

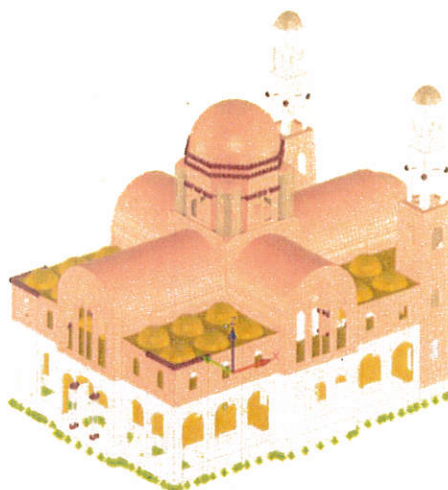
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ-
ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΙΕΡΟΥ ΝΑΟΥ ΑΓΙΟΥ ΜΗΝΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ



Βλάσης Κουμούσης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ
Ανάργυρος Μωυσίδης, Δρ. ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, ΕΜΠ
Χρήστος Σοφιανός, Δρ. ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, ΕΜΠ
Ηλίας Γκιμούσης, Δρ. ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, ΕΜΠ
Λώρενς-Κίμων Αντωνιάδης, ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, Υπ. Διδ. ΕΜΠ

Θέμα: Ανάλυση φέροντος οργανισμού και έλεγχος επάρκειας υφιστάμενου Ναού

Ημερομηνία: 04/2022

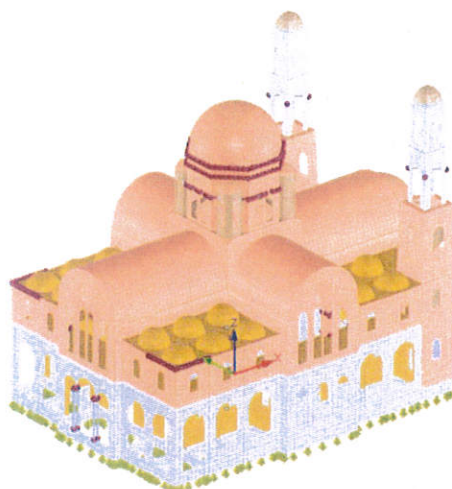
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ-ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΙΕΡΟΥ ΝΑΟΥ ΑΓΙΟΥ ΜΗΝΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ



Βλάχης Κουμούσης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ
Ανάργυρος Μωυσίδης, Δρ. ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, ΕΜΠ
Χρήστος Σοφιανός, Δρ. ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, ΕΜΠ
Ηλίας Γκιμούσης, Δρ. ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, ΕΜΠ
Λώρενς-Κίμων Αντωνιάδης, ΠΜ, MSc Δομοστατικός Σχεδιασμός, Υπ. Διδ. ΕΜΠ

Θέμα: Ανάλυση φέροντος οργανισμού και έλεγχος επάρκειας υφιστάμενου Ναού

Ημερομηνία: 04/2022



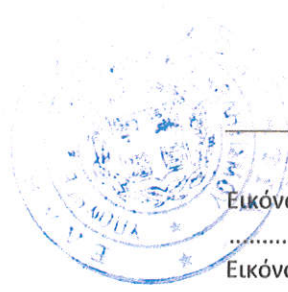
Περιεχόμενα

Λίστα εικόνων.....	5
Λίστα πινάκων	6
1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ	7
Εισαγωγή	7
Επιμέρους αντοχές υλικών.....	7
Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας	9
Προσδιορισμός εφελκυστικής αντοχής	9
Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας	10
Συγκεντρωτικές μέσες αντοχές	10
Συγκεντρωτικές αντοχές ελέγχου.....	10
2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ – ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ...	12
Κανονιστικό πλαίσιο – αναλύσεις.....	13
Ιδιομορφική ανάλυση	14
Πίνακας ιδιομορφών.....	20
Δρώσες ιδιομορφικές μάζες.....	22
Φορτίσεις	26
Συνδυασμοί φορτίσεων	28
Αποτελέσματα ελέγχων υφιστάμενης κατάστασης.....	31
Νότιος τοίχος Ισογείου.....	33
Ανατολικός τοίχος Ισογείου	34
Δυτικός τοίχος ισόγειο	35
Νότιος τοίχος εσωτερικός ισογείου	36
Νότιος τοίχος γυναικωνίτη.....	37
Δυτικός τοίχος γυναικωνίτη	38
Καμπαναριά	39
Κεντρικός τρούλος.....	40
Έλεγχος με Ottosen	41
3. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52



Λίστα εικόνων

Εικόνα 1. Λήψη πυρήνων λιθωσμάτων.	8
Εικόνα 2. Υπολογιστικό προσομοίωμα φέροντος οργανισμού του Ιερού Ναού.....	12
Εικόνα 3. Φάσμα σχεδιασμού.....	13
Εικόνα 4. 1 ^η ιδιομορφή.	14
Εικόνα 5. 2 ^η ιδιομορφή.	14
Εικόνα 6. 3 ^η ιδιομορφή.	15
Εικόνα 7. 4 ^η ιδιομορφή.	15
Εικόνα 8. 5 ^η ιδιομορφή.	16
Εικόνα 9. 6 ^η ιδιομορφή.	16
Εικόνα 10. 7 ^η ιδιομορφή.	17
Εικόνα 11. 8 ^η ιδιομορφή.	17
Εικόνα 12. 9 ^η ιδιομορφή.	18
Εικόνα 13. 10 ^η ιδιομορφή.	18
Εικόνα 14. Μόνιμα φορτία Ναού.....	26
Εικόνα 15. Κινητά φορτία.....	26
Εικόνα 16. Φορτία χιονιού.	27
Εικόνα 17. Μετακινήσεις για τα στατικά φορτία στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.	31
Εικόνα 17. Μετακινήσεις για το σεισμικό συνδυασμό 100X – 30Y.	32
Εικόνα 18. Μετακινήσεις για το σεισμικό συνδυασμό 30X – 100Y.	32
Εικόνα 17. Θέσεις τομών ελέγχου πεσσών νότιου τοίχου.....	33
Εικόνα 18. Θέσεις τομών ελέγχου πεσσών ανατολικού τοίχου.	34
Εικόνα 19. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών δυτικού τοίχου Ναού.	35
Εικόνα 20. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών δυτικού τοίχου γυναικωνίτη.	36
Εικόνα 21. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών νότιου τοίχου γυναικωνίτη.	37
Εικόνα 22. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών βόρειου τοίχου γυναικωνίτη.....	38
Εικόνα 23. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών γυναικωνίτη.....	39
Εικόνα 24. Θέσεις ελέγχου διατομών τρούλου.	40
Εικόνα 25. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Τρούλος Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.	41
Εικόνα 26. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Τρούλος Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.	41
Εικόνα 27. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Δυτική καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.	42
Εικόνα 28. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Ανατολική καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.....	42
Εικόνα 29. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Ανατολική καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.....	43
Εικόνα 30. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.	43
Εικόνα 31. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.	44
Εικόνα 32. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.	44



Εικόνα 33. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.	45
Εικόνα 34. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.	45
Εικόνα 35. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.	46
Εικόνα 36. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.	46
Εικόνα 37. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.	47
Εικόνα 38. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – ULS.	47
Εικόνα 39. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – ULS.	48
Εικόνα 40. Λόγοι ανεπάρκειας για τα σεισμικά φορτία στις καμάρες και τον τρούλο του Ναού.	50

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1. Δεδομένα επιμέρους αντοχών υφιστάμενων στοιχείων.	8
Πίνακας 2. Υφιστάμενες μέσες αντοχές λιθοδομής.	10
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές αντοχές ελέγχου δυνάμεων και τάσεων λιθοδομής.	11
Πίνακας 4. Περιγραφή ιδιομορφών.	19
Πίνακας 5. 100 πρώτες ιδιομορφές φορέα.	22
Πίνακας 6. Δρώσες μάζες ανά διεύθυνση και ιδιομορφή φορέα.	25
Πίνακας 7. Συνδυασμοί φορτίσεων.	29
Πίνακας 8. Περιβάλλουσες και σεισμικοί συνδυασμοί.	29
Πίνακας 9. Συνδυασμός με SRSS.	30
Πίνακας 10. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών νότιου τοίχου Ναού.	33
Πίνακας 11. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών ανατολικού τοίχου Ναού.	34
Πίνακας 12. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών δυτικού τοίχου Ναού.	35
Πίνακας 13. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών δυτικού τοίχου Ναού.	36
Πίνακας 14. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών νότιου τοίχου γυναικωνίτη.	37
Πίνακας 15. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών βόρειου τοίχου γυναικωνίτη.	38
Πίνακας 16. Λόγοι ανεπάρκειας υποστυλωμάτων προστώου.	39



1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ

Εισαγωγή

Ο Ιερός Μητροπολιτικός Ναός Αγίου Μεγαλομάρτυρος Μηνά είναι ορθόδοξος καθεδρικός ναός, ο οποίος βρίσκεται στην πόλη του Ηρακλείου και αποτελεί έδρα του Αρχιεπισκόπου Κρήτης. Είναι δρομικός σταυροειδής με τρούλο και πλευρικά διαμερίσματα στο επίπεδο του ισογείου, πάνω από τα οποία διαμορφώνεται υπερώο σε σχήμα Π στη βόρεια, δυτική και νότια πλευρά στο επίπεδο του ορόφου. Το κτίριο έχει κάτοψη ορθογώνιου σχήματος, γενικών διαστάσεων 36,94μ. επί 27,04μ., από το οποίο προεξέχουν οι κεραίες του σταυρού στη βόρεια, δυτική και νότια πλευρά, ενώ στα ανατολικά η κεντρική κόγχη του ιερού εξέχει κατά 4,62μ. του βασικού περιγράμματος

Ο φέρων οργανισμός (Φ.Ο.) του Ιερού Ναού αποτελείται από φέρουσα λιθοδομή. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τοιχοποιίας. Τοιχοποιία από λαξευμένους λίθους, αργολιθοδομή καθώς και οπτοπλινθοδομή. Ορισμένα από τα κυκλικά υποστυλώματα αποτελούνται από ένα ενιαίο κομμάτι λίθου. Οι λίθοι είναι μαργαίκοι ασβεστόλιθοι όπως αποτυπώνεται και στις Τεχνικές εκθέσεις: «ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΔΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ», ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2021, ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ (10) και «Εργαστηριακές μετρήσεις και την αποτίμηση της κατάστασης των μαρμάρινων στοιχείων του Ι.Ν. Αγίου Μηνά Ηρακλείου Κρήτης από περιβαλλοντικούς παράγοντες και την υπόδειξη των βασικών μέτρων αντιμετώπισής τους», Οκτώβριος 2021, Αλέξης Στεφανής, Επ. Καθηγητής ΠΑΔΑ Παναγιώτης Θεουλάκης, Καθηγητής ΠΑΔΑ (12).

Επιμέρους αντοχές υλικών

Έπειτα από τη λήψη πυρήνων (Εικόνα 1) και δειγμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά στον τεύχος «ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΔΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ» του «ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΙΕΡΟ ΝΑΟ ΑΓΙΟΥ ΜΗΝΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ», Εδαφομηχανική ΑΤΕ (10), προσδιορίστηκαν οι μέσες αντοχές των υλικών οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η θλιπτική αντοχή του υφιστάμενου κονιάματος μετρήθηκε στα 3.0 MPa. Οι δοκιμές σημειακής φόρτισης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο του Ε103-84/5, ενώ η αντοχή σε θλίψη των κυλινδρικών δοκιμών σύμφωνα με το πρότυπο ΚΤΣ1997/Ε7.

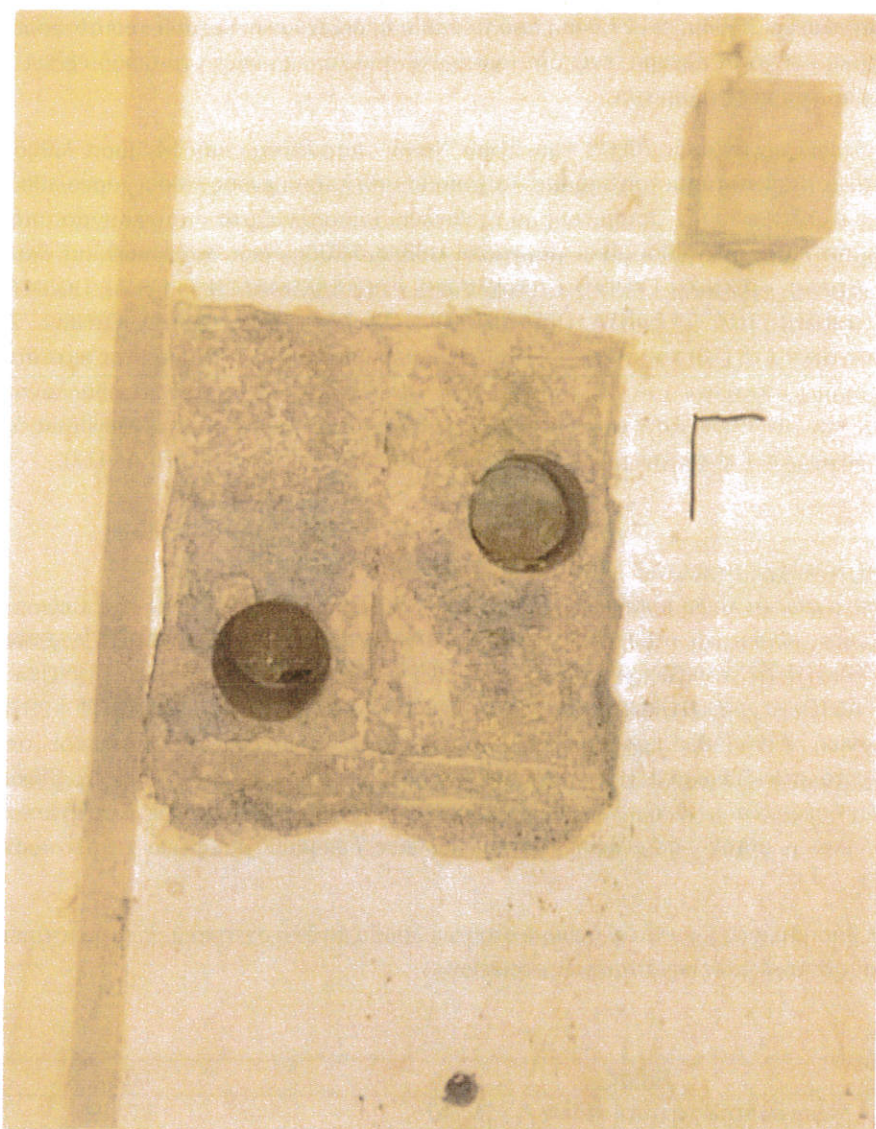
Με βάση τα ανωτέρω καταλήγουμε στον ακόλουθο πίνακα σχετικά με τις μέσες τιμές και τις επιμέρους αντοχές των υφιστάμενων στοιχείων:

Είδος	Τιμή
Μέση θλιπτική αντοχή λίθων f_{b1} (MPa)	31,58
Τυπική απόκλιση θλιπτικής αντοχής λίθων (MPa)	19,50
Μέση θλιπτική αντοχή υφιστάμενου κονιάματος f_{mc} (MPa)	3,0



Ειδικό βάρος λίθων γ (kN/m^3)	20,88
Μέση θλιπτική αντοχή συμπαγών τούβλων f_{b2} (MPa)	9,0
Τυπική απόκλιση θλιπτικής αντοχής συμπαγών τούβλων (MPa)	4,8

Πίνακας 1. Δεδομένα επιμέρους αντοχών υφιστάμενων στοιχείων



Εικόνα 1. Λήψη πυρήνων λιθοσωμάτων.



Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας εκτιμήθηκε με βάση τις επιμέρους αντοχές των λιθοσωμάτων και του κονιάματος. Η συνολική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση Σ6.3 του ΚΑΔΕΤ ^[7] για τη λιθοδομή των πελεκητών λίθων και την αργολιθοδομή.

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

Όπου:

f_{bc}	μέση θλιπτική αντοχή λιθοσώματος
f_{mc}	μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος
λ	συντελεστής συνάφειας λιθοσώματος – κονιάματος, για σχετικά καλής συνάφειας λίθους. Εκτιμάται μακροσκοπικά από αποκαλύψεις
f_0	συντελεστής λάξευσης. Εκτιμάται μακροσκοπικά από αποκαλύψεις
ξ	συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη δυσμενή επιρροή του πάχους των αρμών του κονιάματος. Δίνεται από τη σχέση: $\xi = \max \left[\frac{1}{1 + 3.5(k - 0.3)}, 1.0 \right]$ $k = \min \left(\frac{V_m}{V_w}, 0.30 \right)$
$\frac{V_m}{V_w}$	ο όγκος του κονιάματος προς τον όγκο της τοιχοποιίας. Εκτιμάται μακροσκοπικά από αποκαλύψεις

Η θλιπτική αντοχή της πλινθοδομής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση Σ6.1 του ΚΑΔΕΤ για καλοδομημένη οπτοπλινθοδομή :

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

Όπου:

f_{bc}	μέση θλιπτική αντοχή λιθοσώματος
f_{mc}	μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος
a	λόγος του μέσου πάχους των οριζόντιων αρμών κονιάματος και του μέσου ύψους των λιθοσωμάτων

Προσδιορισμός εφελκυστικής αντοχής

Ελλείψει ακριβέστερων στοιχείων, η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας μπορεί να λαμβάνεται ίση με $f_{wt} = 0.20 \text{ MPa}$, καθώς η θλιπτική αντοχή του κονιάματος δομήσεως είναι μεγαλύτερη από 2.0 MPa και μικρότερη από 5.0 MPa (ΚΑΔΕΤ §6.5).

Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας

Σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ, §6.2.5 το μέτρο ελαστικότητας E_{wc} της τοιχοποιίας κυμαίνεται από 300 έως 1200 φορές τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Για το μαθηματικό προσομοίωμα επιλέχθηκε:

$$E \approx 1000 \cdot f_{wc}$$

Τέλος το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται ως το 40% του μέτρου ελαστικότητας ως:

$$G \approx 0.40 \cdot E$$

Συγκεντρωτικές μέσες αντοχές

Οι τελικές μέσες αντοχές των λιθοδομών παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω:

Είδος	Τιμή
Μέση θλιπτική αντοχή λιθοδομής λαξευτών λίθων f_{wc1} (MPa) (STONE BLUE)	5.25
Μέτρο ελαστικότητας λιθοδομής E_1 (MPa)	5250
Μέτρο διάτμησης λιθοδομής G_1 (MPa)	2100
Μέση θλιπτική αντοχή αργολιθοδομής f_{wc2} (MPa) (STONE BROWN)	4.75
Μέτρο ελαστικότητας λιθοδομής E_2 (MPa)	4750
Μέτρο διάτμησης λιθοδομής G_2 (MPa)	1900
Μέση θλιπτική αντοχή οπτοπλινθοδομής f_{wc3} (MPa) (STONE RED)	3.40
Μέτρο ελαστικότητας λιθοδομής E_3 (MPa)	3400
Μέτρο διάτμησης λιθοδομής G_3 (MPa)	1360

Πίνακας 2. Υφιστάμενες μέσες αντοχές λιθοδομής

Συγκεντρωτικές αντοχές ελέγχου

Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι αντοχές με τις οποίες θα γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι επάρκειας. Η Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων είναι «υψηλή». Οι αντοχές αυτές αφορούν χαρακτηριστικές τιμές και προκύπτουν από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{wd} = \frac{f_{wc}(1 - S)}{\gamma_{m, \delta v n}}$$

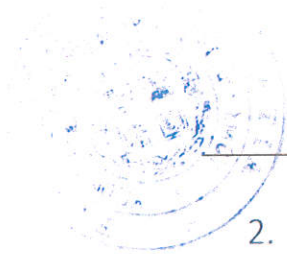
Όπου:

f_{wd}	χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή λιθοδομής
f_{wc}	μέση θλιπτική αντοχή λιθοδομής
S	Ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή για Σ.Α.Δ. «υψηλή» σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ
$\gamma_{m, \delta v n} = 1.20$	συντελεστής εμπιστοσύνης για έλεγχο δυνάμεων σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ και Σ.Α.Δ. «υψηλή»

Το μέτρο ελαστικότητας και μέτρο διάτμησης παραμένουν τα ίδια ενώ για τις ελαστικές αναλύσεις και τους ελέγχους των τάσεων, υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές αντοχές σε όρους δυνάμεων.

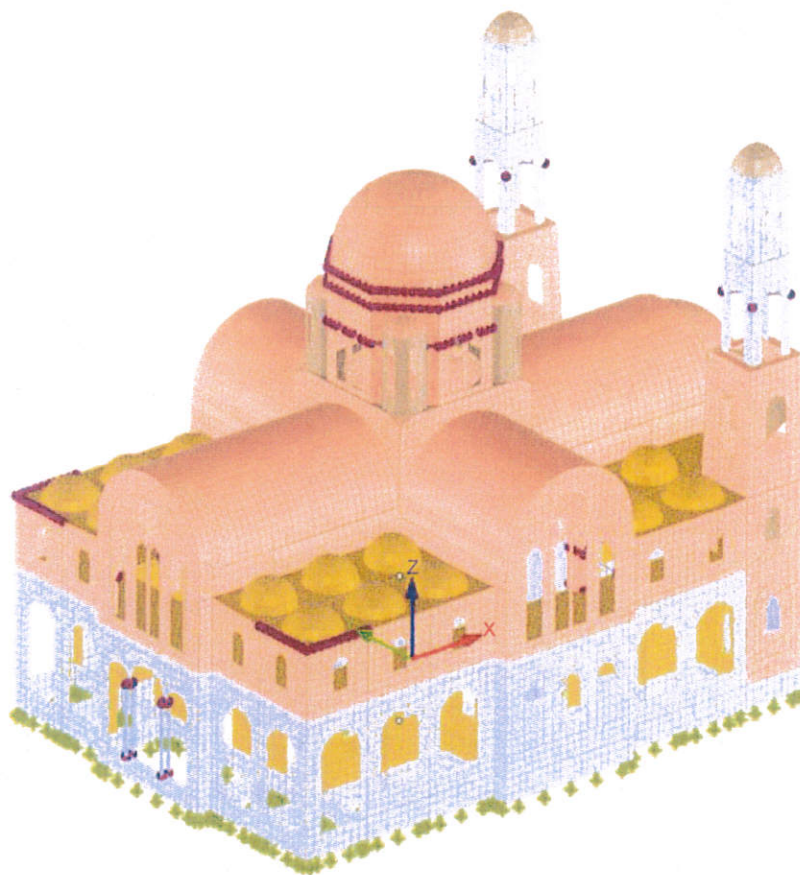
Είδος	Τιμή
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή ελέγχου λιθοδομής λαξευτών λίθων f_{wd1} (MPa)	3,50
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή ελέγχου αργολιθοδομής f_{wd2} (MPa)	3,17
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή ελέγχου οπτοπλινθοδομής f_{wd3} (MPa)	2,27
Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή ελέγχου λιθοδομής f_{wt} (MPa)	0,13

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές αντοχές ελέγχου δυνάμεων και τάσεων λιθοδομής



2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ – ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Για την προσομοίωση και επίλυση του φέροντος οργανισμού του φορέας έγινε χρήση του λογισμικού RFEM. Το λογισμικό εμπεριέχει μεταξύ άλλων στοιχεία δοκού με 12 βαθμούς ελευθερίας ανά στοιχείο (6 ανά κόμβο) και δισδιάστατα στοιχεία κελύφους με 6 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Με αυτό τον τρόπο η συμβατότητα μεταξύ των στοιχείων δοκού και των επιφανειακών στοιχείων εξασφαλίζεται. Τα δισδιάστατα στοιχεία βασίζονται στη θεωρία Mindlin/Reissner και είναι MITC4 στοιχεία (Mixed Interpolation of Tensorial Components όπως αναπτύχθηκαν από τους Bathe και Dvorkin ^[1]).



Εικόνα 2. Υπολογιστικό προσομοίωμα φέροντος οργανισμού του Ιερού Ναού.



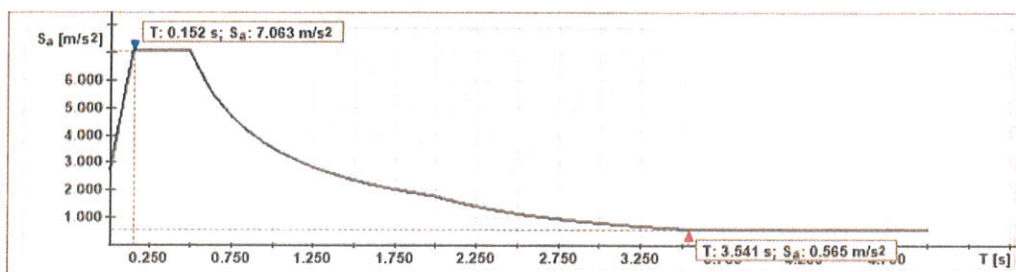
Κανονιστικό πλαίσιο – αναλύσεις

Η ανάλυση που εκτελέστηκε είναι η ελαστική δυναμική φασματική ανάλυση με το φάσμα απόκρισης του Ευρωκώδικα 8-1. Ο Ναός ελέγχεται στη στάθμη επιτελεστικότητας B1 (ΚΑΔΕΤ Παράρτημα 2.1):

- B1: Αποφυγή σημαντικών βλαβών για το σεισμό σχεδιασμού με πιθανότητα εμφάνισης 10% στα 50 χρόνια.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς q επιλέγεται από την §4.6.2 του ΚΑΔΕΤ για άοπλη τοιχοποιία με βλάβες και ισούται με 1.2 για τη στάθμη επιτελεστικότητας B1.

Το φάσμα απόκρισης για τις οριζόντιες μετακινήσεις είναι το φάσμα απόκρισης του κανονισμού για σεισμική ζώνη II και κατηγορία εδάφους Β. Ο συντελεστής σπουδαιότητας του Ναού είναι 1.2 για κατηγορία σπουδαιότητας Σ3.



Εικόνα 3. Φάσμα σχεδιασμού

Οι έλεγχοι επάρκειας πραγματοποιούνται τόσο σε όρους δυνάμεων αναφερόμενοι στους αντίστοιχους πεσσούς καθώς και σε όρους τάσεων μέσω του πολυπαραμετρικού κριτηρίου του Ottosen που έχει αποδειχθεί ικανό στην προσομοίωση άοπλης τοιχοποιίας ^[11].



Ιδιομορφική ανάλυση

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι ιδιομορφές του φορέα όπως προέκυψαν από τις επιλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό RFEM 5. Οι διατομές θεωρούνται για τις σεισμικές δράσεις ρηγματωμένες και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά απομειώνονται στο 50% των αρχικών δυσκαμψιών τους.



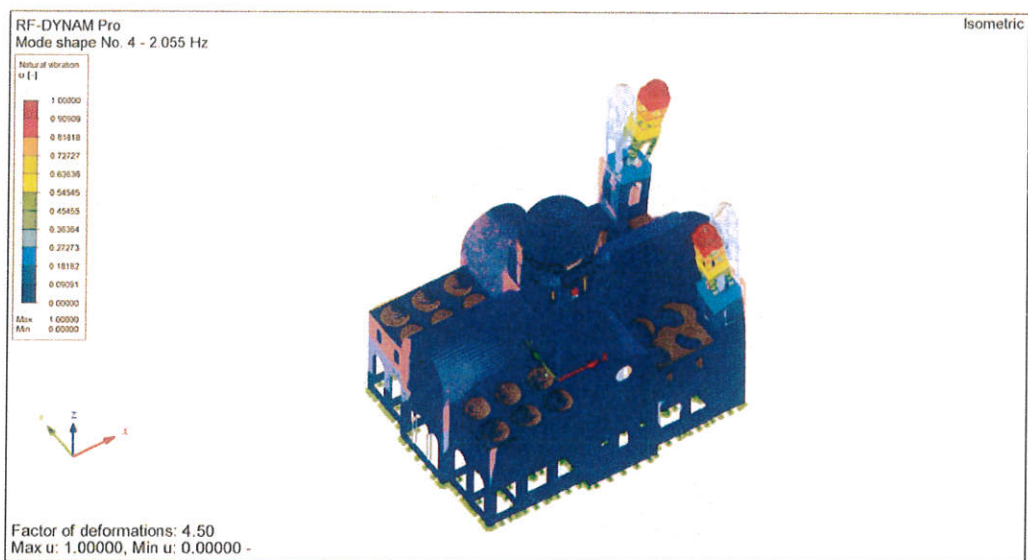
Εικόνα 4. 1^η ιδιομορφή.



