01384	72,252	453,97	206090
MODAL	Mode	36	0,013833	72,289	454,21	206310
MODAL	Mode	37	0,012873	77,682	488,09	238230
MODAL	Mode	38	0,012829	77,948	489,76	239870

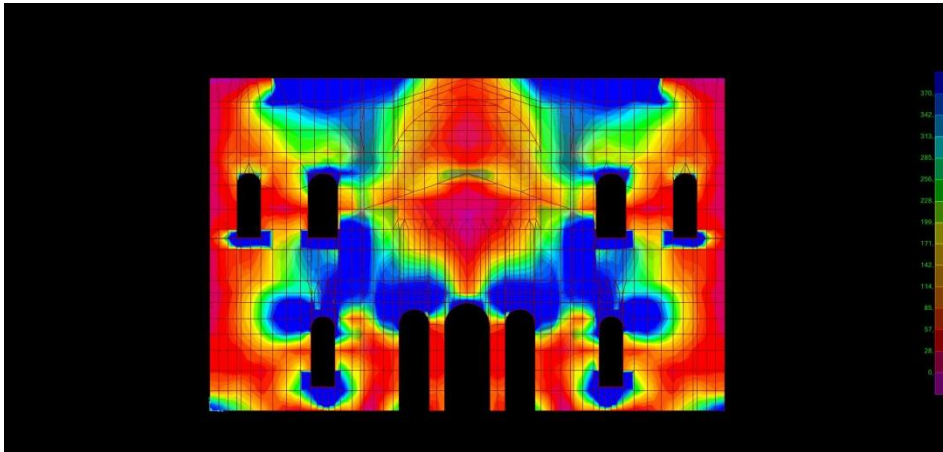
MODAL	Mode	39	0,012816	78,027	490,26	240360
MODAL	Mode	40	0,012815	78,035	490,31	240400
MODAL	Mode	41	0,012326	81,132	509,77	259860
MODAL	Mode	42	0,012324	81,141	509,82	259920
MODAL	Mode	43	0,011926	83,854	526,87	277590
MODAL	Mode	44	0,011875	84,209	529,1	279950
MODAL	Mode	45	0,0117	85,471	537,03	288400
MODAL	Mode	46	0,0117	85,473	537,05	288420
MODAL	Mode	47	0,01161	86,132	541,19	292880
MODAL	Mode	48	0,011452	87,323	548,67	301040
MODAL	Mode	49	0,010922	91,555	575,26	330920
MODAL	Mode	50	0,010919	91,587	575,46	331150

Ιδιοπερίοδοι και Ιδιοσυχνότητες του ενισχυμένου κωδωνοστασίου						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,186302	5,3676	33,726	1137,4
MODAL	Mode	2	0,186302	5,3676	33,726	1137,4
MODAL	Mode	3	0,123846	8,0745	50,734	2573,9
MODAL	Mode	4	0,034414	29,058	182,58	33334
MODAL	Mode	5	0,034413	29,059	182,58	33336
MODAL	Mode	6	0,030138	33,181	208,48	43465
MODAL	Mode	7	0,027508	36,352	228,41	52171
MODAL	Mode	8	0,023865	41,902	263,28	69316
MODAL	Mode	9	0,022558	44,331	278,54	77584
MODAL	Mode	10	0,022558	44,331	278,54	77585
MODAL	Mode	11	0,020796	48,086	302,13	91284
MODAL	Mode	12	0,020767	48,152	302,55	91537
MODAL	Mode	13	0,02035	49,141	308,76	95335
MODAL	Mode	14	0,019922	50,196	315,39	99473
MODAL	Mode	15	0,019922	50,196	315,39	99473
MODAL	Mode	16	0,019111	52,325	328,77	108090
MODAL	Mode	17	0,018186	54,989	345,5	119370
MODAL	Mode	18	0,016357	61,134	384,12	147550
MODAL	Mode	19	0,016357	61,135	384,12	147550
MODAL	Mode	20	0,015916	62,829	394,76	155840
MODAL	Mode	21	0,015789	63,335	397,95	158360
MODAL	Mode	22	0,015789	63,336	397,95	158370

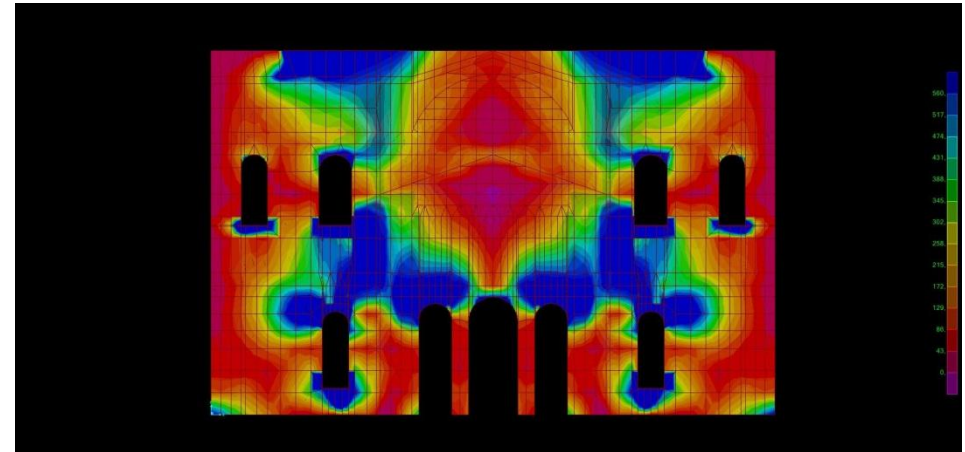
MODAL	Mode	23	0,015067	66,368	417	173890
MODAL	Mode	24	0,01497	66,798	419,71	176150
MODAL	Mode	25	0,013728	72,846	457,71	209500
MODAL	Mode	26	0,013728	72,846	457,71	209500
MODAL	Mode	27	0,012792	78,176	491,19	241270
MODAL	Mode	28	0,012571	79,548	499,81	249810
MODAL	Mode	29	0,012525	79,841	501,65	251660
MODAL	Mode	30	0,012237	81,721	513,47	263650
MODAL	Mode	31	0,012143	82,353	517,44	267740
MODAL	Mode	32	0,012143	82,353	517,44	267740
MODAL	Mode	33	0,012085	82,744	519,9	270290
MODAL	Mode	34	0,011598	86,22	541,74	293480
MODAL	Mode	35	0,011597	86,229	541,79	293540
MODAL	Mode	36	0,011595	86,247	541,91	293660
MODAL	Mode	37	0,011368	87,963	552,69	305460
MODAL	Mode	38	0,011045	90,536	568,85	323590
MODAL	Mode	39	0,011043	90,552	568,95	323710
MODAL	Mode	40	0,010713	93,347	586,52	344000
MODAL	Mode	41	0,010219	97,859	614,87	378060
MODAL	Mode	42	0,010219	97,861	614,88	378070
MODAL	Mode	43	0,009953	100,47	631,26	398490
MODAL	Mode	44	0,009891	101,11	635,27	403570
MODAL	Mode	45	0,009779	102,26	642,54	412850
MODAL	Mode	46	0,009776	102,29	642,73	413110
MODAL	Mode	47	0,009491	105,37	662,03	438280
MODAL	Mode	48	0,009441	105,92	665,5	442900
MODAL	Mode	49	0,009035	110,67	695,39	483570
MODAL	Mode	50	0,008979	111,37	699,78	489700



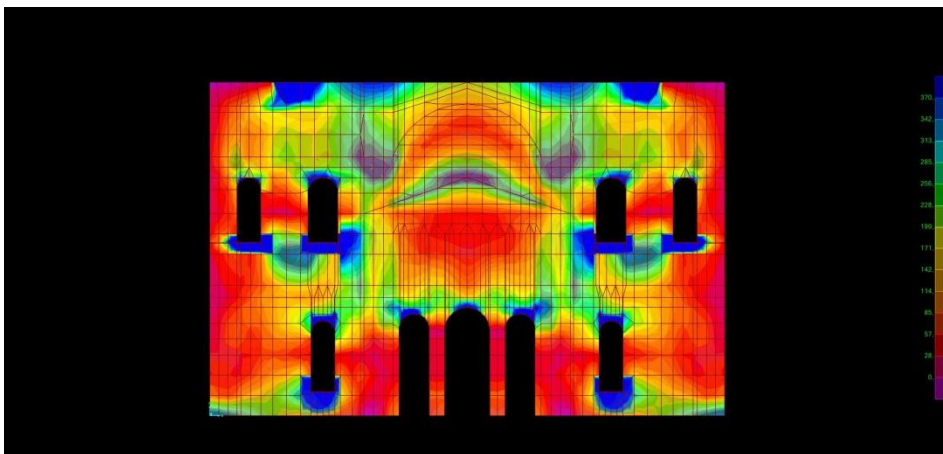
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ



