



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών

Διερεύνηση δομικών βλαβών και μεθόδων επεμβάσεων σε ενετικούς μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς της Δυτικής Κρήτης

Έτος 2021-2023

Επιβλέπουσα: Σταυρουλάκη Μαρία

Φοιτητής: Δαρμαράκης Παναγιώτης

1. Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της Σχολής Αρχιτεκτόνων του Πολυτεχνείου Κρήτης, «Προστασία, αποκατάσταση και ανάδειξη ιστορικών κτηρίων και συνόλων», υπό την επίβλεψη της αναπληρώτριας καθηγήτριας κα. Σταυρουλάκη Μαρίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα εκείνα, χωρίς την συμβολή των οποίων δεν θα μπορούσε να καταστεί δυνατή η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρωτίστως, την αναπληρώτρια καθηγήτρια, κα. Σταυρουλάκη Μαρία για την πολύτιμη καθοδήγηση της ,καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας. Ευχαριστίες επίσης θα ήθελα να απευθύνω στον καθηγητή. Προβιδάκη Κωνσταντίνο, τον καθηγητή Παρτσινέβελο Παναγιώτη και τον καθηγητή Μαυριγιαννάκη Στυλιανό για την παραχώρηση του ειδικού εξοπλισμού που απαιτήθηκε σε διάφορα στάδια της εργασίας αλλά και στον καθηγητή Σκουτέλη Νικόλαο για την παραχώρηση πολύτιμων πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή μου Λιόφαγο Γιάννο για την βοήθεια του σε διάφορα στάδια της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστώ την οικογένεια μου και όλους τους φίλους μου που με βοήθησαν και με στήριξαν καθ' όλο το διάστημα φοίτησης αλλά και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

2. Περίληψη

Αποτελεί πραγματικότητα πως ένας από τους κυρίαρχους αρχιτεκτονικούς ρυθμούς δόμησης ναών στην δυτική Κρήτη, κατά την περίοδο της ενετοκρατίας, ήταν εκείνος του « Μονόχωρου Καμαροσκέπαστου ». Πλήθος ναών της περιόδου αυτής έχει αποκατασταθεί πρόσφατα ενώ μέρος αυτών παρουσιάζει σοβαρές βλάβες. Καταδεικνύεται έτσι η ανάγκη της διερεύνησης των κύριων αιτιών των δομικών βλαβών που λαμβάνουν χώρα σε αυτούς, με σκοπό την εφαρμογή των πλέον βέλτιστων επεμβάσεων για την αποκατάστασή τους.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να γίνει η καταγραφή και η διερεύνηση των αιτιών των κυριότερων δομικών βλαβών που παρουσιάζονται στον συγκεκριμένο τύπο ναών στην περιοχή δυτικής Κρήτης. Στο πρώτο στάδιο της εργασίας περιλαμβάνεται η διερεύνηση των δομικών βλαβών, σε ναούς με αντιστοιχία στις αναλογίες διαστάσεων, διαμέσου φωτογραφικής τεκμηρίωσης. Σε δεύτερο στάδιο, γίνεται επιλογή ναών με τις χαρακτηριστικότερες δομικές βλάβες με σκοπό την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων για την διεξαγωγή στατικών και δυναμικών αναλύσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο τρίτο στάδιο με βάση τα ανωτέρω πραγματοποιείται μία τυποποίηση των αιτιών και των κυριότερων δομικών βλαβών που εμφανίζονται σε αυτού του τύπου τους ναούς. Τέλος, από τα στοιχεία που αναλύθηκαν δίνεται πρόταση επεμβάσεων αποκατάστασης των μελετώμενων ναών λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του κάθε μνημείου σε συνδυασμό με τις σύγχρονες αρχές αποκατάστασης που έχουν θεσπιστεί.

3. Abstract

It is a fact that one of the dominant architectural styles of building temples in west Crete, during the period of the Venetian occupation, was the type of "Monochoros Kamaroskepastos". Many temples from this period have recently been restored, while some of them show serious damage. This demonstrates the need of investigation the main causes of the structural damages that taking place in them, in order to implement the most efficient interventions for their restoration.

The aim of this work is to record and investigate the main causes of structural damages that occurs in the specific type of temples, in the region of western Crete. The first stage of the work, includes the investigation of structural damage, in temples with similar aspect ratios, through photographic documentation. In a second stage, the temples with the most characteristic structural damages will be selected, in order to create digital models for conducting static and dynamic analyzes. The analyzes were done by using the method of finite element. In the third stage, based on the above, there will be a standardization of the causes and the main structural damages that appear in this type of temples. Finally, a proposal will be made for the restoration of the studied temples, taking into count the unique characteristics of each monument in combination with the modern principles of restoration that have been established.