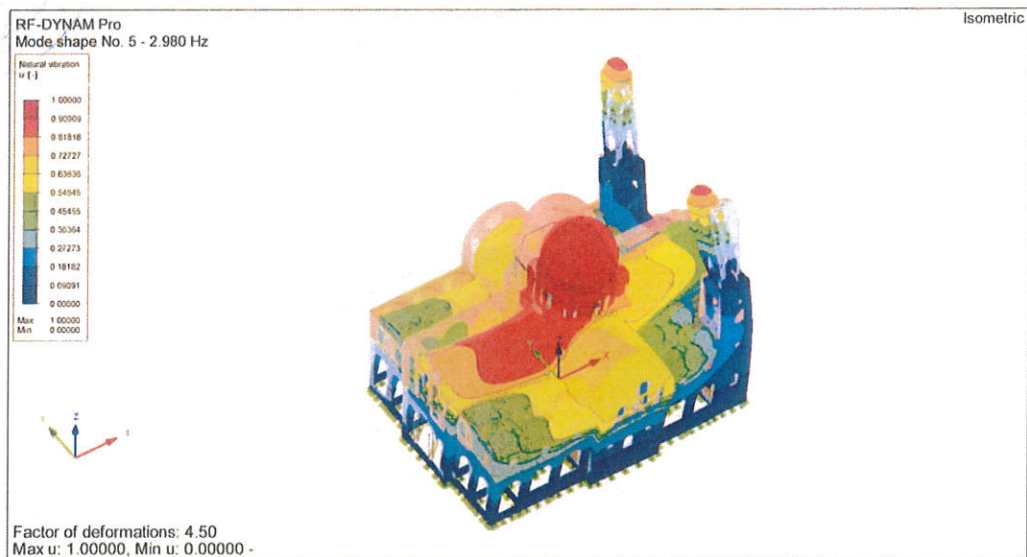
Εικόνα 5. 2^η ιδιομορφή.



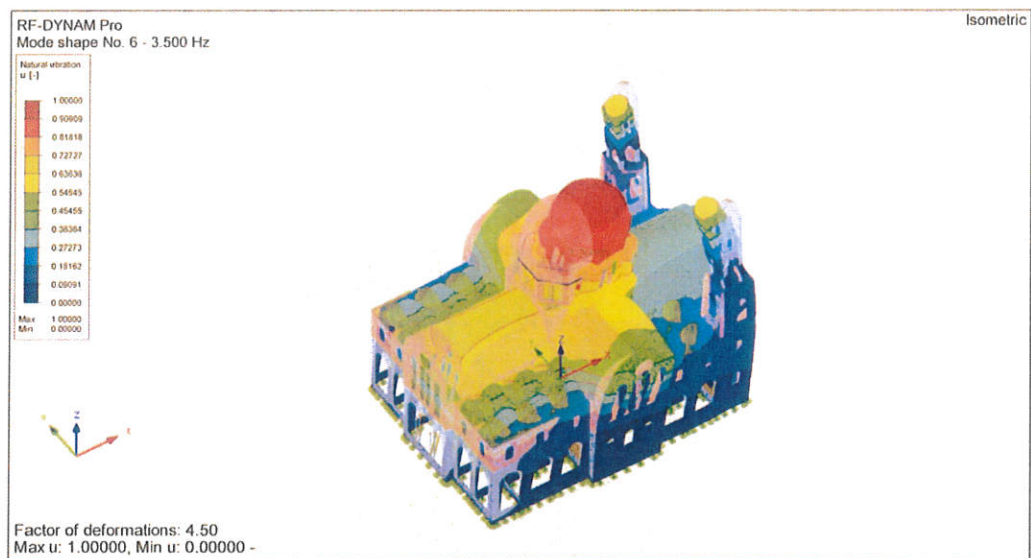
Εικόνα 6.3^η ιδιομορφή.



Εικόνα 7. 4^η ιδιομορφή.

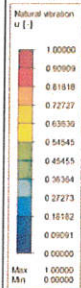


Εικόνα 8. 5^η ιδιομορφή.



Εικόνα 9. 6^η ιδιομορφή.

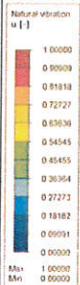
RF-DYNAM Pro
Mode shape No. 7 - 4.117 Hz



Factor of deformations: 4.50
Max u: 1.00000, Min u: 0.00000 -

Εικόνα 10. 7^η ιδιομορφή.

RF-DYNAM Pro
Mode shape No. 8 - 4.183 Hz

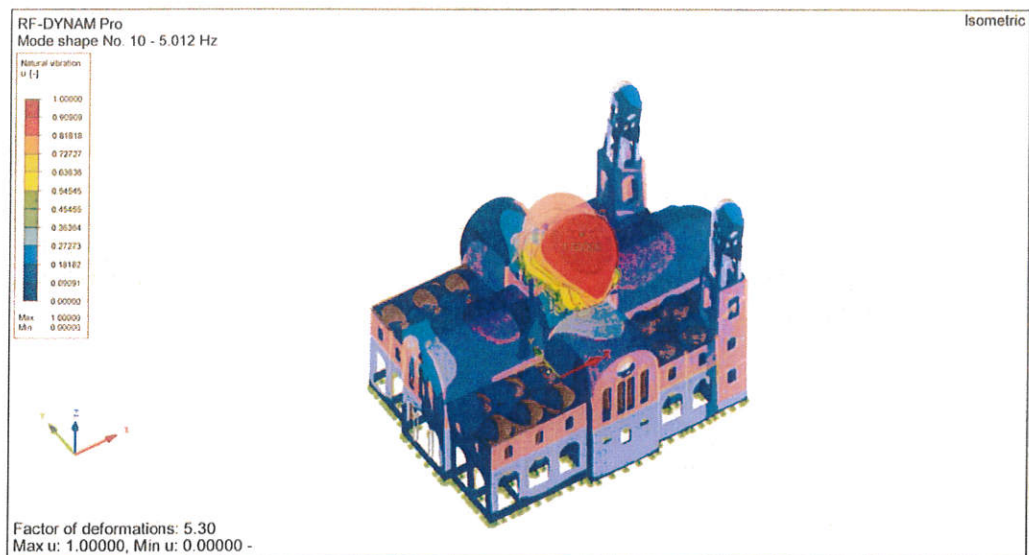


Factor of deformations: 5.30
Max u: 1.00000, Min u: 0.00000 -

Εικόνα 11. 8^η ιδιομορφή.



Εικόνα 12. 9^η ιδιομορφή.



Εικόνα 13. 10^η ιδιομορφή.



Ιδιομορφή	Τιμή ιδιοπεριόδου ανάλυσης (sec)	Είδος
1	0,552	Μεταφορική Καμπαναριό Βόρειο
2	0,552	Μεταφορική Καμπαναριό Νότιο
3	0,489	Μεταφορική και τα δύο καμπαναριά συγχρονισμένα
4	0,487	Μεταφορική και τα δύο καμπαναριά με διαφορά φάσης
5	0,336	Μεταφορική Βοράς - Νότος του Ναού
6	0,286	Μεταφορική Ανατολή - Δύση του Ναού
7	0,243	Μεταφορική συμμετρική Βοράς Νότος
8	0,239	Στροφική Ναός
9	0,216	Μεταφορική τρούλος Ανατολή - Δύση
10	0,200	Μεταφορική τρούλος Βοράς - Νότος

Πίνακας 4. Περιγραφή ιδιομορφών.

Παρατηρούμε ότι οι ιδιομορφές με τις μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους είναι αυτές των καμπαναριών του Ναού. Οι 2 πρώτες είναι μεταφορικές κατά τη διαγώνια έννοια των αξόνων Βορά - Νότου, Ανατολής - Δύσης. Οι 2 επόμενες αφορούν τη συγχρονισμένη ταλάντωση των δύο καμπαναριών και την ταλάντωση με διαφορά φάσης. Η 5^η ιδιομορφή είναι μεταφορική στην κατεύθυνση Βοράς - Νότος και αφορά το σύνολο του Ιερού Ναού και έχει το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής ιδιομορφικής μάζας 52,3% σε αυτή τη κατεύθυνση. Η 6^η ιδιομορφή είναι μεταφορική στην κατεύθυνση Ανατολή - Δύση και αφορά το σύνολο του Ιερού Ναού και έχει το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής ιδιομορφικής μάζας 47,1% σε αυτή τη κατεύθυνση. Τέλος η 8^η ιδιομορφή είναι στροφική και αφορά το σύνολο του Ιερού Ναού ενώ οι δύο επόμενες είναι οι ιδιομορφές που αφορούν την ταλάντωση του τρούλου στις δύο διευθύνσεις.



Πίνακας ιδιομορφών.

Mode No.	Eigenvalue λ [1/s ²]	Angular Frequency ω [rad/s]	Natural frequency f [Hz]	Natural period T [s]
1	129,541	11,382	1,811	0,552
2	129,563	11,383	1,812	0,552
3	164,939	12,843	2,044	0,489
4	166,743	12,913	2,055	0,487
5	350,697	18,727	2,980	0,336
6	483,641	21,992	3,500	0,286
7	668,995	25,865	4,117	0,243
8	690,656	26,280	4,183	0,239
9	842,941	29,033	4,621	0,216
10	991,681	31,491	5,012	0,200
11	1002,194	31,657	5,038	0,198
12	1146,465	33,859	5,389	0,186
13	1327,185	36,431	5,798	0,172
14	1430,984	37,828	6,021	0,166
15	1466,169	38,291	6,094	0,164
16	1479,180	38,460	6,121	0,163
17	1586,165	39,827	6,339	0,158
18	1635,564	40,442	6,437	0,155
19	1727,780	41,567	6,616	0,151
20	2177,989	46,669	7,428	0,135
21	2259,667	47,536	7,566	0,132
22	2363,268	48,613	7,737	0,129
23	2406,847	49,060	7,808	0,128
24	2418,211	49,175	7,826	0,128
25	2657,339	51,549	8,204	0,122
26	2765,512	52,588	8,370	0,119
27	2948,094	54,296	8,642	0,116
28	3110,866	55,775	8,877	0,113
29	3179,449	56,387	8,974	0,111
30	3243,987	56,956	9,065	0,110
31	3369,302	58,046	9,238	0,108
32	3373,606	58,083	9,244	0,108
33	3504,619	59,200	9,422	0,106
34	3548,132	59,566	9,480	0,105
35	3633,032	60,275	9,593	0,104
36	3646,601	60,387	9,611	0,104



37	3719,558	60,988	9,707	
38	3972,659	63,029	10,031	
39	4005,821	63,292	10,073	
40	4094,257	63,986	10,184	0,098
41	4163,932	64,529	10,270	0,097
42	4351,859	65,969	10,499	0,095
43	4358,832	66,021	10,508	0,095
44	4426,759	66,534	10,589	0,094
45	4969,865	70,497	11,220	0,089
46	5016,537	70,828	11,273	0,089
47	5026,980	70,901	11,284	0,089
48	5073,292	71,227	11,336	0,088
49	5108,796	71,476	11,376	0,088
50	5129,840	71,623	11,399	0,088
51	5329,740	73,005	11,619	0,086
52	5438,359	73,745	11,737	0,085
53	5583,614	74,724	11,893	0,084
54	5620,747	74,972	11,932	0,084
55	5628,473	75,023	11,940	0,084
56	5844,667	76,450	12,167	0,082
57	5854,446	76,514	12,178	0,082
58	5990,144	77,396	12,318	0,081
59	6007,966	77,511	12,336	0,081
60	6065,161	77,879	12,395	0,081
61	6195,560	78,712	12,527	0,080
62	6273,791	79,207	12,606	0,079
63	6284,845	79,277	12,617	0,079
64	6357,051	79,731	12,690	0,079
65	6565,065	81,025	12,896	0,078
66	6753,657	82,181	13,079	0,076
67	6754,845	82,188	13,081	0,076
68	6835,649	82,678	13,159	0,076
69	6978,083	83,535	13,295	0,075
70	6980,000	83,546	13,297	0,075
71	7142,097	84,511	13,450	0,074
72	7386,025	85,942	13,678	0,073
73	7447,362	86,298	13,735	0,073
74	7566,001	86,983	13,844	0,072
75	7730,543	87,924	13,993	0,071
76	7758,062	88,080	14,018	0,071
77	8006,562	89,479	14,241	0,070

78	8095,072	89,973	14,320	0,070
79	8153,213	90,295	14,371	0,070
80	8279,567	90,992	14,482	0,069
81	8402,649	91,666	14,589	0,069
82	8583,056	92,645	14,745	0,068
83	8682,604	93,180	14,830	0,067
84	8759,905	93,594	14,896	0,067
85	8769,943	93,648	14,905	0,067
86	8814,579	93,886	14,942	0,067
87	8897,979	94,329	15,013	0,067
88	9046,701	95,114	15,138	0,066
89	9145,036	95,630	15,220	0,066
90	9159,649	95,706	15,232	0,066
91	9179,690	95,811	15,249	0,066
92	9220,430	96,023	15,283	0,065
93	9324,306	96,562	15,368	0,065
94	9331,663	96,601	15,374	0,065
95	9427,100	97,093	15,453	0,065
96	9638,806	98,177	15,625	0,064
97	9785,992	98,924	15,744	0,064
98	9816,530	99,078	15,769	0,063
99	9934,420	99,672	15,863	0,063
100	9967,968	99,840	15,890	0,063

Πίνακας 5. 100 πρώτες ιδιομορφές φορέα.

Δρώσεις ιδιομορφικές μάζες.