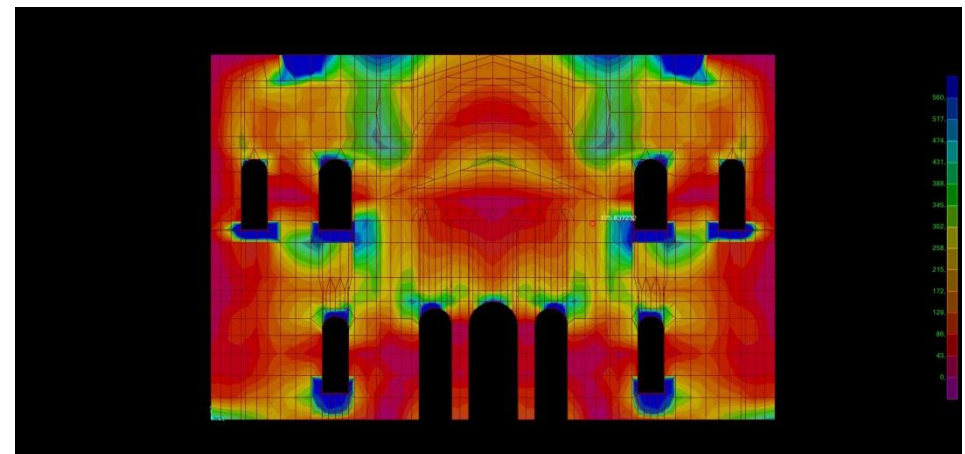
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



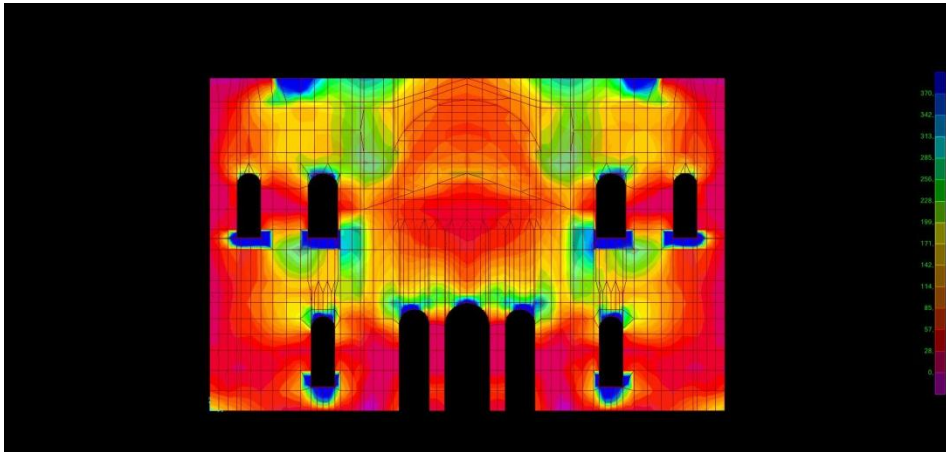
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



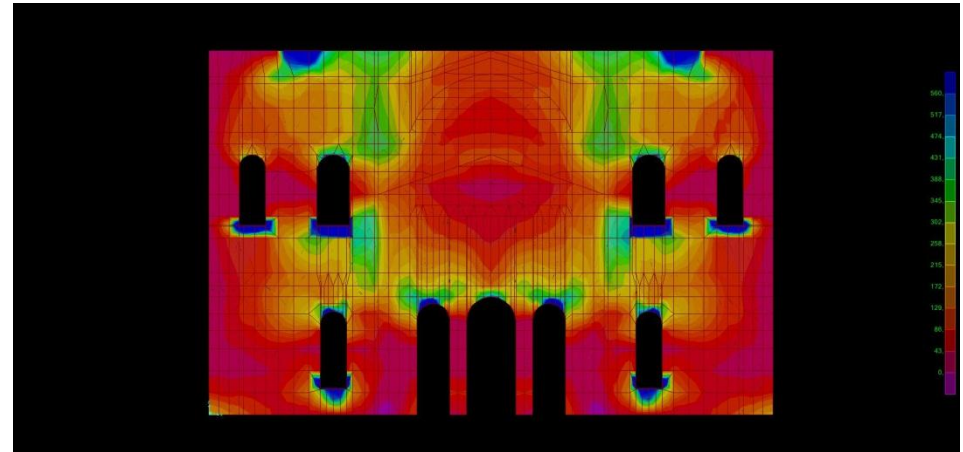
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



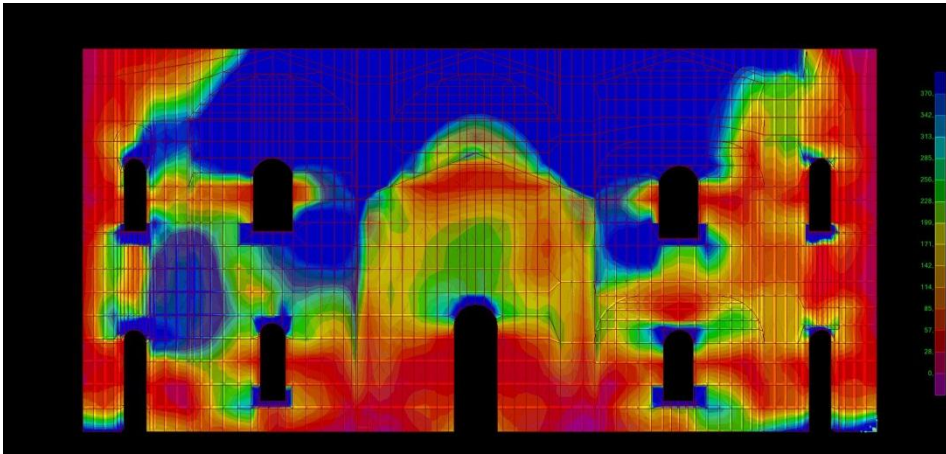
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



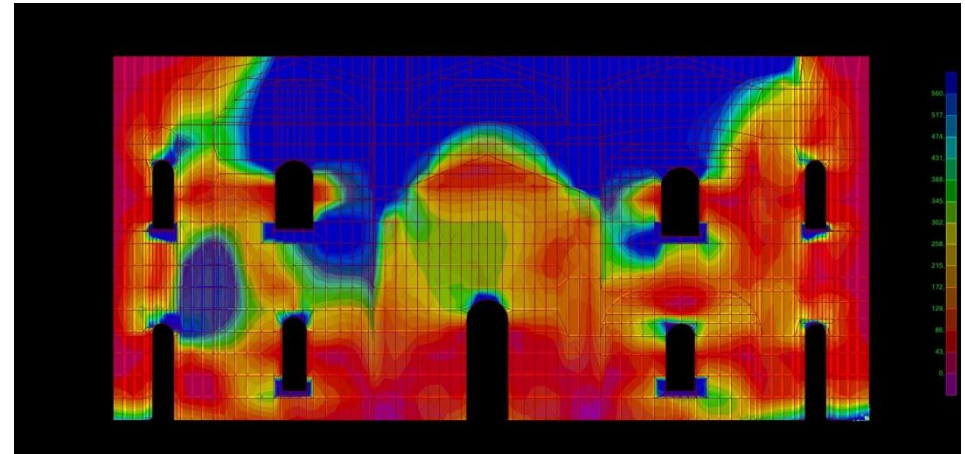
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



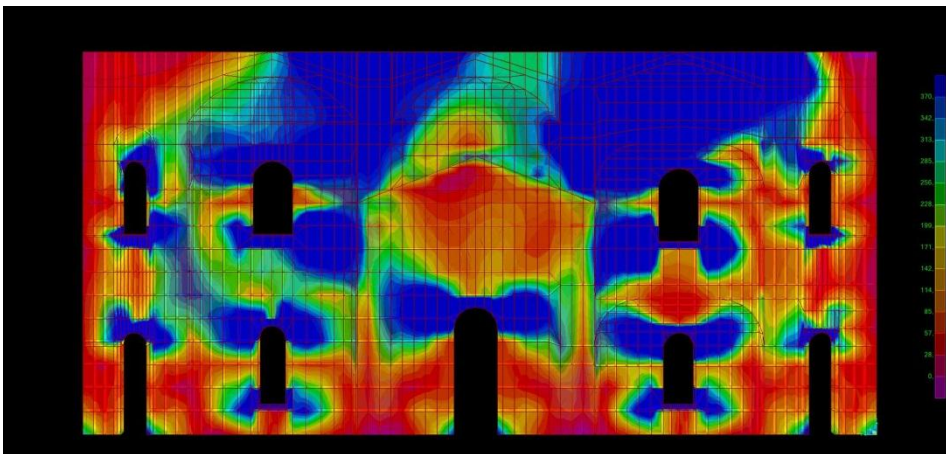
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