Key words: finite elements, restoration, modal analysis, spectrum response analysis, survey, venetian temple

Περιεχόμενα

1. Πρόλογος.....	1
2. Περίληψη	2
3. Abstract.....	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	13
4. Εισαγωγή	14
5. Τύποι ναών που συναντώνται στον Νομό Χανίων.....	16
6. Συνήθεις τύποι δομικών βλαβών που απαντώνται σε μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς	18
6.1 Είδη δομικών βλαβών που παρουσιάζονται σε μονοχωρους καμαροσκέπαστους ναούς	19
6.1.1 Αστοχία ελκυστήρα	19
6.1.2 Οξείδωση χαλύβδινων μελών.....	22
6.1.3 Βλάβες θολών	23
6.1.4 Βλάβες λόγω καθιζήσεων.....	24
6.1.5 Βλάβες λόγω δυναμικών φορτίων	25
6.1.6 Αστοχία δίλοβου Κωδωνοστασίου.....	28
6.1.7 Βλάβες κόγχης ναών	29

7. Μεθοδολογία έρευνας.....	30
7.1 Αποτύπωση φορέα.....	31
7.2 Τεκμηρίωση μηχανικών χαρακτηριστικών και τρόπου δομήσεως του φορέα	32
7.3 Μέθοδοι τεκμηρίωσης της δομής και των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας.....	33
7.3.1 Καταστρεπτικές μέθοδοι	33
7.3.2 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι.....	35
8. Παραδοχές μοντελοποίησης.....	39
8.1 Πεπερασμένα στοιχεία	39
8.2 Αναλύσεις γραμμική- μη γραμμική	39
8.3 Φορτίσεις	40
8.3.1 Στατικές φορτίσεις.....	40
8.3.2 Δυναμικές φορτίσεις	41
9. Μελέτες περίπτωσης.....	45
9.1 Μελέτη περίπτωση Παναγία η κερά που βρίσκεται στην Αγία Ρουμέλη.....	46
9.1.1 Γενική Περιγραφή.....	46
9.2 Ιστορικό δομικών βλαβών- Επεμβάσεων.....	48
9.2.1 Ιστορικό δομικών βλαβών	48

9.2.2	Ιστορικό εμπειμβάσεων	49
9.2.3	Υφιστάμενη κατάσταση	51
9.2.4	Κατασκευαστικές φάσεις	51
9.2.5	Υλικά.....	52
9.2.6	Παραδοχές μελέτης- Σενάρια φόρτισης.....	59
9.2.7	Αποτελέσματα αναλύσεων.....	60
9.2.8	Πρόταση αποκατάστασης	70
9.3	Μελέτη περίπτωσης Προφήτης Ηλίας στις Μουρνιές.....	71
9.3.1	Γενική Περιγραφή.....	71
9.3.2	Ιστορικό δομικών βλαβών	73
9.3.3	Υφιστάμενη κατάσταση	76
9.3.4	Κατασκευαστικές φάσεις	78
9.3.5	Υλικά.....	79
9.3.6	Παραδοχές μελέτης	80
9.3.7	Αποτελέσματα αναλύσεων.....	81
9.3.8	Διερεύνηση αποτελεσματικότητας της εφαρμοσθείσας ενίσχυσης με διάταξη ελκυστήρων	90
9.3.9	Πρόταση.....	95

9.4	Μελέτη περίπτωσης Άγιος Γεώργιος ο Μορμόρης στα Νεροκούρου	96
9.4.1	Γενική Περιγραφή.....	96
9.4.2	Δομικές βλαβές	97
9.4.3	Υποενότητα ιστορικό βλαβών- Επεμβάσεων	97
9.4.4	Υφιστάμενη κατάσταση	100
9.4.5	Ιδιότητες υλικών ναού	101
9.4.6	Δυναμικά χαρακτηριστικά ναού	103
9.4.7	Αποτελέσματα αναλύσεων.....	105
9.4.8	Πρόταση αποκατάστασης	109
9.5	Διερεύνηση της επίδρασης των αντηρίδων στην φέρουσα ικανότητα των ναών.....	110
10.	Συμπεράσματα.....	113
11.	Βιβλιογραφία.....	116
Παράρτημα Α		
Παράρτημα Β		
Παράρτημα Γ		
Παράρτημα Δ		
Παράρτημα Ε		