Mode No.	Modal Mass M_i [kg]	Effective Modal Mass			Effective Modal Mass Factor		
		m_{ex} [kg]	m_{ey} [kg]	m_{ez} [kg]	f_{mex} [-]	f_{mey} [-]	f_{mez} [-]
1	128329,83	336582,44	548475,60	1052,87	0,032	0,052	0,000
2	128806,64	166707,98	1108123,76	518,48	0,016	0,105	0,000
3	210406,18	775221,25	7,95	276,94	0,074	0,000	0,000
4	207465,71	42,41	181587,20	0,01	0,000	0,017	0,000
5	2023135,01	0,16	5496442,03	0,00	0,000	0,523	0,000
6	1224109,40	4951318,15	0,11	72,40	0,471	0,000	0,000
7	1921099,55	412146,63	0,39	11605,76	0,039	0,000	0,001
8	1788956,21	0,05	32641,21	0,01	0,000	0,003	0,000
9	764202,29	147325,72	0,31	15907,25	0,014	0,000	0,002
10	273844,54	2,20	305223,88	0,69	0,000	0,029	0,000
11	678626,71	194494,84	4,09	43036,82	0,019	0,000	0,004
12	749277,37	0,47	15699,94	0,04	0,000	0,001	0,000



13	860569,56	7367,97	0,85	36472,06	0,001	0,000	0,003
14	372502,58	0,84	402696,97	0,09	0,000	0,038	0,000
15	223193,76	105028,77	1,60	16,85	0,010	0,000	0,000
16	326670,85	0,01	135055,83	0,07	0,000	0,013	0,000
17	1174111,92	0,01	81950,81	0,04	0,000	0,008	0,000
18	484678,14	0,20	102135,39	0,00	0,000	0,010	0,000
19	372679,03	340931,12	0,21	374,72	0,032	0,000	0,000
20	859935,75	0,02	102248,48	0,08	0,000	0,010	0,000
21	423792,66	1888,02	0,05	72170,30	0,000	0,000	0,007
22	874130,95	1,94	626,51	0,44	0,000	0,000	0,000
23	322679,89	109333,08	207,65	38811,96	0,010	0,000	0,004
24	517733,65	117,57	193169,66	43,21	0,000	0,018	0,000
25	285300,99	6,37	0,15	65890,09	0,000	0,000	0,006
26	346144,63	0,31	103720,99	0,07	0,000	0,010	0,000
27	38723,64	57110,63	0,01	6534,86	0,005	0,000	0,001
28	141668,23	0,39	100613,67	0,79	0,000	0,010	0,000
29	113144,55	274629,41	0,20	147066,69	0,026	0,000	0,014
30	98477,92	23876,06	0,18	7923,77	0,002	0,000	0,001
31	54865,67	181810,05	18,81	7,88	0,017	0,000	0,000
32	274394,82	33,44	106192,42	0,71	0,000	0,010	0,000
33	40528,66	0,04	373,88	0,09	0,000	0,000	0,000
34	56452,35	1781,12	2,54	96654,39	0,000	0,000	0,009
35	455535,52	575330,07	110,35	30085,63	0,055	0,000	0,003
36	673298,38	355,08	182903,32	5,38	0,000	0,017	0,000
37	278180,47	2074,04	2,04	813902,01	0,000	0,000	0,077
38	436269,44	9,64	164943,94	34,72	0,000	0,016	0,000
39	694703,94	54091,39	27,56	175014,68	0,005	0,000	0,017
40	522809,67	0,38	57656,64	0,04	0,000	0,005	0,000
41	615280,53	3069,31	0,12	3593,60	0,000	0,000	0,000
42	473133,56	2072,16	48,52	234,66	0,000	0,000	0,000
43	511569,99	2,82	23295,78	0,09	0,000	0,002	0,000
44	480623,15	0,74	10542,23	0,17	0,000	0,001	0,000
45	47398,11	80987,09	3,87	15,07	0,008	0,000	0,000
46	126586,94	165,41	2127,92	2300,31	0,000	0,000	0,000
47	285306,47	5107,14	14,84	201737,23	0,000	0,000	0,019
48	369905,77	434,52	10,10	1424616,68	0,000	0,000	0,136
49	68074,03	8,45	2680,91	1217,84	0,000	0,000	0,000
50	331896,74	0,03	13964,49	2,92	0,000	0,001	0,000
51	363842,45	0,10	58756,73	2,11	0,000	0,006	0,000
52	276187,71	31927,05	1,31	103656,40	0,003	0,000	0,010
53	358630,21	1,04	12703,93	0,64	0,000	0,001	0,000



54	340301,54	0,00	15834,11	0,36	0,000	0,002	0,000
55	302606,29	24,06	0,07	81250,15	0,000	0,000	0,008
56	615531,23	0,02	13801,27	0,48	0,000	0,001	0,000
57	575173,56	11258,65	0,00	67247,60	0,001	0,000	0,006
58	435586,30	37,18	800,87	398,25	0,000	0,000	0,000
59	592755,16	30679,95	1,15	320207,45	0,003	0,000	0,030
60	516301,81	123823,09	0,00	2807,37	0,012	0,000	0,000
61	38583,44	0,04	8348,57	0,49	0,000	0,001	0,000
62	24852,25	0,00	3304,60	0,70	0,000	0,000	0,000
63	28445,98	204,04	0,31	30289,41	0,000	0,000	0,003
64	39048,61	0,02	7437,85	0,21	0,000	0,001	0,000
65	120786,56	1755,50	0,06	225202,01	0,000	0,000	0,021
66	266868,03	454,84	1659,08	19209,53	0,000	0,000	0,002
67	218494,39	172,04	5004,10	6155,83	0,000	0,000	0,001
68	192067,21	0,22	1235,89	0,00	0,000	0,000	0,000
69	251215,86	358,28	5066,43	1113,24	0,000	0,000	0,000
70	94743,05	30069,02	55,10	90677,69	0,003	0,000	0,009
71	278917,11	0,01	5537,02	0,59	0,000	0,001	0,000
72	311424,28	49239,62	0,03	8763,51	0,005	0,000	0,001
73	286682,73	651,66	0,02	35764,76	0,000	0,000	0,003
74	143890,71	0,08	211,67	0,01	0,000	0,000	0,000
75	329674,74	102323,94	0,00	41275,19	0,010	0,000	0,004
76	106985,91	3,67	308,92	1,14	0,000	0,000	0,000
77	515190,47	2,49	5151,24	10,15	0,000	0,000	0,000
78	145856,79	18,26	1,23	41718,19	0,000	0,000	0,004
79	132867,26	19,74	0,16	413546,97	0,000	0,000	0,039
80	111802,60	0,16	3157,94	0,08	0,000	0,000	0,000
81	405632,93	76514,07	0,02	4860,37	0,007	0,000	0,000
82	802424,05	0,00	3798,37	0,00	0,000	0,000	0,000
83	58818,94	10213,90	0,02	4299,22	0,001	0,000	0,000
84	128520,52	4,98	5261,70	4777,61	0,000	0,001	0,000
85	187476,37	500,33	94,48	312790,03	0,000	0,000	0,030
86	535382,94	18112,32	0,57	326593,89	0,002	0,000	0,031
87	15372,26	0,09	18321,44	1,43	0,000	0,002	0,000
88	199301,73	19349,38	0,15	71199,00	0,002	0,000	0,007
89	3276,61	2,26	0,07	1458,15	0,000	0,000	0,000
90	15816,61	1620,88	0,65	32509,89	0,000	0,000	0,003
91	6315,89	0,85	8172,02	4,68	0,000	0,001	0,000
92	7689,63	0,07	270,61	0,83	0,000	0,000	0,000
93	46517,23	11,25	608,94	28,22	0,000	0,000	0,000
94	152370,53	8438,92	2,76	18935,90	0,001	0,000	0,002



95	168536,43	0,00	11263,62	0,04	0,000	0,001	0,000
96	91380,60	0,12	8551,57	0,00	0,000	0,001	0,000
97	17213,53	0,21	1194,02	133,56	0,000	0,000	0,000
98	161102,94	492,20	0,30	184411,61	0,000	0,000	0,018
99	30449,03	0,06	6815,92	0,06	0,000	0,001	0,000
100	271891,53	1028,75	0,38	10311,60	0,000	0,000	0,001
Sum	36052016,89	9330783,35	9688293,25	5658818,04	0,888	0,922	0,539

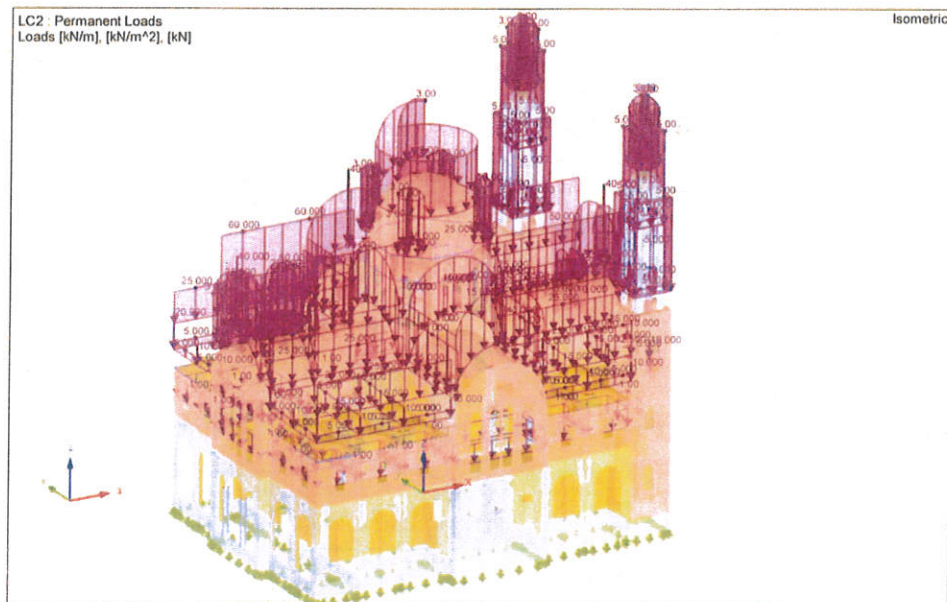
Πίνακας 6. Δρώσεις μάζες ανά διεύθυνση και ιδιομορφή φορέα.



Φορτίσεις

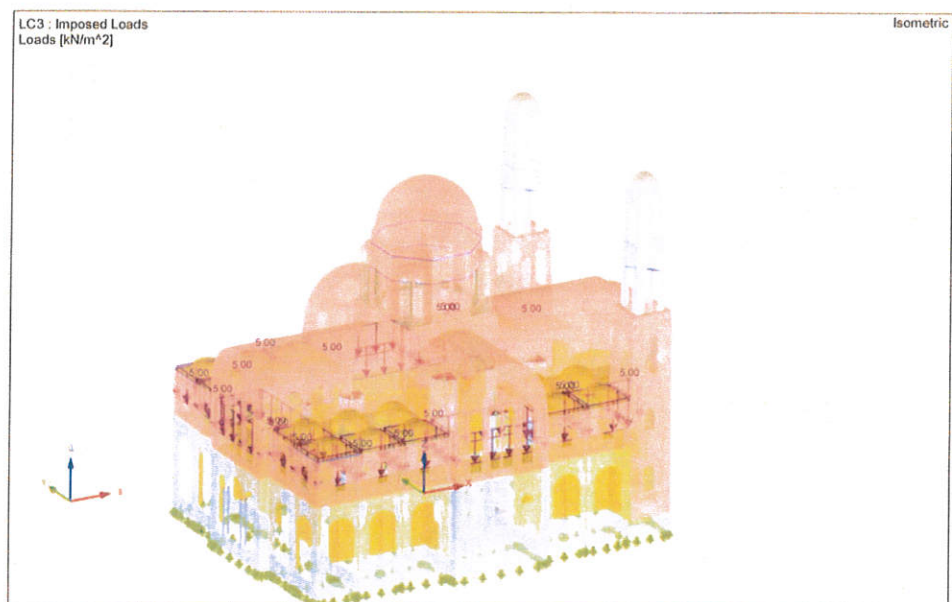
Φόρτιση 1: Ίδιο βάρος (LC1)

Φόρτιση 2: Μόνιμα φορτία (LC2)



Εικόνα 14. Μόνιμα φορτία Ναού.

Φόρτιση 3: Κινητά φορτία (LC3)



Εικόνα 15. Κινητά φορτία.

Φόρτιση 4: Χιόνι (LC4)

LC4 : Snow
Loads [kN/m²]



Εικόνα 16. Φορτία χιονιού.

Φορτίσεις 5-...

Ισοδύναμα στατικά φορτία για κάθε ιδιομορφή από τη φασματική ανάλυση.



Συνδυασμοί φορτίσεων

2.5 Load Combinations

Load Combin	DS	Load Combination Description	No.	Factor	Load Case
CO1	STR	1.35G	1	1.35	LC1 Self-weight
CO2	STR	1.35G + 1.35Gq	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.35	LC2 Permanent Loads
CO3	STR	1.35G + 1.5Q _i C	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.50	LC3 Imposed Loads
CO4	STR	1.35G + 1.35Gq + 1.5Q _i C	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.35	LC2 Permanent Loads
			3	1.50	LC3 Imposed Loads
CO5	STR	1.35G + 1.35Gq + 1.5Q _i C + 0.75Q _s	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.35	LC2 Permanent Loads
			3	1.50	LC3 Imposed Loads
			4	0.75	LC4 Snow
CO6	STR	1.35G + 1.5Q _i C + 0.75Q _s	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.50	LC3 Imposed Loads
			3	0.75	LC4 Snow
CO7	STR	1.35G + 1.5Q _s	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.50	LC4 Snow
CO8	STR	1.35G + 1.35Gq + 1.5Q _s	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.35	LC2 Permanent Loads
			3	1.50	LC4 Snow
CO9	STR	1.35G + 1.35Gq + 1.05Q _i C + 1.5Q _s	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.35	LC2 Permanent Loads
			3	1.05	LC3 Imposed Loads
			4	1.50	LC4 Snow
CO10	STR	1.35G + 1.05Q _i C + 1.5Q _s	1	1.35	LC1 Self-weight
			2	1.05	LC3 Imposed Loads
			3	1.50	LC4 Snow
CO11	S Ch	G	1	1.00	LC1 Self-weight
CO12	S Ch	G + Gq	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC2 Permanent Loads
CO13	S Ch	G + Q _i C	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC3 Imposed Loads
CO14	S Ch	G + Gq + Q _i C	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC2 Permanent Loads
			3	1.00	LC3 Imposed Loads
CO15	S Ch	G + Gq + Q _i C + 0.5Q _s	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC2 Permanent Loads
			3	1.00	LC3 Imposed Loads
			4	0.50	LC4 Snow
CO16	S Ch	G + Q _i C + 0.5Q _s	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC3 Imposed Loads
			3	0.50	LC4 Snow
CO17	S Ch	G + Q _s	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC4 Snow
CO18	S Ch	G + Gq + Q _s	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC2 Permanent Loads
			3	1.00	LC4 Snow
CO19	S Ch	G + Gq + 0.7Q _i C + Q _s	1	1.00	LC1 Self-weight
			2	1.00	LC2 Permanent Loads
			3	0.70	LC3 Imposed Loads
			4	1.00	LC4 Snow
CO20	S Ch	G + 0.7Q _i C + Q _s	1	1.00	LC1 Self-weight



2.5 Load Combinations

Load Combin	DS	Load Combination Description	No.	Factor	Load Case	
CO21	S Fr	G	2	0.70	LC3	Imposed Loads
			3	1.00	LC4	Snow
			1	1.00	LC1	Self-weight
CO22	S Fr	G + Gq	1	1.00	LC1	Self-weight
CO23	S Fr	G + 0.7Q _{iC}	2	1.00	LC2	Permanent Loads
			1	1.00	LC1	Self-weight
			2	0.70	LC3	Imposed Loads
CO24	S Fr	G + Gq + 0.7Q _{iC}	1	1.00	LC1	Self-weight
			2	1.00	LC2	Permanent Loads
			3	0.70	LC3	Imposed Loads
CO25	S Fr	G + 0.2Q _s	1	1.00	LC1	Self-weight
			2	0.20	LC4	Snow
			1	1.00	LC1	Self-weight
CO26	S Fr	G + Gq + 0.2Q _s	2	1.00	LC2	Permanent Loads
			3	0.20	LC4	Snow
			1	1.00	LC1	Self-weight
CO27	S Fr	G + Gq + 0.6Q _{iC} + 0.2Q _s	2	1.00	LC2	Permanent Loads
			3	0.60	LC3	Imposed Loads
			4	0.20	LC4	Snow
CO28	S Fr	G + 0.6Q _{iC} + 0.2Q _s	1	1.00	LC1	Self-weight
			2	0.60	LC3	Imposed Loads
			3	0.20	LC4	Snow
CO29	S Qp	G	1	1.00	LC1	Self-weight
CO30	S Qp	G + Gq	1	1.00	LC1	Self-weight
			2	1.00	LC2	Permanent Loads
			1	1.00	LC1	Self-weight
CO31	S Qp	G + Gq + 0.6Q _{iC}	2	1.00	LC2	Permanent Loads
			3	0.60	LC3	Imposed Loads
			1	1.00	LC1	Self-weight
CO32	S Qp	G + 0.6Q _{iC}	1	1.00	LC1	Self-weight
			2	0.60	LC3	Imposed Loads

Πίνακας 7. Συνδυασμοί φορτίσεων.