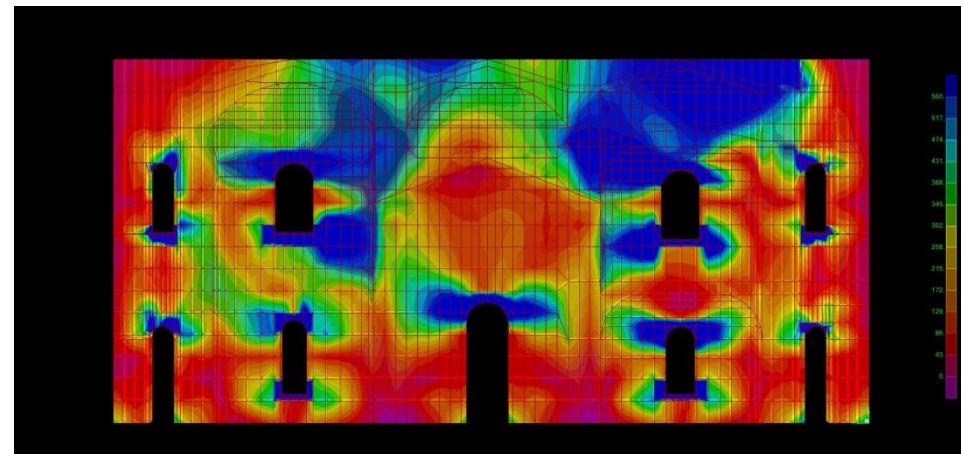
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_x + 0.3E_y + 0.3E_z$



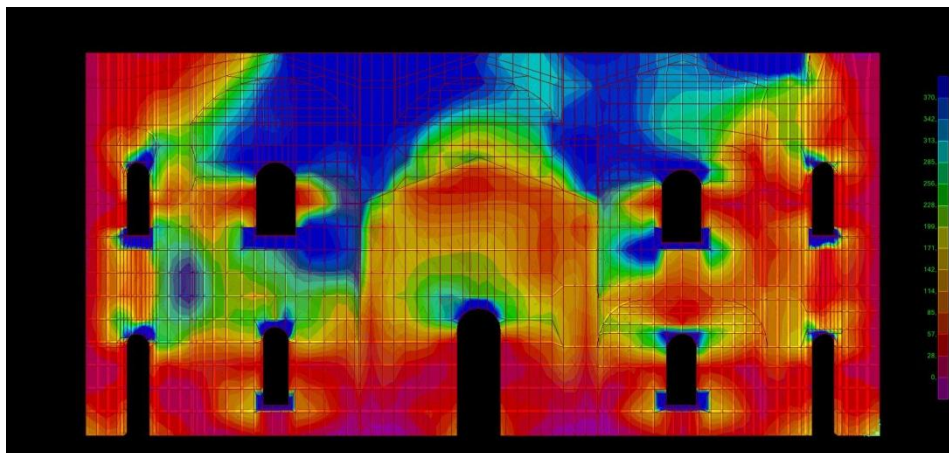
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_x + 0.3E_y + 0.3E_z$



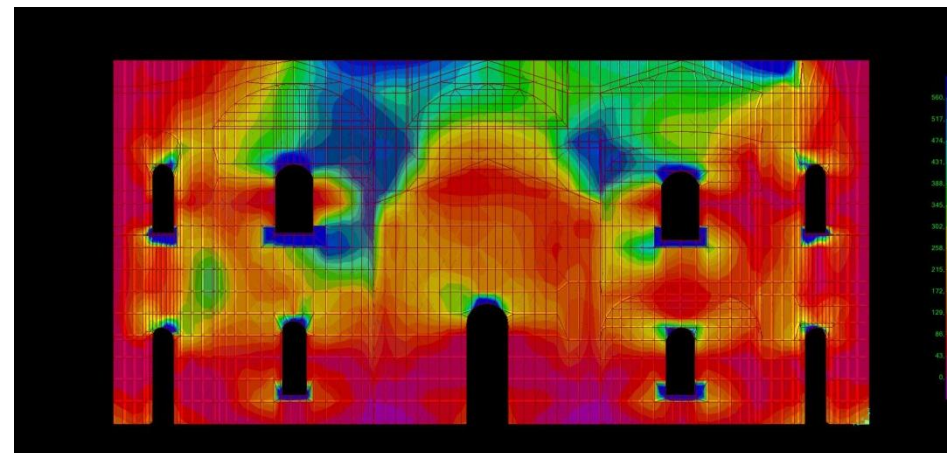
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_y + 0.3E_x + 0.3E_z$



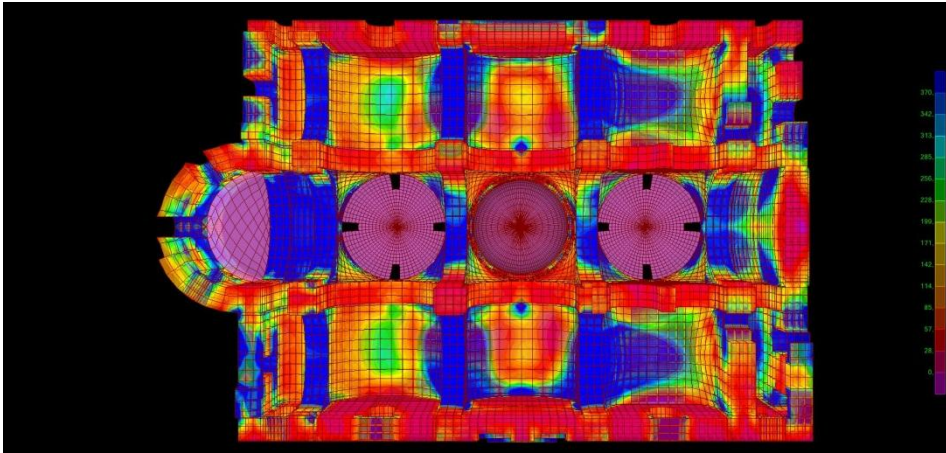
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_y + 0.3E_x + 0.3E_z$



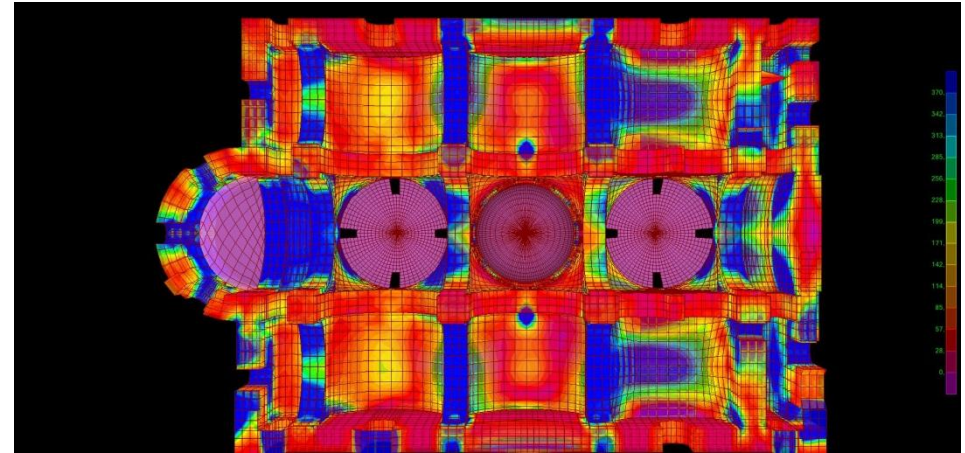
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



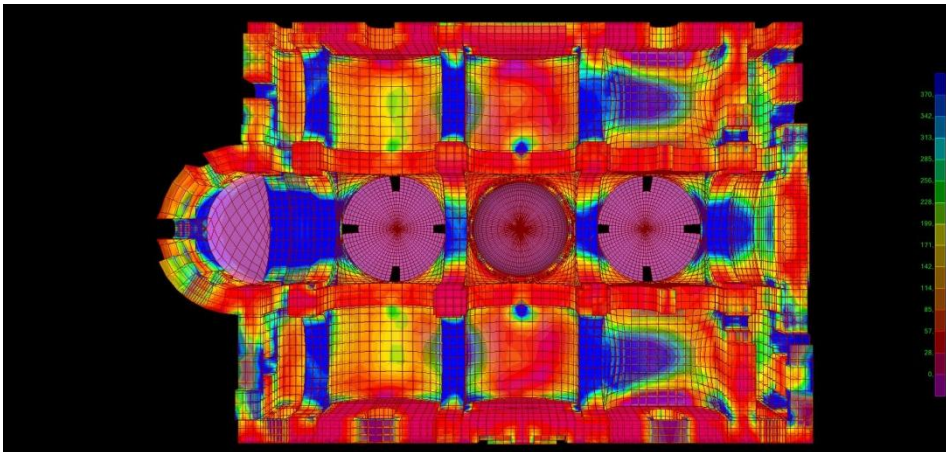
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