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 5.1. Παρουσία μηχανισμού αστοχίας έναντι εφελκυσμού εκκλησία Προφήτης Ηλίας Μουρνιές (ιδία επεξεργασία).....	19
Εικόνα 5.2. Χαλάρωση τενόντων ελκυστήρα (Εκκλησία προφήτης Ηλίας στις Μουρνιές (ιδία επεξεργασία)	20
Εικόνα 5.3. Υπέρβαση θλιπτική αντοχής λιθωσμάτων Άγιος χρυσόστομος Κατσιφαριανός (ιδία επεξεργασία).....	22
Εικόνα 5.4. Μέρη θόλων (Καραντώνη Φ.,2012)	23
Εικόνα 5.5. Σχηματική παρουσίαση των τάσεων λόγω α) μερικής καθίζησης (f) β) Ροπές λόγω καθίζησης γ) Παραμόρφωση λόγω σεισμού και καθίζησης δ) ροπές λόγω σεισμούς και καθίζησης (Σπυράκος Κ., 2019).....	24
Εικόνα 5.6. Μηχανισμός εκτός επιπέδου κάμψης (Σπυράκος Κ., 2019).....	25
Εικόνα 5.7. Ρωγμή στο ανώφλι του παραθύρου (κάμψη εκτός επιπέδου) στον ναό της Αγίας αικατερίνης στον Κουφό (ιδία επεξεργασία)	26
Εικόνα 5.8. Ρωγμή στο ανώφλι του παραθύρου (κάμψη εκτός επιπέδου) και κάτω από το παράθυρο (ένδειξη καθίζησης) στο ναό της Παναγία στην Σπηλιά κισάμου (Ιδία επεξεργασία)	26
Εικόνα 5.9. Αστοχία σύνδεσης στις γωνίες και στις συμβολές των τοίχων Άγιος Γεωργιος στα Νεροκούρου (Ιδία επεξεργασία)	27
Εικόνα 5.10 Αποκατεστημένο κωδονοστάσιο Άγιος Αντώνιος Ξηροκάμπι Κυδωνίας (Ιδία επεξεργασία)	28
Εικόνα 5.11. Αστοχία σύνδεσης κόγχης με την τοιχοποιία του υπόλοιπου ναού (ιδία επεξεργασία).....	29
Εικόνα 5.12. Γράφημα παρουσίας Μηχανισμού αστοχίας κόγχης.....	29
Εικόνα 6.1. Πειραματική διάταξη δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Geotech,2023)	34
Εικόνα 6.2. Συσκευή υπερήχων (ιδία επεξεργασία).....	36
Εικόνα 6.3. Συσκευή Κρουσιμέτρησης (Total station,2023)	37
Εικόνα 7.1. Τετραεδρικό πεπερασμένο στοιχείο με 4 κόμβους (Χελιντον Σ., 2018)	39
Εικόνα 7.2. Φάσμα σχεδιασμού (Ιδία επεξεργασία).....	42
Εικόνα 7.3. Δεδομένα επιταχυνσιογράφου για το σεισμό της ζακύνθου που έλαβε χώρα το 2018 , για τις διευθύνσεις Χ,Υ (ΙΤΣΑΚ,2018)	43