2.7 Result Combinations

Result Combin	Description	Loading
RC1	ULS (STR/GEO) - Permanent / transient - Eq. 6.10	CO1/p or to CO10
RC2	SLS - Characteristic	CO11/p or to CO20
RC3	SLS - Frequent	CO21/p or to CO28
RC4	SLS - Quasi-permanent	CO29/p or to CO32
RC5	DLC1 - Result Envelope - X	LC5/p + LC7/p + LC9/p + LC11/p + LC13/p + LC15/p + LC17/p + LC19/p + LC21/p + LC23/p + LC25/p + LC27/p + LC29/p + LC31/p + LC33/p + LC35/p + LC37/p + LC39/p
RC6	DLC1 - Result Envelope - Y	LC6/p + LC8/p + LC10/p + LC12/p + LC14/p + LC16/p + LC18/p + LC20/p + LC22/p + LC24/p + LC26/p + LC28/p + LC30/p + LC32/p + LC34/p + LC36/p + LC38/p + LC40/p
RC7	DLC1 - Result Envelope - 100% X/ 30% Y	RC5/p + 0.3*RC6/p
RC8	DLC1 - Result Envelope - 30% X/ 100% Y	0.3*RC5/p + RC6/p
RC9	FINAL 100% X/ 30% Y	CO31/p + RC5/p + 0.3*RC6/p
RC10	FINAL 30% X/ 100% Y	CO31/p + 0.3*RC5/p + RC6/p

Πίνακας 8. Περιβάλλουσες και σεισμικοί συνδυασμοί.

2.7.2 RC

Result Combin	DS	Result Combination Description	Calculation Parameters
RC5		DLC1 - Result Envelope - X	Options : x Quadratic combination: SRSS x Positive (max) / negative (min)
RC6		DLC1 - Result Envelope - Y	Options : x Quadratic combination: SRSS x Positive (max) / negative (min)

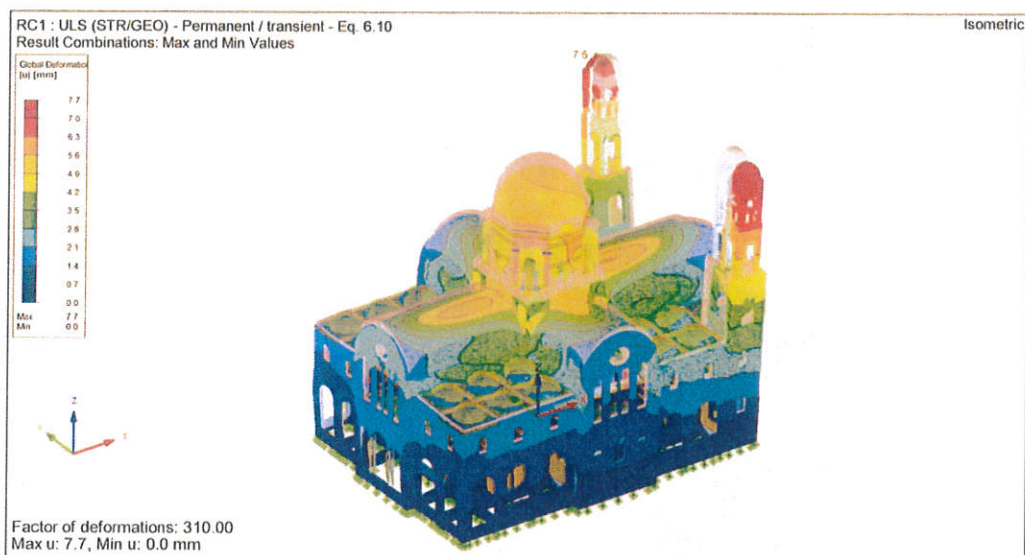
Πίνακας 9. Συνδυασμός με SRSS.

Αποτελέσματα ελέγχων υφιστάμενης κατάστασης

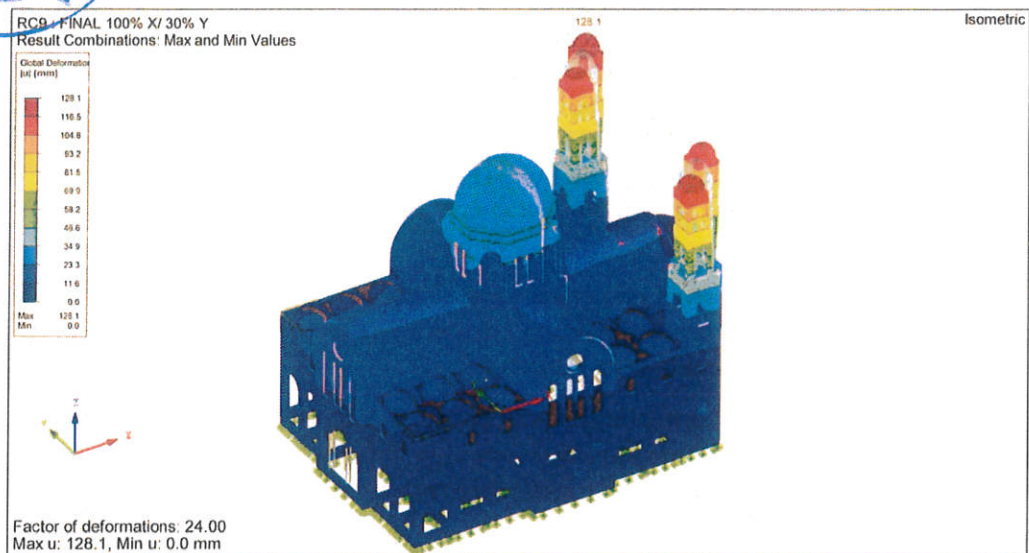
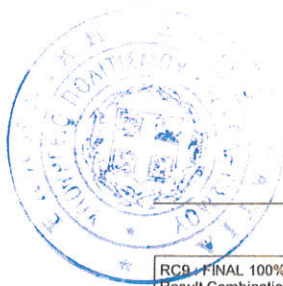
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των ελέγχων επάρκειας για τη τοιχοποιία του Ναού. Για το σκοπό αυτό μορφώνονται οι αντίστοιχοι πεσσοί και ελέγχονται σε διάφορες θέσεις σε επίπεδο δυνάμεων. Στις επιφάνειες του Ναού που δεν είναι δυνατή η διαμόρφωση πεσσών ο έλεγχος γίνεται σε όρους τάσεων μέσω του πολυπαραμετρικού κριτηρίου του Ottosen ^[11] που έχει αποδειχθεί ικανό στην προσομοίωση άοπλης τοιχοποιίας.

Ο έλεγχος των πεσσών γίνεται για το χωρικό συνδυασμό των συνιστωσών των σεισμικών δυνάμεων με επαλληλία 100% στη μία διεύθυνση και 30% στην κάθετη της. Ελέγχονται οι θέσεις σε όλους τους συνδυασμούς μεγίστων και ελαχίστων.

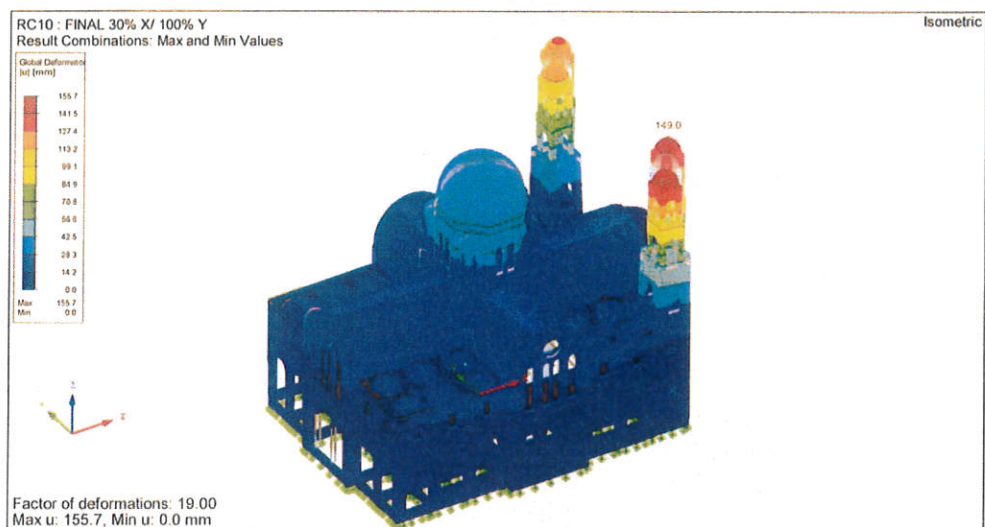
Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 18 και στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις για τους σεισμικούς συνδυασμούς κατά τις δύο διευθύνσεις. Όπως είναι αναμενόμενο οι μεγαλύτερες μετακινήσεις παρατηρούνται στα δύο καμπαναριά.



Εικόνα 17. Μετακινήσεις για τα στατικά φορτία στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.



Εικόνα 18. Μετακινήσεις για το σεισμικό συνδυασμό 100X – 30Y.

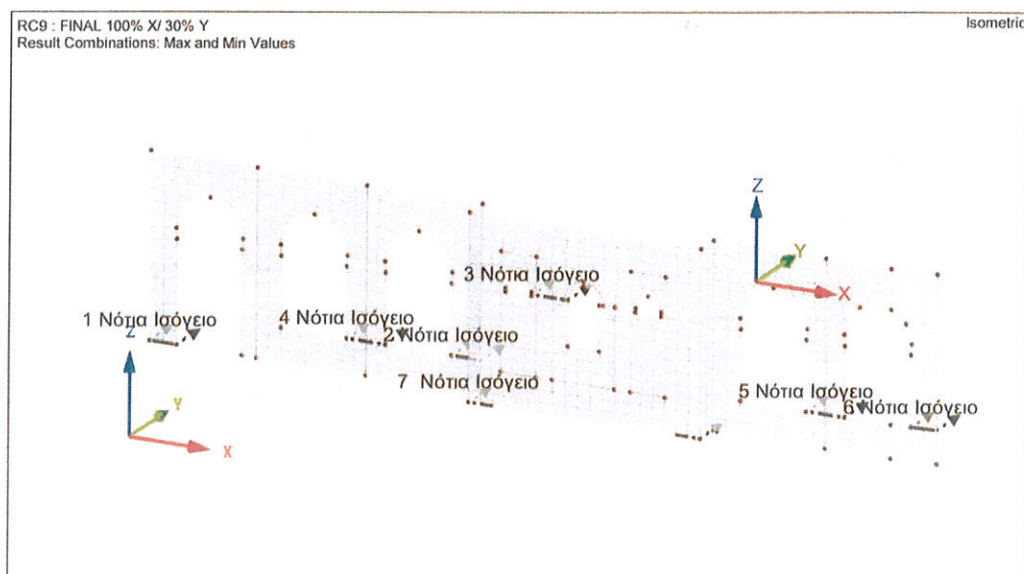


Εικόνα 19. Μετακινήσεις για το σεισμικό συνδυασμό 30X – 100Y.



Νότιος τοίχος Ισογείου

Αρχικά για το νότιο τοίχο παρουσιάζονται οι θέσεις ελέγχου των πεσσών και στη συνέχεια πίνακες με τα αποτελέσματα των ελέγχων και τους λόγους επάρκειας/ανεπάρκειας. Οι λόγοι μικρότεροι της μονάδας δηλώνουν επάρκεια ενώ λόγοι μεγαλύτεροι της μονάδας ανεπάρκεια.



Εικόνα 20. Θέσεις τομών ελέγχου πεσσών νότιου τοίχου.

Τα αποτελέσματα των πεσσών παρουσιάζονται συνοπτικά και συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα:

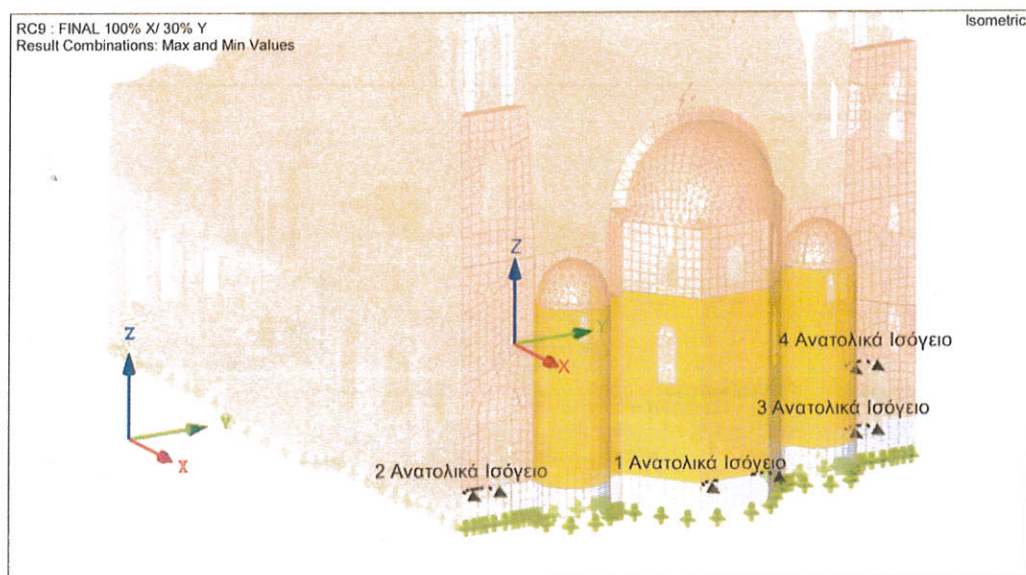
Αριθμός θέσης ελέγχου	Θέση ελέγχου	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εντός επιπέδου λ	Εντός επιπέδου έλεγχος από	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εκτός επιπέδου λ
1	κάτω	0.70	τέμνουσα	1.64
2	κάτω	1.19	τέμνουσα	0.55
3	πάνω	2.15	τέμνουσα	0.14
4	κάτω	1.10	κάμψη	0.66
5	κάτω	0.96	κάμψη	0.48
6	κάτω	1.20	τέμνουσα	0.43
7	κάτω	1.62	τέμνουσα	0.58

Πίνακας 10. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών νότιου τοίχου Ναού.