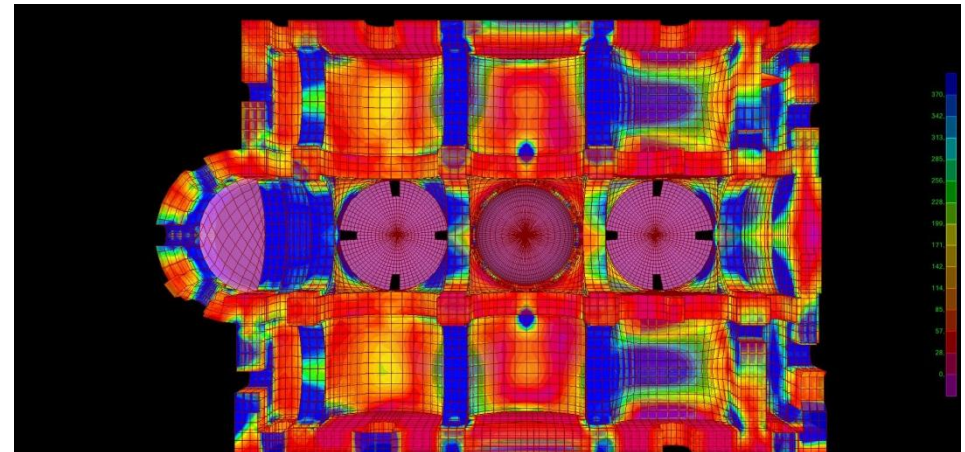
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



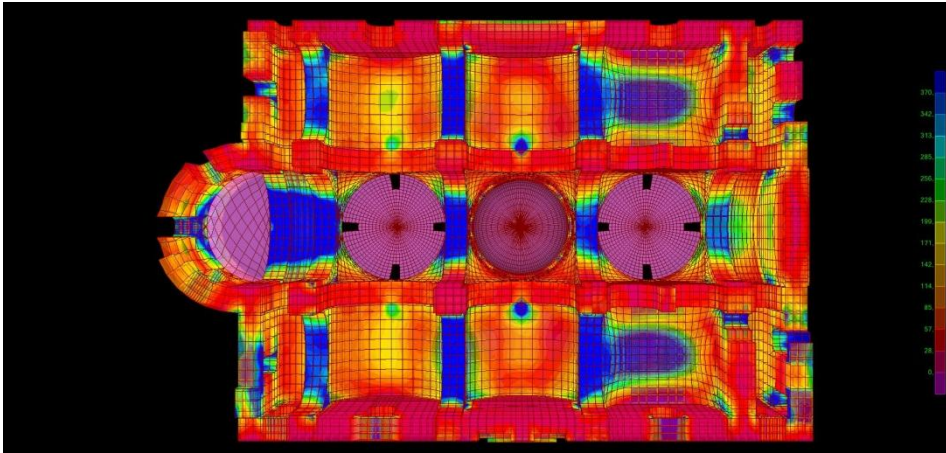
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



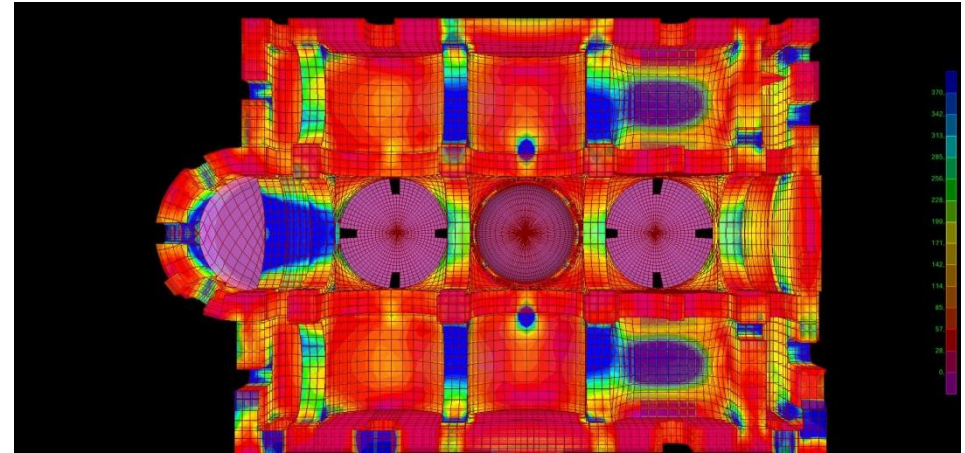
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



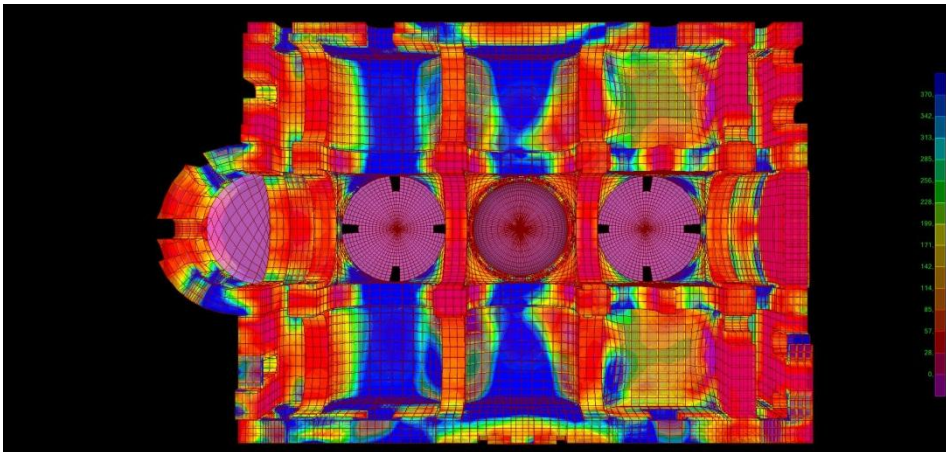
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



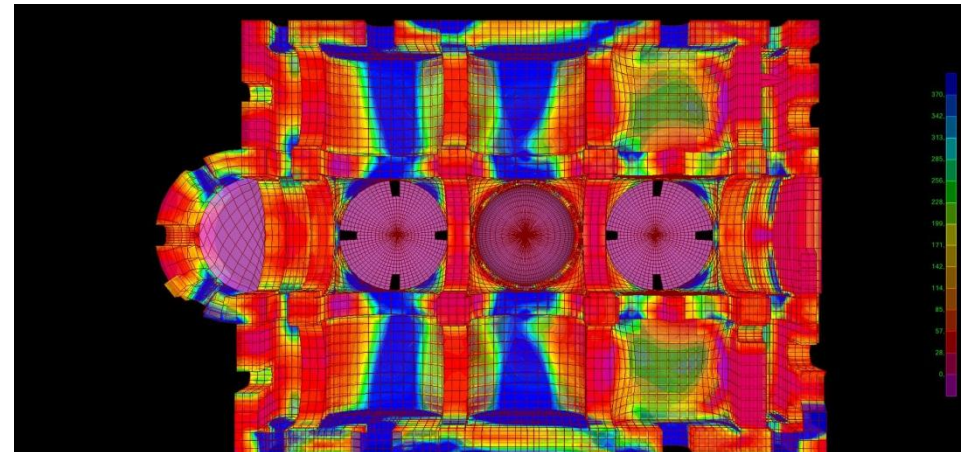
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



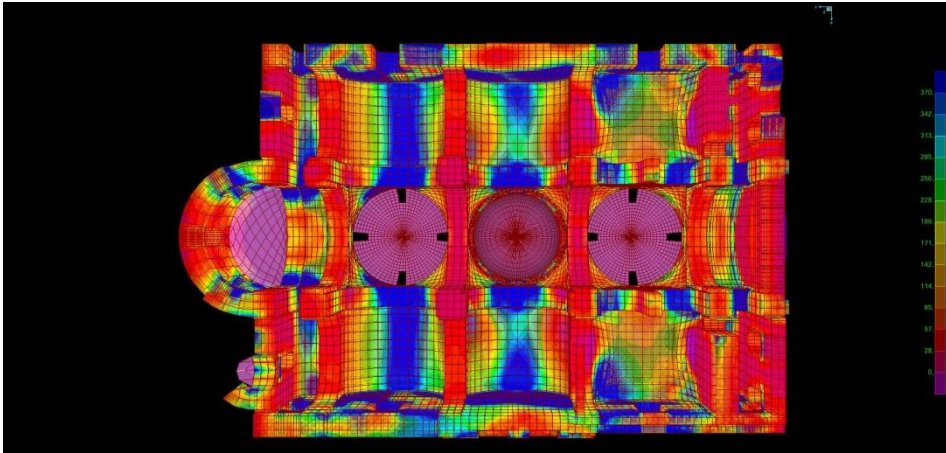
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



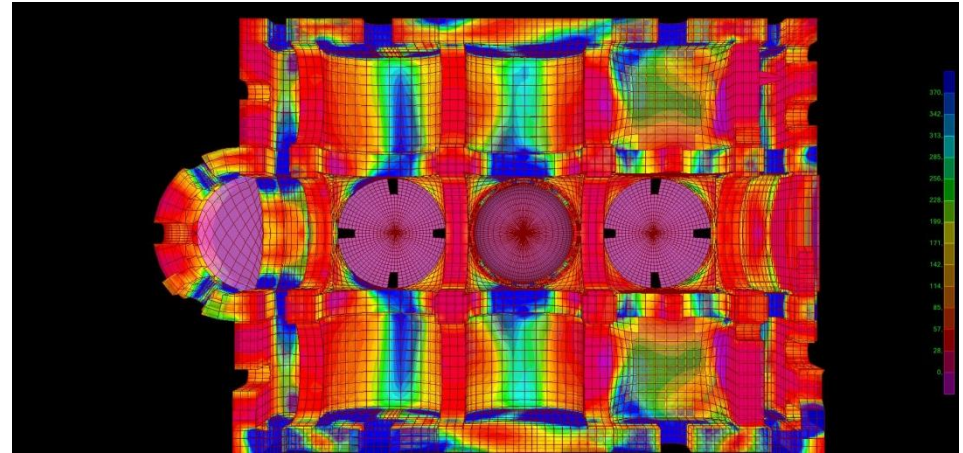
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ex+0.3Ey+0.3Ez$