Ανατολικός τοίχος Ισογείου

Αντίστοιχα για το νότιο τοίχο του Ναού παρουσιάζονται οι θέσεις ελέγχου των πεσσών και στη συνέχεια πίνακες με τα αποτελέσματα και τους λόγους ανεπάρκειας.



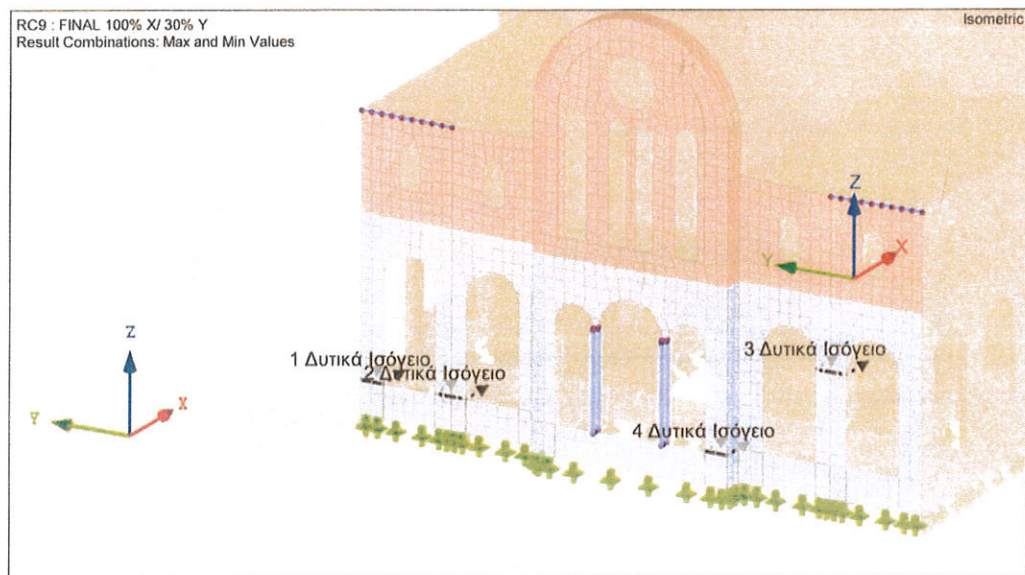
Εικόνα 21. Θέσεις τομών ελέγχου πεσσών ανατολικού τοίχου.

Αριθμός θέσης ελέγχου	Θέση ελέγχου	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εντός επιπέδου λ	Εντός επιπέδου έλεγχος από	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εκτός επιπέδου λ
1	κάτω	1.58	τέμνουσα	0.21
2	κάτω	0.90	κάμψη	0.26
3	κάτω	1.58	τέμνουσα	0.40
4	πάνω	1.31	τέμνουσα	0.25

Πίνακας 11. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών ανατολικού τοίχου Ναού.

Δυτικός τοίχος ισόγειο

Ομοίως για το δυτικό τοίχο του κυρίως Ναού στη στάθμη του ισογείου παρουσιάζονται οι θέσεις ελέγχου των πεσσών και στη συνέχεια πίνακες με τα αποτελέσματα των ελέγχων τους λόγους ανεπάρκειας.



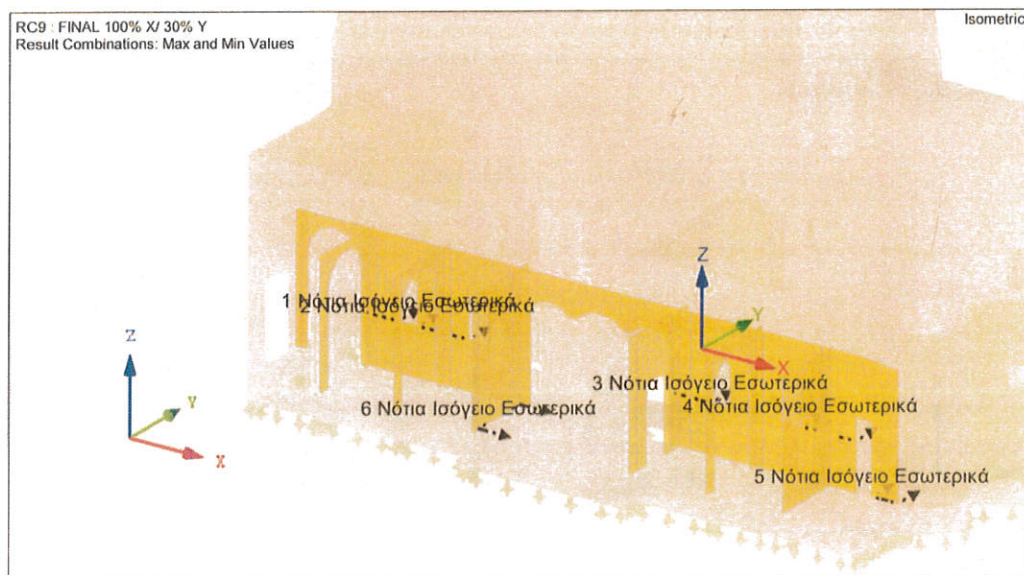
Εικόνα 22. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών δυτικού τοίχου Ναού.

Αριθμός θέσης ελέγχου	Θέση ελέγχου	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εντός επιπέδου λ	Εντός επιπέδου έλεγχος από	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εκτός επιπέδου λ
1	κάτω	1.96	κάμψη	0.78
2	κάτω	2.72	κάμψη	0.52
3	πάνω	1.45	κάμψη	0.08
4	κάτω	1.82	κάμψη	0.67

Πίνακας 12. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών δυτικού τοίχου Ναού.

Νότιος τοίχος εσωτερικός ισόγειου

Ομοίως για το νότιο εσωτερικό τοίχο του Ναού παρουσιάζονται οι θέσεις ελέγχου των πεσσών και στη συνέχεια πίνακας με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ελέγχων για τους λόγους ανεπάρκειας.

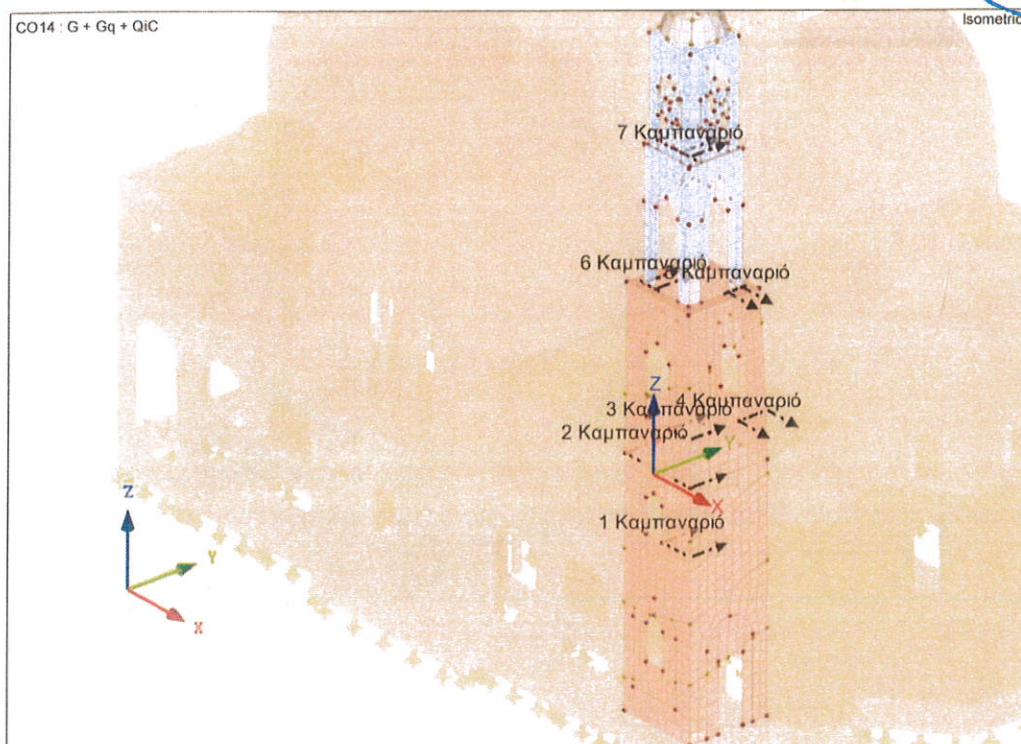


Εικόνα 23. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών δυτικού τοίχου γυναικωνίτη.

Αριθμός πεσσού	Θέση ελέγχου	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εντός επιπέδου λ	Εντός επιπέδου έλεγχος από	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εκτός επιπέδου λ
1	κάτω	1.87	τέμνουσα	0.19
2	κάτω	2.09	τέμνουσα	0.36
3	κάτω	1.68	τέμνουσα	0.06
4	κάτω	2.28	τέμνουσα	0.24
5	κάτω	1.26	τέμνουσα	0.80
6	κάτω	2.37	τέμνουσα	0.39

Πίνακας 13. Λόγοι ανεπάρκειας διατομών δυτικού τοίχου Ναού.

Καμπαναριά



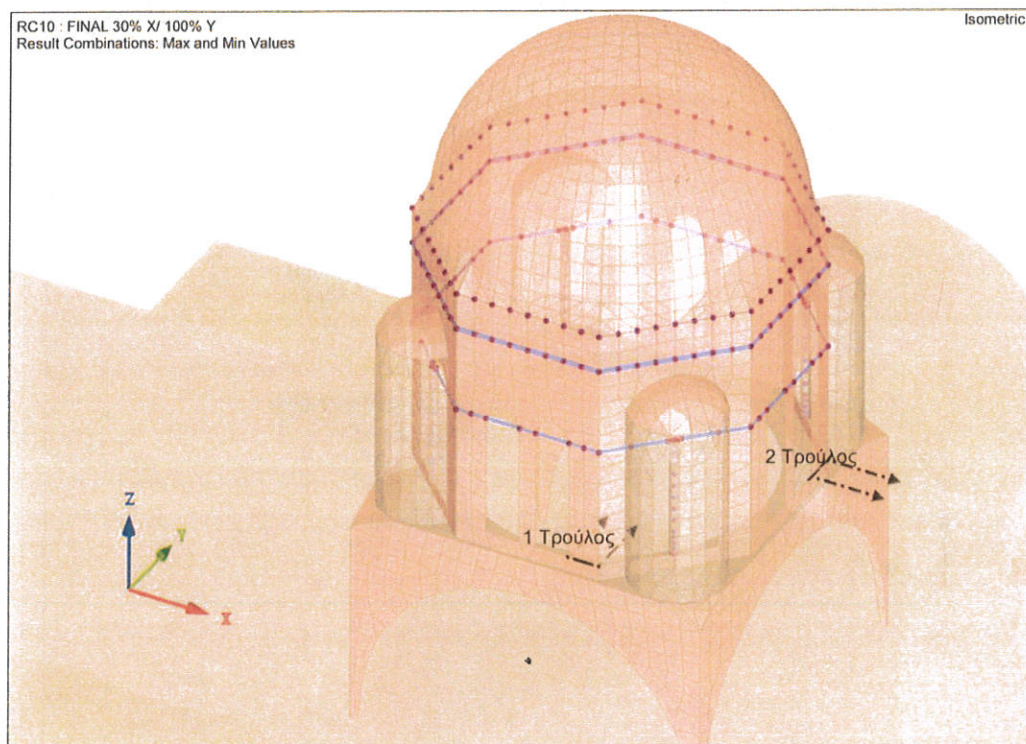
Εικόνα 26. Θέσεις και τιμές ελέγχου πεσσών γυναικωνίτη.

Αριθμός πεσσού	Θέση ελέγχου	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εντός επιπέδου λ	Εντός επιπέδου έλεγχος από	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εκτός επιπέδου λ
1	κάτω	0.61	τέμνουσα	0.60
2	κάτω	2.84	τέμνουσα	1.18
3	κάτω	0.94	κάμψη	1.51
4	κάτω	2.39	τέμνουσα	1.20
5	κάτω	1.83	κάμψη	3.42
6	κάτω	1.16	κάμψη	3.81
7	κάτω	2.23	τέμνουσα	2.39

Πίνακας 16. Λόγοι ανεπάρκειας υποστυλωμάτων προστώου.

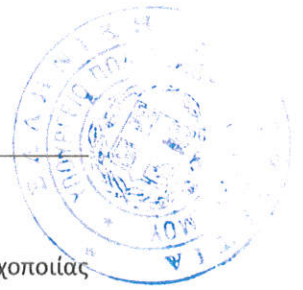


Κεντρικός τρούλος



Εικόνα 27. Θέσεις ελέγχου διατομών τρούλου.