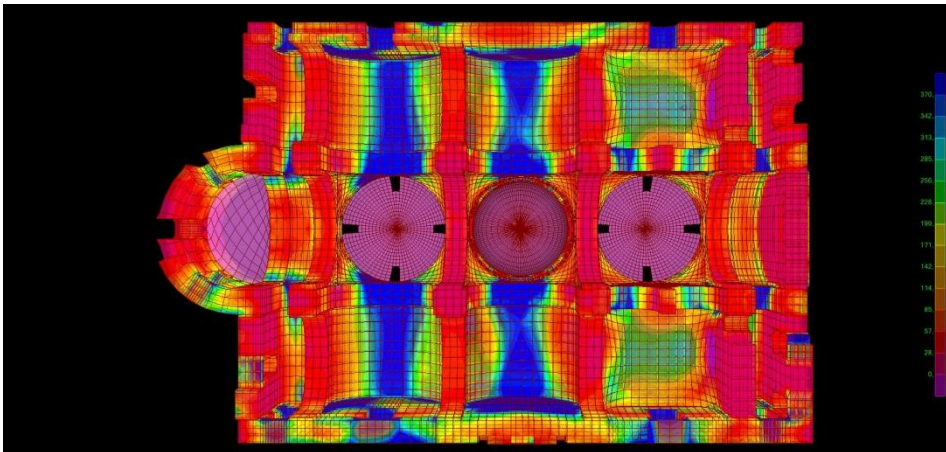
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ex+0.3Ey+0.3Ez$



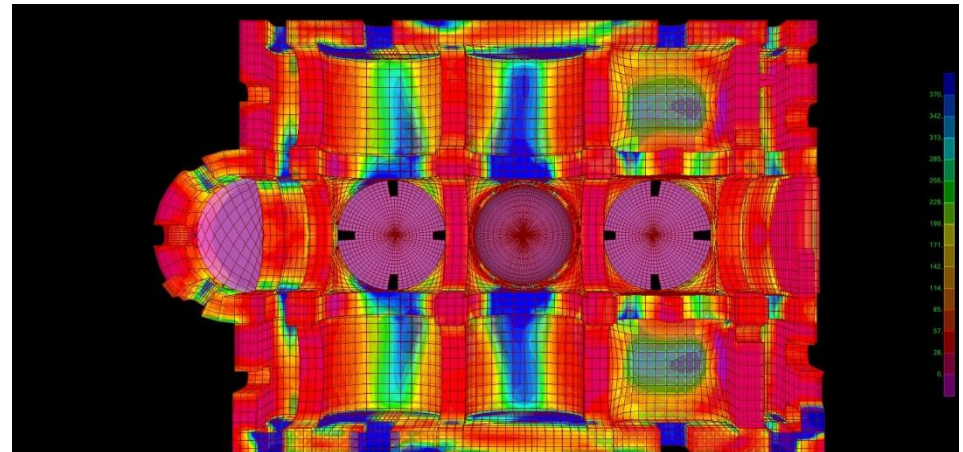
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



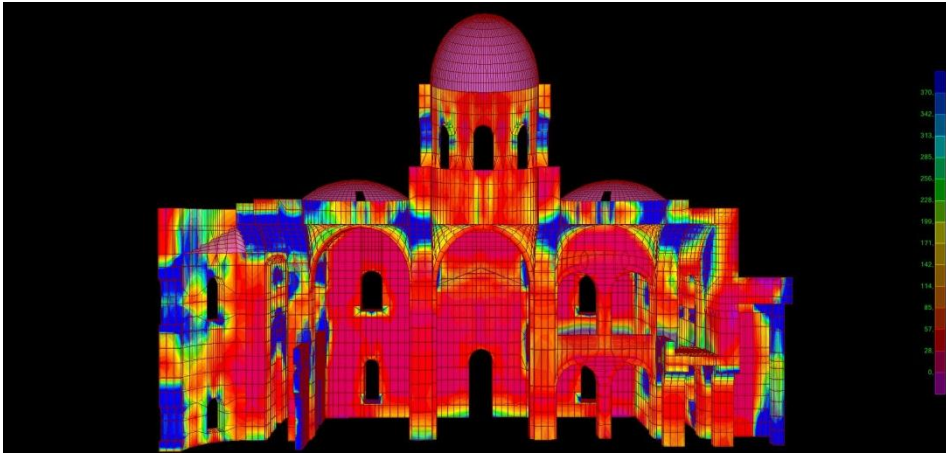
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



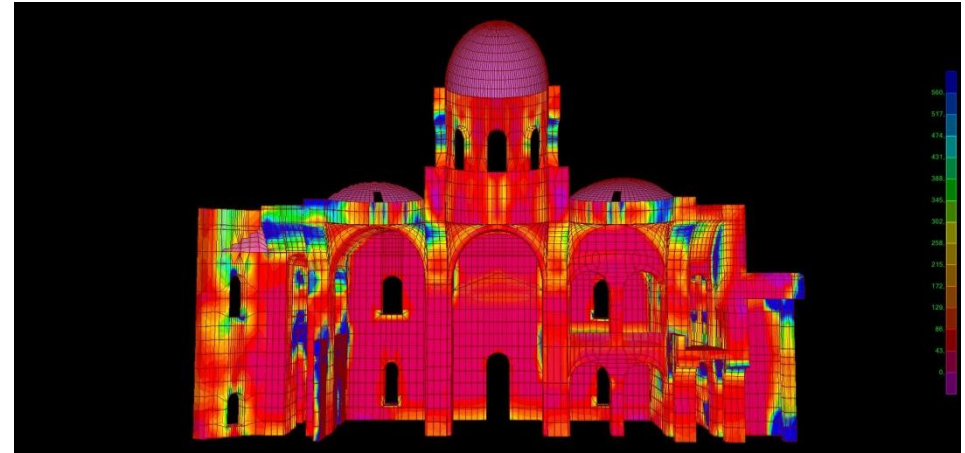
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_z+0.3E_x+0.3E_y$



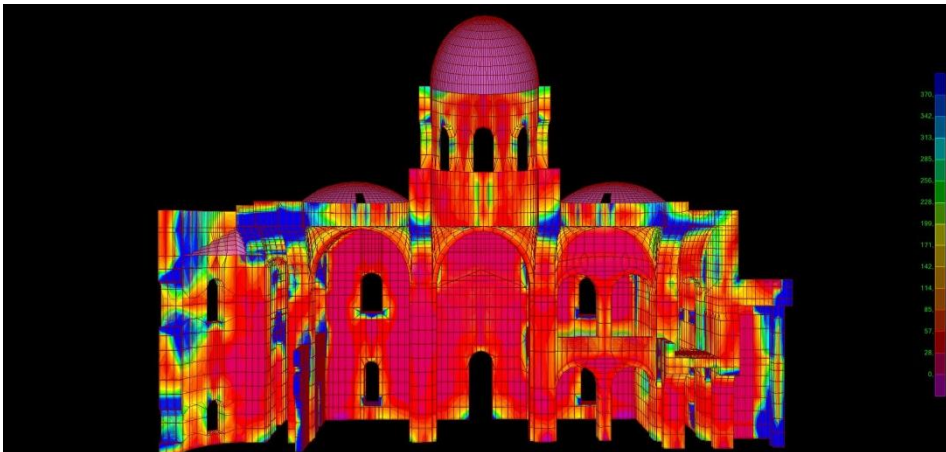
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_z+0.3E_x+0.3E_y$



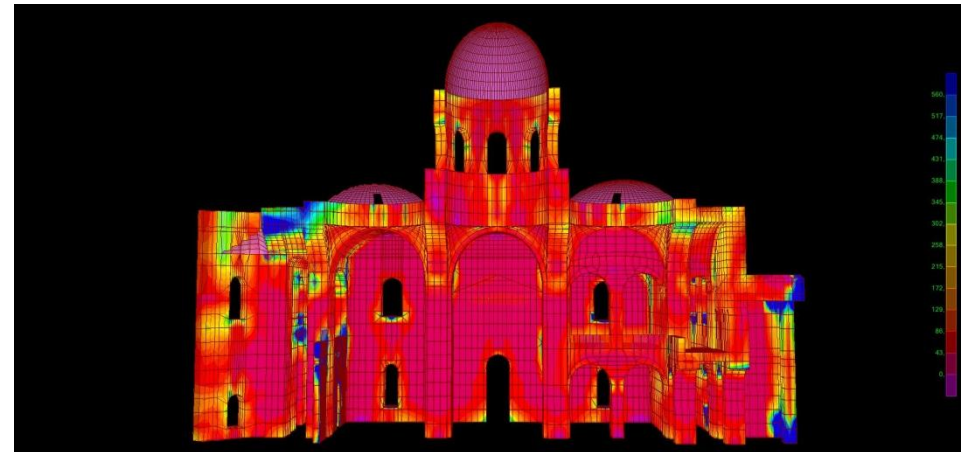
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



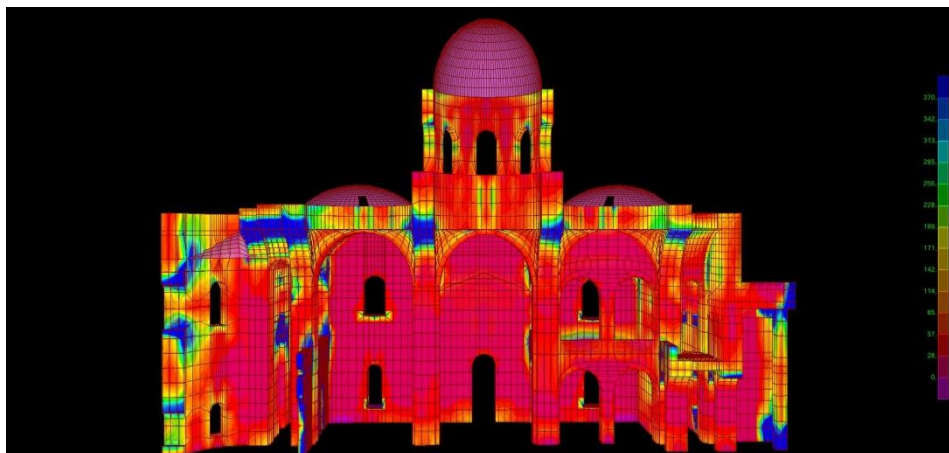
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



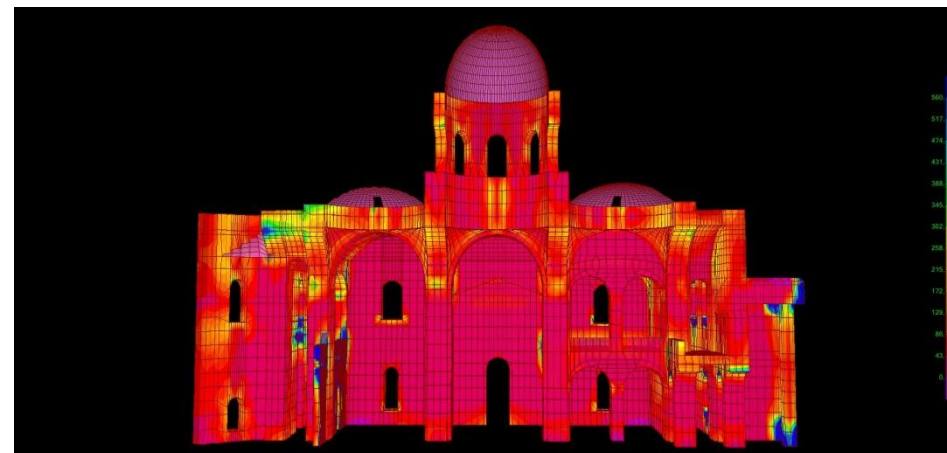
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



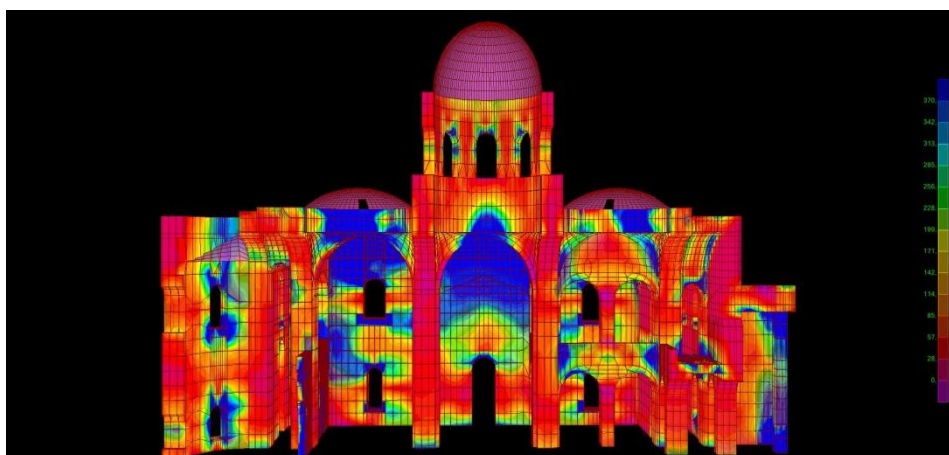
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



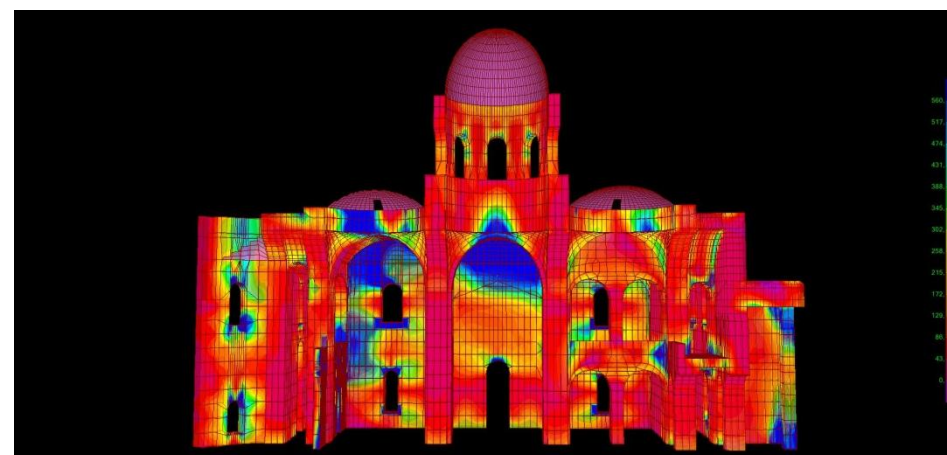
Τάσεις S11 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



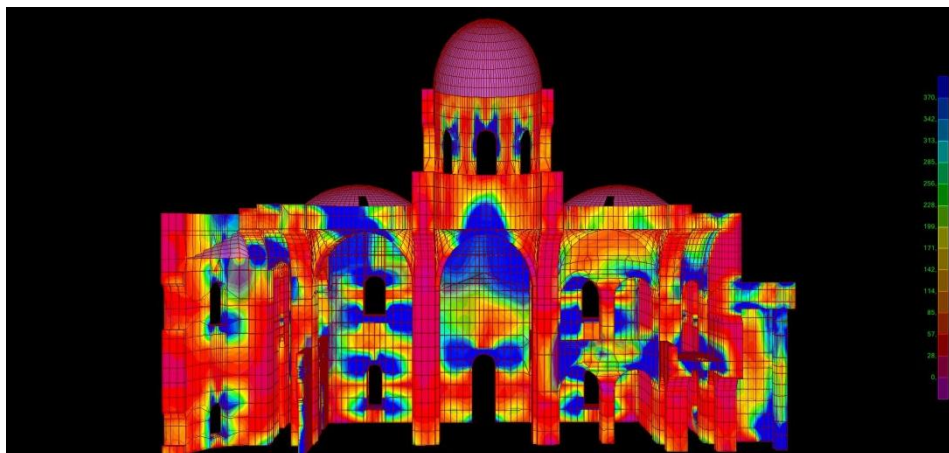
Τάσεις S11 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



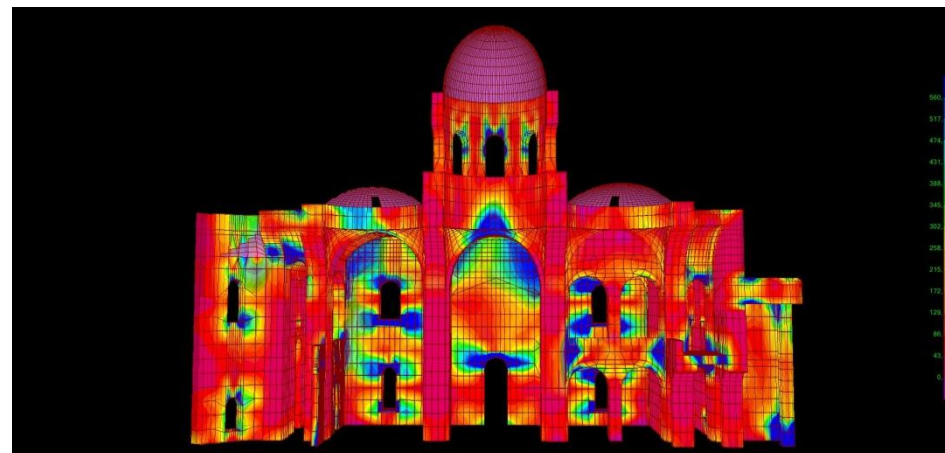
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ex+0.3Ey+0.3Ez$