Αριθμός πεσσού	Θέση ελέγχου	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εντός επιπέδου λ	Εντός επιπέδου έλεγχος από	Μέγιστος λόγος ανεπάρκειας εκτός επιπέδου λ
1	κάτω	1.81	τέμνουσα	2.05
2	κάτω	1.74	τέμνουσα	1.33

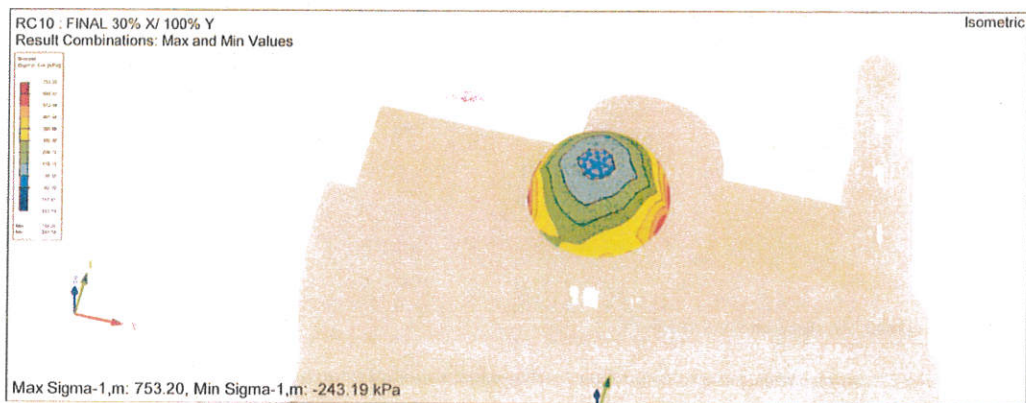


Έλεγχος με Ottosen

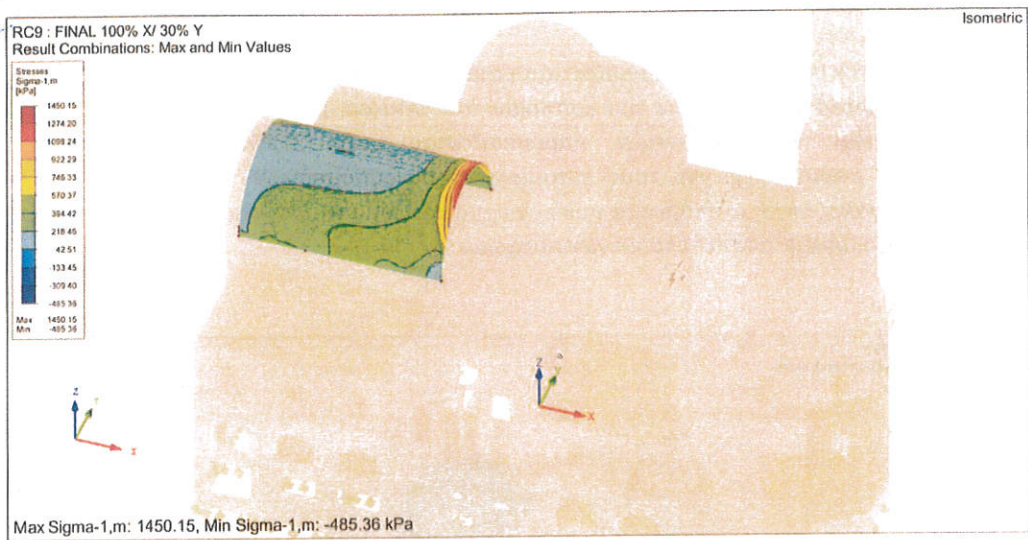
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων της τοιχοποιίας του Ναού σε επίπεδο τάσεων μέσω του κριτηρίου του Ottosen. Οι αναλυτικοί έλεγχοι στα επιμέρους σημεία των επιφανειών παρουσιάζονται στο ΤΕΥΧΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ. Παρουσιάζονται ανεπάρκειες για τους σεισμικούς συνδυασμούς. Σε ορισμένα σημεία παρατηρείται μεγάλος λόγος ανεπάρκειας που είναι αποτέλεσμα της συγκέντρωσης τάσεων στο αριθμητικό προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων.



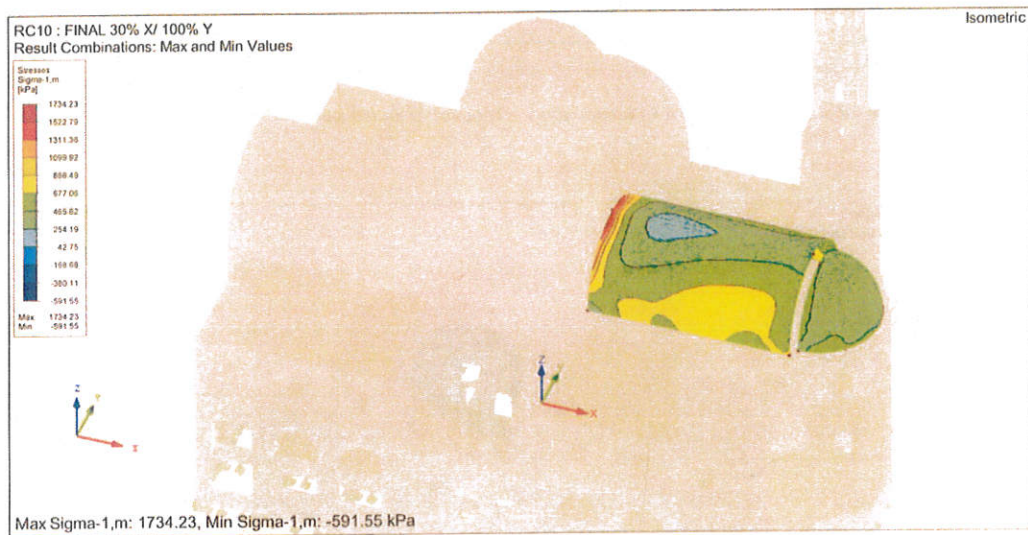
Εικόνα 28. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Τρούλος Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.



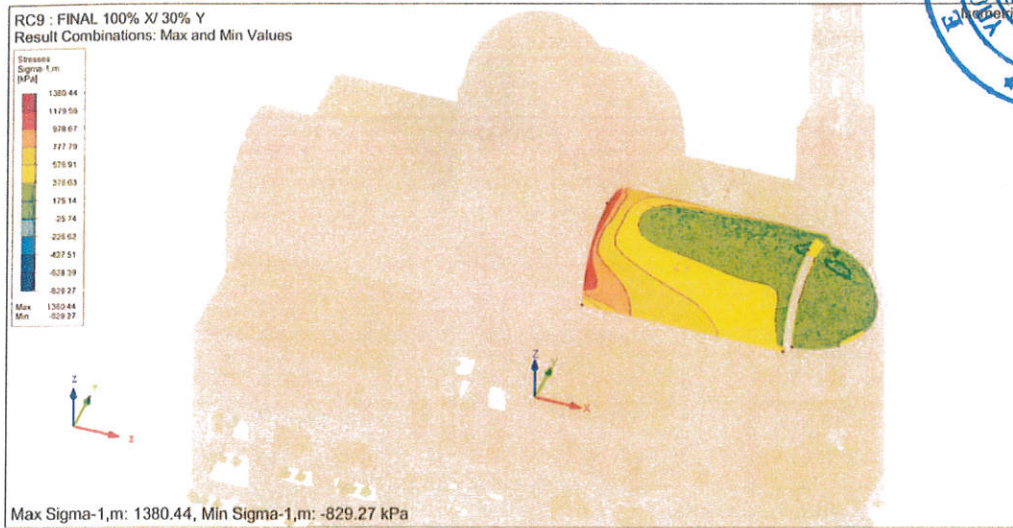
Εικόνα 29. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Τρούλος Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.



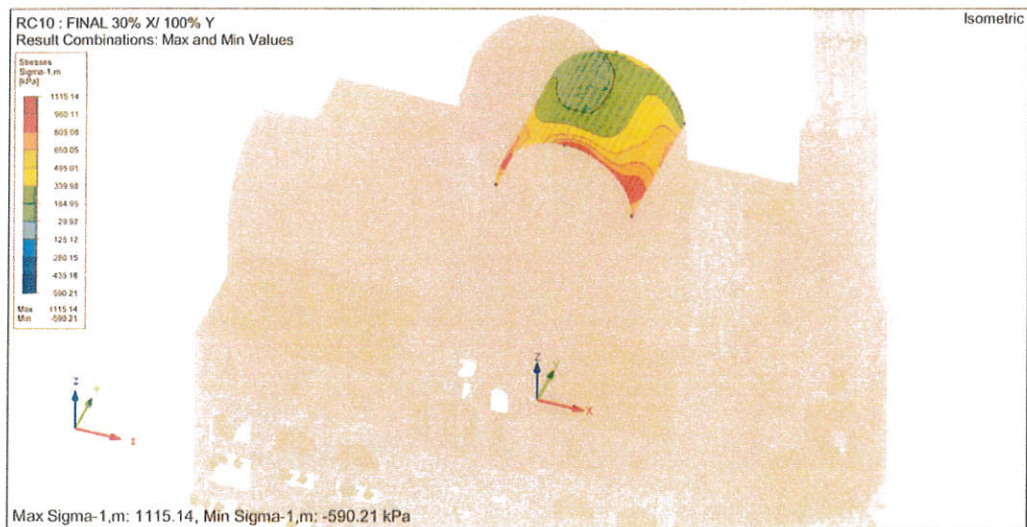
Εικόνα 30. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Δυτική καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.



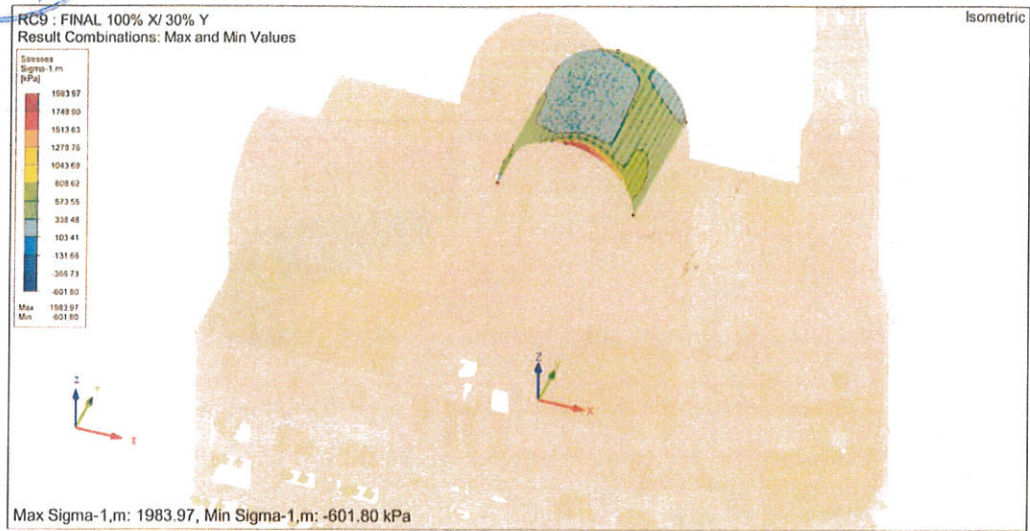
Εικόνα 31. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Ανατολική καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.



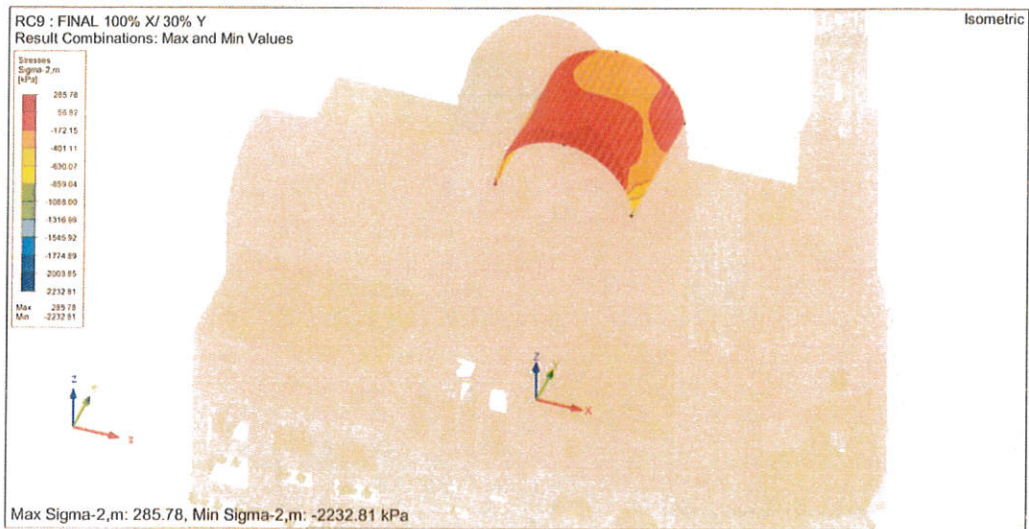
Εικόνα 32. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Ανατολική καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.



Εικόνα 33. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.

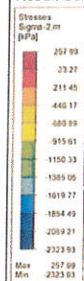


Εικόνα 34. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.



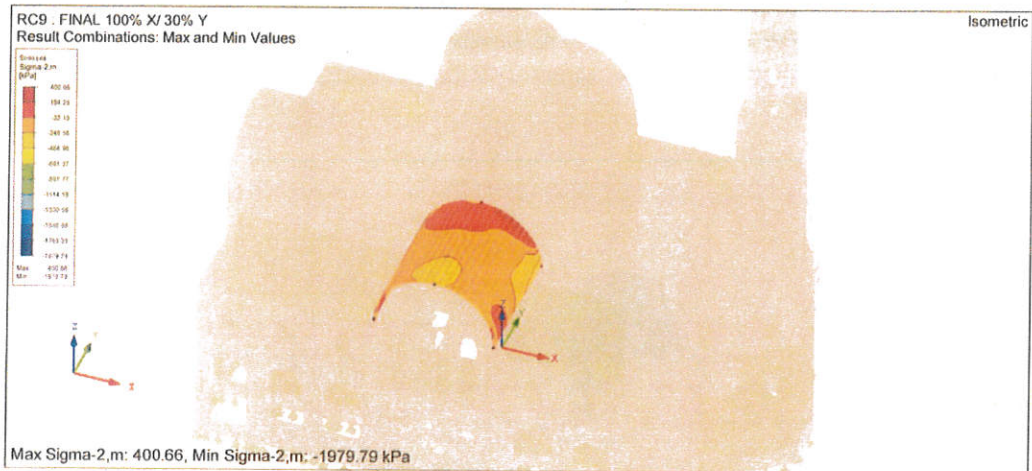
Εικόνα 35. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Βόρεια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.

RC10 : FINAL 30% X/ 100% Y
Result Combinations: Max and Min Values





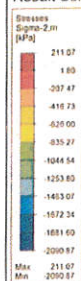
Εικόνα 38. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.



Εικόνα 39. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 100X – 30Y.



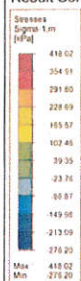
RC10 : FINAL 30% X/ 100% Y
Result Combinations: Max and Min Values



Max Sigma-2,m: 211.07, Min Sigma-2,m: -2090.87 kPa

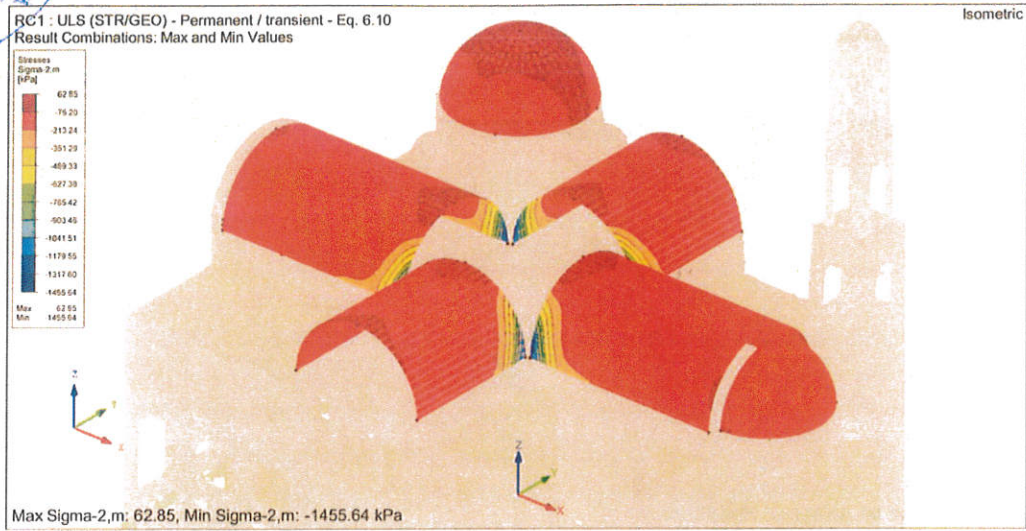
Εικόνα 40. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – Νότια καμάρα Σεισμική φόρτιση 30X – 100Y.