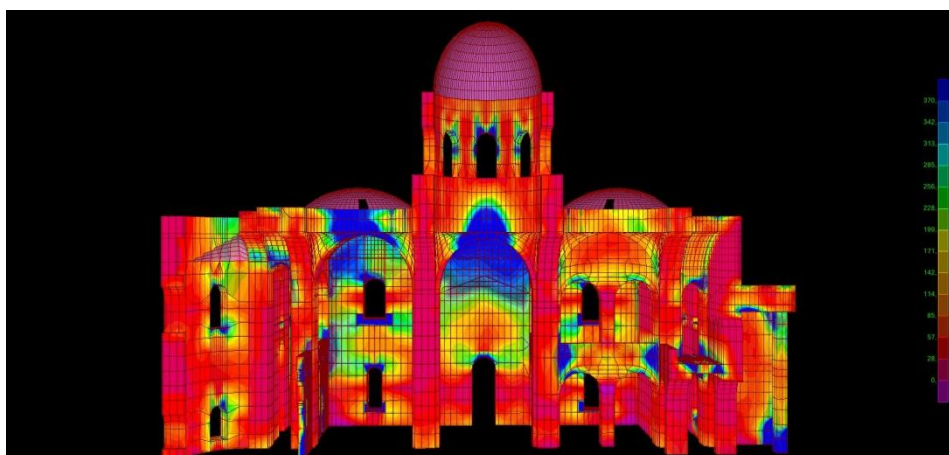
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ex+0.3Ey+0.3Ez$



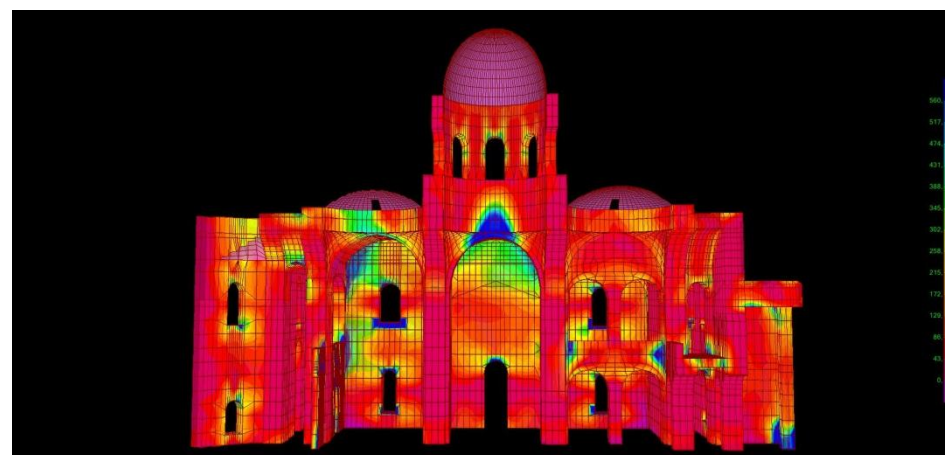
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ey+0.3Ex+0.3Ez$



Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ey+0.3Ex+0.3Ez$



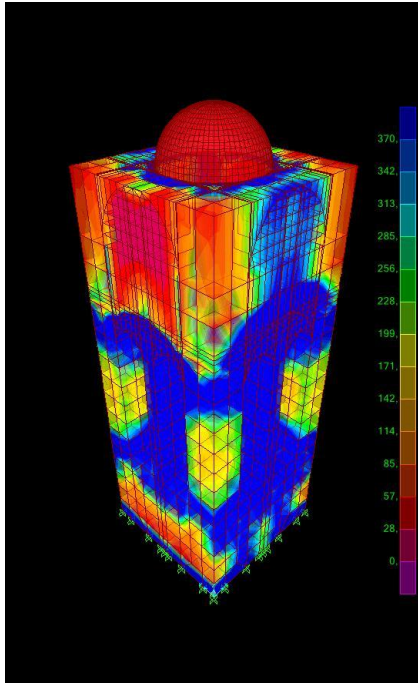
Τάσεις S22 στον υφιστάμενο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



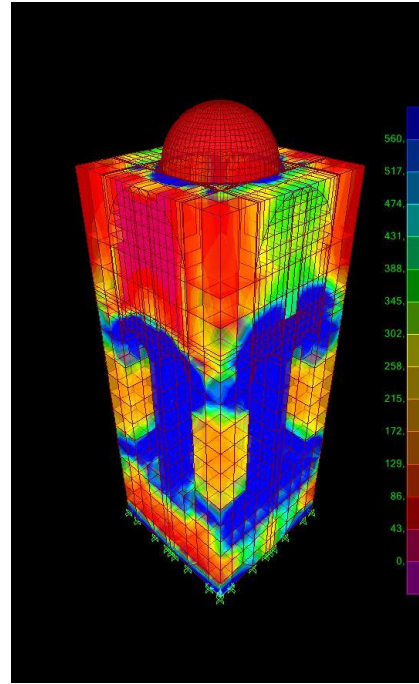
Τάσεις S22 στον ενισχυμένο ναό για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



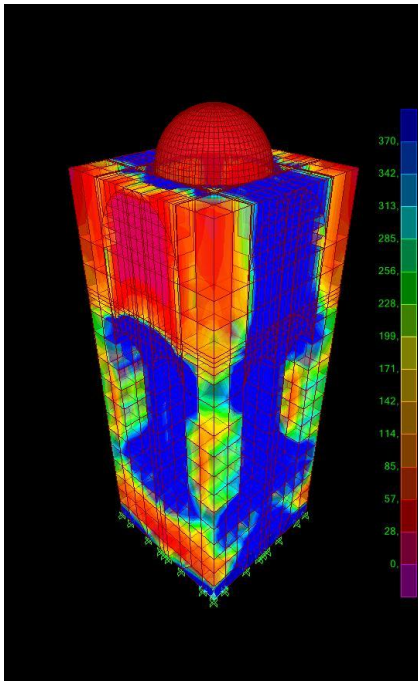
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ



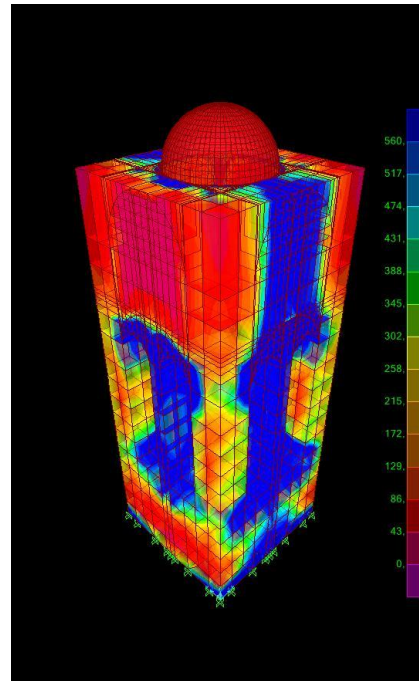
Τάσεις S11 στο κωδονοστάσιο για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



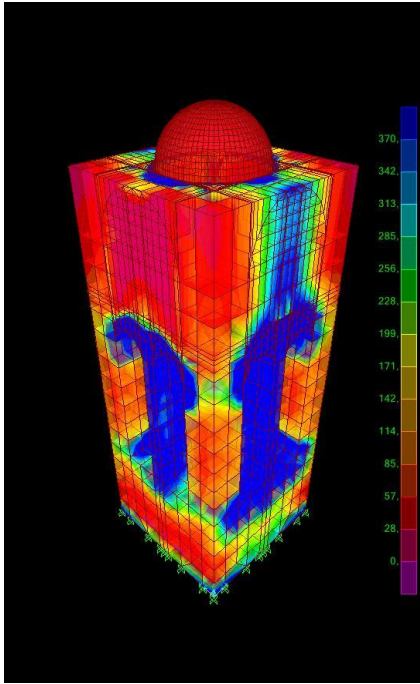
Τάσεις S11 στο κωδονοστάσιο με ενίσχυση για τον συνδυασμό $E_x+0.3E_y+0.3E_z$



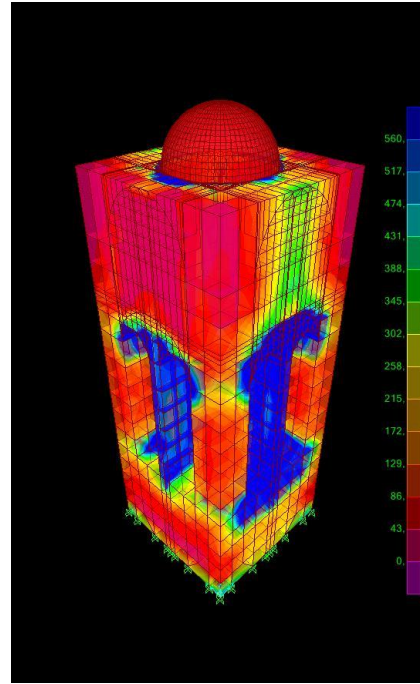
Τάσεις S11 στο κωδονοστάσιο για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



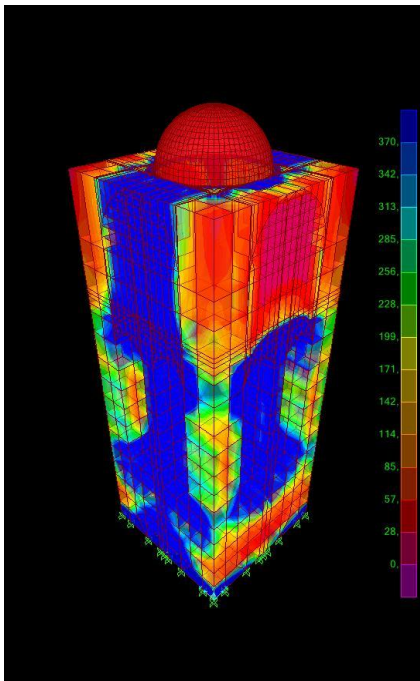
Τάσεις S11 στο κωδονοστάσιο με ενίσχυση για τον συνδυασμό $E_y+0.3E_x+0.3E_z$



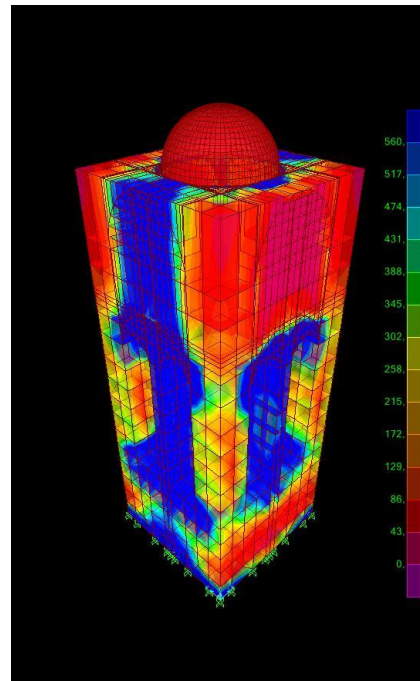
Τάσεις S11 στο κωδωνοστάσιο για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



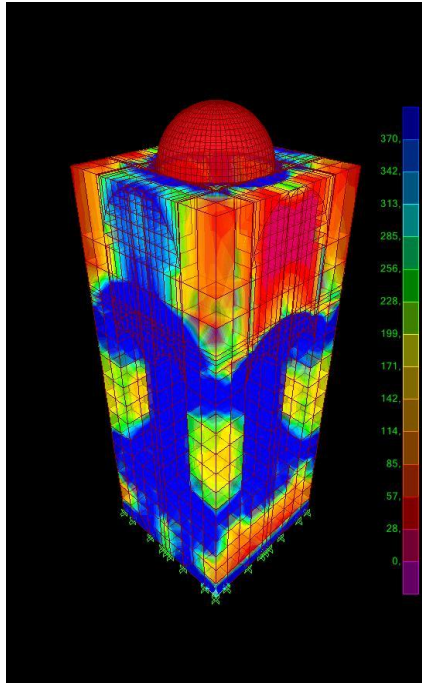
Τάσεις S11 στο κωδωνοστάσιο με ενίσχυση για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



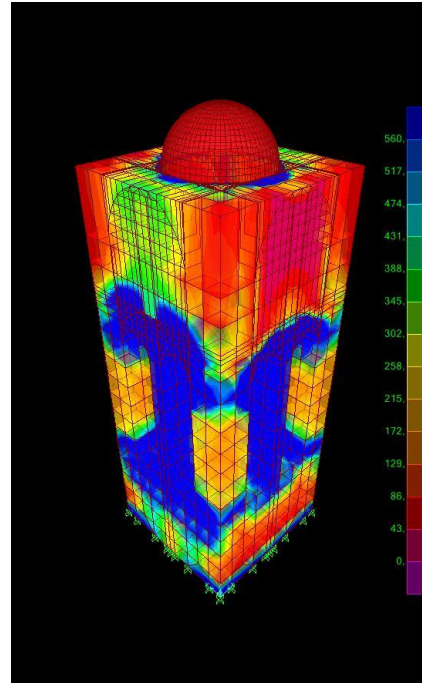
Τάσεις S22 στο κωδωνοστάσιο για τον συνδυασμό $Ex+0.3Ey+0.3Ez$



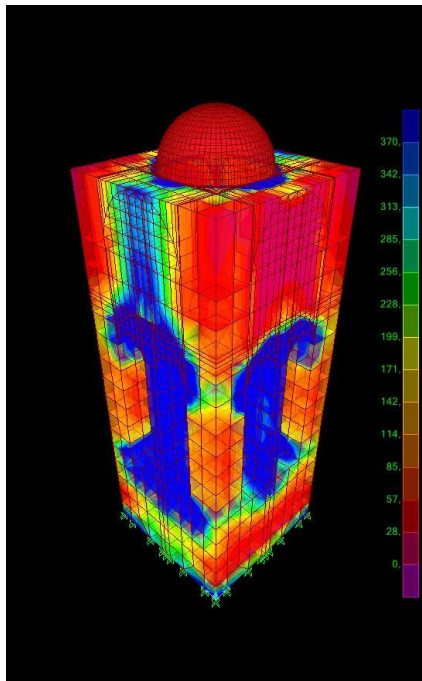
Τάσεις S22 στο κωδωνοστάσιο με ενίσχυση για τον συνδυασμό $Ex+0.3Ey+0.3Ez$



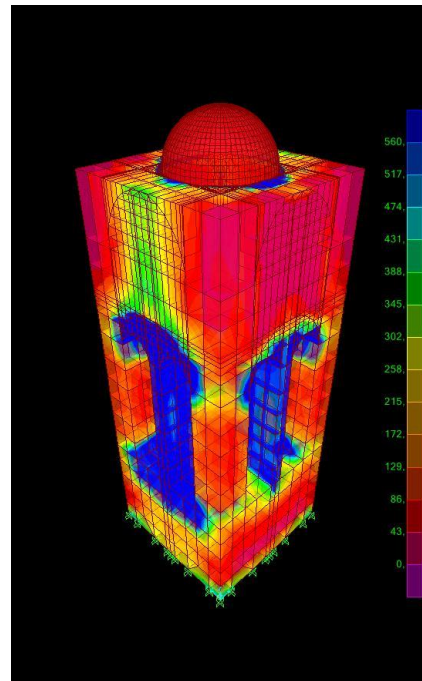
Τάσεις S22 στο κωδονοστάσιο για τον συνδυασμό $Ey+0.3Ex+0.3Ez$



Τάσεις S22 στο κωδονοστάσιο με ενίσχυση για τον συνδυασμό $Ey+0.3Ex+0.3Ez$



Τάσεις S22 στο κωδονοστάσιο για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



Τάσεις S22 στο κωδονοστάσιο με ενίσχυση για τον συνδυασμό $Ez+0.3Ex+0.3Ey$



Β Ι Β Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Finite Element Modeling in Engineering Practice- Constantine C. Spyrakos, 1994
2. Finite Element Analysis in Engineering Practice- Constantine C. Spyrakos, John Raftoyannis, 1997
3. Μαλικούτη Σταματίνα, «Πειραιάς 1834- 1912», Πολιτιστικό Ίδρυμα Ομίλου Πειραιώς, 2004
4. Carydis P. and H.P. Mouzakis: “Ambient vibration measurements of undamaged, seismically damaged and repaired buildings”, Earthquake Spectra, Vol. 2, N0 3, pp.515-535, 1986.
5. Carydis, P. G.: “Measurement and evaluation of ambient vibrations on monuments”, Part 18- I.3.
6. Kanai, K., and Tanaka, T., 1961, “On Microtremors VIII”, Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan, Vol39.
7. Θ.Π. Τάσιος, Μ.Π. Χρονόπουλος, *Παθολογικά Αίτια και Μηχανική των Βλαβών της Τοιχοποιίας*, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ./ Εργ. Ωπλ. Σκυροδέματος Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1986.
8. EN 1996-1-1, Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός Κατασκευών από Τοιχοποιία, Νοέμβριος 2005
9. SAP2000. Structural analysis program, advanced 15.1.0. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc.; 2009.
10. EN 1998-1, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Δεκέμβριος 2004
11. Κωνσταντίνος Σπυράκος, *Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2004.
12. M.R. Valluzzi, F. da Porto, C. Modena, *Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls*, RILEM Materials and Structures, 37(267): 184-192, 2004.
13. Καραντώνη Β. Φυλλίτσα, «Κατασκευές από τοιχοποιία- Σχεδιασμός και Επισκευές», Αθήνα 2004
14. Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος, «ενισχύσεις κατασκευών σκυροδέματος και τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά», Πάτρα 2006