RC1 : ULS (STR/GEO) - Permanent / transient - Eq. 6.10
Result Combinations: Max and Min Values



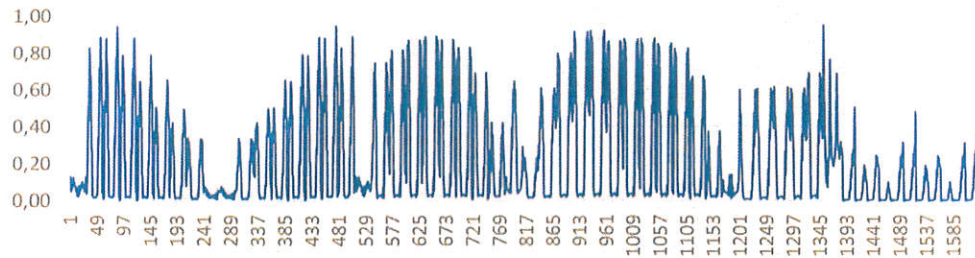
Max Sigma-1,m: 418.02, Min Sigma-1,m: -276.20 kPa

Εικόνα 41. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 1 – ULS.

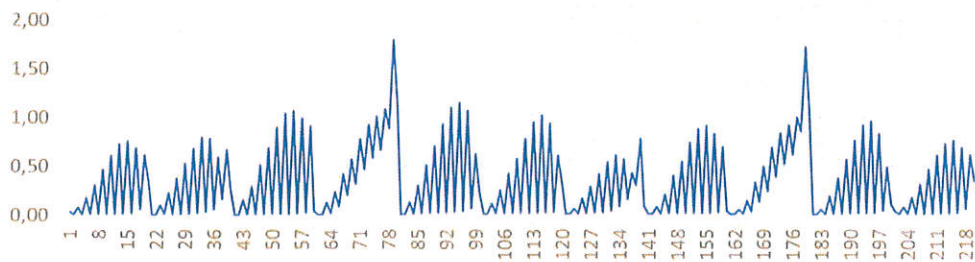


Εικόνα 42. Κύριες τάσεις κατά τη διεύθυνση 2 – ULS.

Λόγοι επάρκειας f - ULS

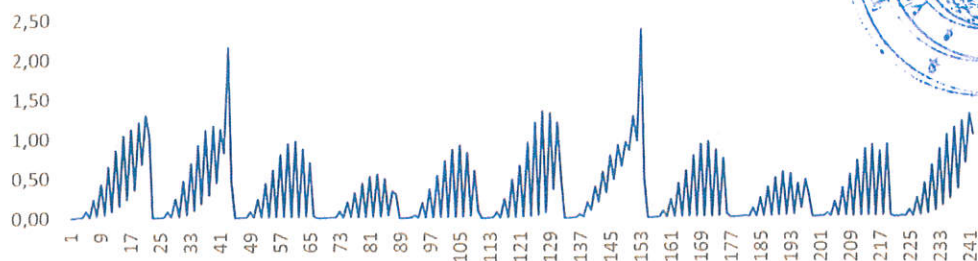


Λόγοι ανεπάρκειας f - Τρούλος - 30X100Y

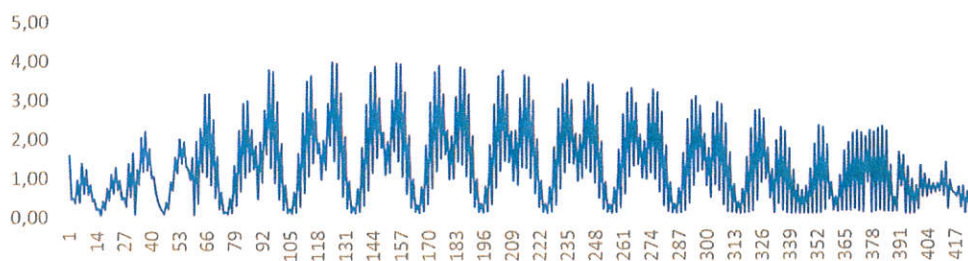




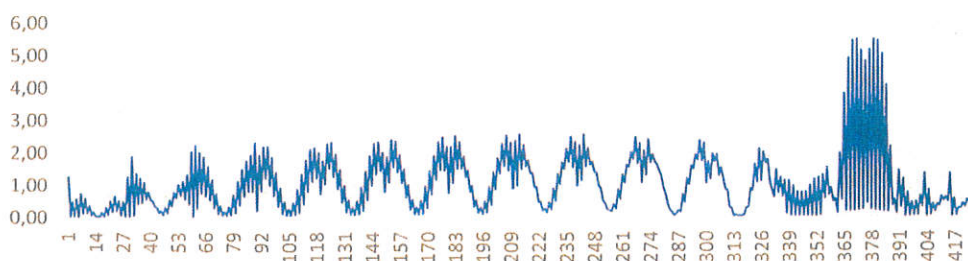
Λόγοι ανεπάρκειας f - Τρούλος - 100X30Y



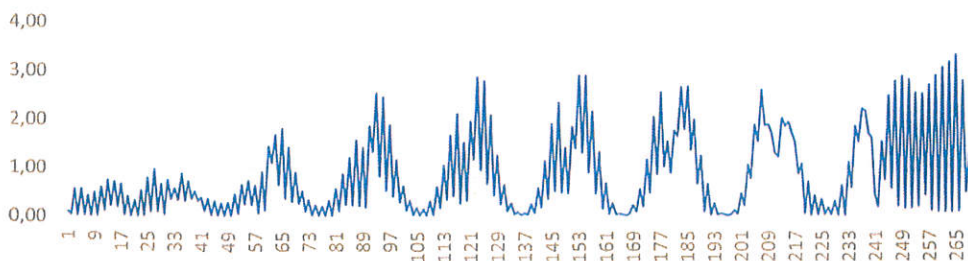
Λόγοι ανεπάρκειας f - Ανατολική καμάρα - 30X100Y



Λόγοι ανεπάρκειας f - Ανατολική καμάρα - 100X30Y

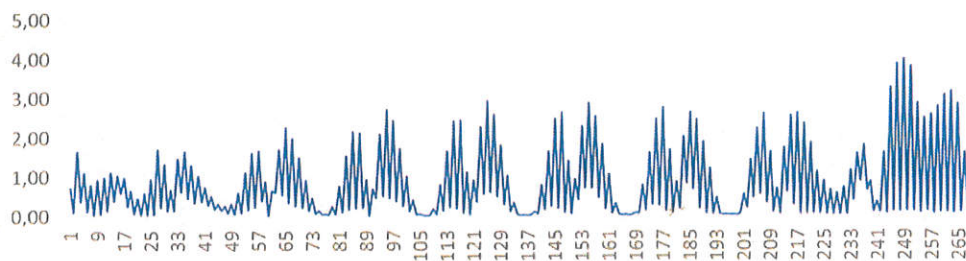


Λόγοι ανεπάρκειας f - Βόρεια καμάρα - 30X100Y

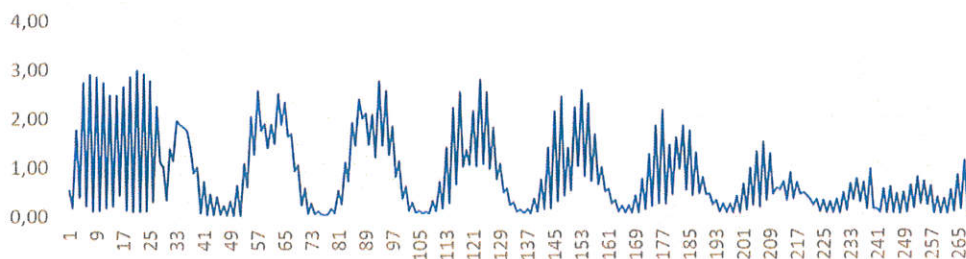




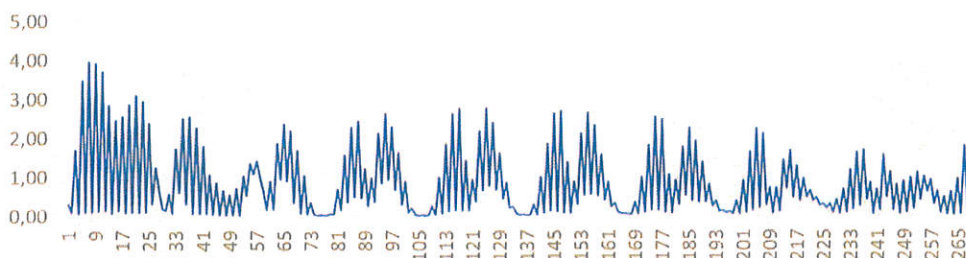
Λόγοι ανεπάρκειας f - Βόρεια καμάρα - 100X30Y



Λόγοι ανεπάρκειας f - Νότια καμάρα - 30X100Y



Λόγοι ανεπάρκειας f - Νότια καμάρα - 100X30Y



Εικόνα 43. Λόγοι ανεπάρκειας για τα σεισμικά φορτία στις καμάρες και τον τρούλο του Ναού.



3. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συνθετότητα του φορέα σε κάτοψη, αλλά και καθύψος, για τον κυρίως Ναό καθώς και η τοποθέτηση των κωδωνοστασίων στην ανατολική πλευρά καθιστούν την δυτική πλευρά του Ναού περισσότερο ευάλωτη καθόσον επιβαρύνεται και με το υπερώο - γυναικωνίτη. Η παρουσία των ελκυστήρων στο ισόγειο στον Νάρθηκα επιδρά, μέχρι κάποιο επίπεδο σεισμικής διέγερσης θετικά, όπως επίσης το δίκτυο των εγκαταστημένων ελκυστήρων στον όροφο του Γυναικωνίτη. Η χρήση αργολιθοδομής και ημιλαξευτής λιθοδομής στα κατώτερα τμήματα και συμπαγών πλίνθων – τούβλων στα ανώτερα τμήματα του Ναού και του τρούλου ελαφρύνουν σημαντικά τα κατακόρυφα φορτία μειώνουν όμως δραστικά τις διαθέσιμες αντοχές με τελικό αποτέλεσμα την αδυναμία ανάληψης των σημαντικών αδρανειακών δράσεων υπό μικρές αξονικές κατακόρυφες δράσεις.


Ο Ιερός Ναός στην υφιστάμενη κατάστασή του, όπως φαίνεται στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μπορεί να φέρει με ασφάλεια τα στατικά φορτία σχεδιασμού. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης, παρουσιάζει ανεπάρκειες σε ορισμένες θέσεις ελέγχου για το σεισμό σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα οι πεσσοί του βόρειου και νότιου τοίχου του Ναού παρουσιάζουν μικρές ανεπάρκειες με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στους ακραίους δυτικούς πεσσούς. Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και για το βόρειο και νότιο τοίχο του γυναικωνίτη. Ο δυτικός τοίχος του ναού εμφανίζει λόγους ανεπάρκειας κοντά στο 2. Οι λόγοι αυτοί είναι μεγαλύτεροι όσον αφορά τα καμπαναριά, τα οποία και όπως φαίνεται και από τις αναλύσεις και από την παθολογία είναι περισσότερα ευαίσθητα. Αυξημένοι λόγοι ανεπάρκειας παρουσιάζονται και στις καμπύλες επιφάνειες του Ναού δηλαδή στον τρούλο και στις καμάρες. Γενικότερα η εικόνα των ανεπαρκειών του φορέα στις σεισμικές δυνάμεις σχεδιασμού του Ευρωκώδικα για τις τοπικές συνθήκες της περιοχής συμβαδίζει με την παθολογία που εντοπίστηκε και παρουσιάζεται αναλυτικά στην αντίστοιχη τεχνική έκθεση. Συνεπώς προτείνεται η ενίσχυση του Ιερού Ναού με τρόπους και μεθόδους που παρουσιάζονται στο Τεύχος 1: Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση, κατασκευαστική ανάλυση και προτάσεις αποκατάστασης Ι.Ν. Αγ. Μηνά Ηρακλείου Κρήτης .



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Eduardo N. Dvorkin and Klaus-Jürgen Bathe. A continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis. Engineering Computations, 1, 1984.
2. ASTM (1984) American Society for testing and materials. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Soil and rock, building stones: annual book of ASTM standards, 4.08, Philadelphia, Pennsylvania
3. T. N. Singh; Ashutosh Kainthola; Venkatesh A (2012). Correlation Between Point Load Index and Uniaxial Compressive Strength for Different Rock Types. , 45(2), 259–264. doi:10.1007/s00603-011-0192-z
4. Μετρήσεις δυναμικής απόκρισης του Ι.Ν. Μεταμόρφωσης του Σωτήρος στο Μεγαλοχώρι Λέσβου, Δαμικούκας Σπυρίδων
5. Ευρωκώδικας 8-1, Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, ENV 1998-1
6. Ευρωκώδικας 8-3, Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας κτιρίων και επεμβάσεις
7. ΟΑΣΠ, «Κανονισμός για Αποτίμηση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας (ΚΑΔΕΤ)», Σχέδιο 1, Μάρτιος 2019
8. Σπυράκος Κωνσταντίνος, «Κατασκευές από Τοιχοποιία. Αποτίμηση & επεμβάσεις για σεισμικά φορτία» , 2019
9. Καραντώνη Φυλλίτσα Β., «Κατασκευές από Φέρουσα Τοιχοποιία, Σχεδιασμός και Επισκευές», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2004
10. Miha Tomazevic, «Earthquake – Resistant Design of Masonry Buildings», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2004.
11. N.S. Ottosen. A failure criterion for concrete. Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, 103(EM4):527–535, August 1977.
12. Karantoni, F.V., Fardis, M.N., Vintzeleou E. and Harisis, A. (1993). Effectiveness of seismic strengthening interventions. IABSE Symposium on Structural Preservation of the Architectural Heritage.

Για την ερευνητική ομάδα:



Βλάσης Κουμούσης
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Το παρόν σχέδιο συνοδεύει
την με αριθ. πρωτ. 334848/12.7.22
ΥΠ.ΠΟ.Α./ΓΔΑΜΤΕ/ΔΑΒΜΜ.....
Απόφαση.