Εικόνα 7.4. Δεδομένα επιταχυνσιογράφου για το σεισμό της Ζακύνθου που έλαβε χώρα το 2018 , για την διεύθυνση Z (ΙΤΣΑΚ,2018)	44
Εικόνα 8.1. Αποψη Παναγίας κεράς στην Αγία Ρουμέλη (ιδία επεξεργασία)	46
Εικόνα 8.2. Αριστερά και δεξιά συγκριτικές φωτογραφίες από τον προαύλιο χώρο του ναού της Παναγίας της κεράς κατά τις αρχές του 20 ^{ου} αιώνα (Gerola G.1905-1932) και κατά το έτος 2023 (ιδία επεξεργασία) αντίστοιχα	47
Εικόνα 8.3. Στις φωτογραφίες παρουσιάζεται η δυτική όψη του ναού κατά τα έτη, 2008 (Ανδριανάκης Μ.,2008) αριστερά και 2020 δεξιά (Σκουτέλης Ν. κ.α., 2020)	48
Εικόνα 8.4. Φωτογραφίες ακατέργαστων δειγμάτων (ιδία επεξεργασία)	53
Εικόνα 8.5. Θέση δειγματοληψίας λίθων (ιδία επεξεργασία)	53
Εικόνα 8.6. Διαμορφωμένα δοκίμια(Ιδία επεξεργασία)	54
Εικόνα 8.7. Τρόπος αστοχίας δοκιμών (ιδία επεξεργασία).....	57
Εικόνα 8.8. Διάγραμμα υλικών δόμησης ναού της Παναγίας της κεράς (ιδία επεξεργασία)	58
Εικόνα 8.9. 4 ^η ιδιομορφή , 7 ^η ιδιομορφή, 11 ^η ιδιομορφή και 13 ^η ιδιομορφή	61
Εικόνα 8.10. Διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων με αριθμούς 3,4 ενώ με 1,2 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για τον συνδυασμό της φασματική ανάλυσης σε Pa για τον συνδυασμό $1X+0.3Y$ (ιδία επεξεργασία)	63
Εικόνα 8.11. Διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων με αριθμούς 3,4 ενώ με 1,2 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για τον συνδυασμό της φασματική ανάλυσης σε Pa για τον συνδυασμό $0.3X+1Y$ (ιδία επεξεργασία)	63
Εικόνα 8.12. Διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων με αριθμούς 3,4 ενώ με 1,2 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για τον συνδυασμό της φασματική ανάλυσης σε Pa για τον συνδυασμό $-1X-0.3Y$ (ιδία επεξεργασία)	64
Εικόνα 8.13. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονιοιστορίας για την σεισμική διέγερση της Ζακύνθου το 2018. Παρουσιάζονται με αριθμού 1,2,3,4 και 5 τα διαγράμματα κατακόρυφων μετακινήσεων(m), μετακινήσεων εκτός επιπέδου (m), εφελκυστικών τάσεων (Pa) και θλιπτικών τάσεων αντίστοιχα (Pa) ,(Ιδία επεξεργασία).....	66

Εικόνα 8.14. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα 5 σενάρια καθίζησης που επιλύθηκαν για τον ναό της Παναγίας της Κεράς στην Αγία ρουμέλη (ιδία επεξεργασία)	68
Εικόνα 8.15. Αποτελέσματα σεναρίων καθίζησης και ειδικότερα τα διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων (m) (ιδία επεξεργασία)...	69
Εικόνα 8.16. Η εκκλησία του Προφήτη Ηλία στις Μουρνιές εν έτη 2023 (ιδία επεξεργασία).....	71
Εικόνα 8.17. Επιγραφή εκατέρωθεν του οικοσμήτου των καλέργηδων	72
Εικόνα 8.18. Επιγραφή πάνω από το υπέρθυρο	72
Εικόνα 8.19. Η πρώτη η εικόνα η εκκλησία στις αρχές του 20 ^{ου} αιώνα (Στ. Ξανθουδίδης), Η δεύτερη εικόνα η εκκλησία στις αρχές του 20 ^{ου} αιώνα (G. Gerola), Η Τρίτη εικόνα η εκκλησία κατά το έτος 1982	75
Εικόνα 8.20. Διάγραμμα μετακινήσεων εκτός επιπέδου στην βόρεια όψη του (ιδία επεξεργασία)	76
Εικόνα 8.21 Διάγραμμα μετακίνησης εκτός επιπέδου στην νότια όψη του ναού (μονάδες μέτρησης μέτρα)	77
Εικόνα 8.22. Λεπτομέρεια Βορειανατολικής γωνίας ναού προφήτη Ηλία στις μουρνιές (ιδία επεξεργασία)	78
Εικόνα 8.23. Βόρεια όψη Προφήτη Ηλία στις μουρνιές (ιδία επεξεργασία).....	78
Εικόνα 8.24. Διάγραμμα υλικών δόμησης ναού της Παναγίας της κεράς (ιδία επεξεργασία)	79
Εικόνα 8.25. Διαγράμματα της 4ης, 5ης, 8ης και 14ης ιδιομορφής του ναού του Προφήτη Ηλίας στις μουρνιές (ιδία επεξεργασία)	82
Εικόνα 8.26. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (-0.3X-1Y χωρίς ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)	84
Εικόνα 8.27. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (1X-0.3Y χωρίς ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)	84
Εικόνα 8.28. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (-1X-0.3Y χωρίς ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)	85
Εικόνα 8.29. Σενάρια καθιζήσεως που επιλύθηκαν για τον ναό του προφήτη Ηλία (ιδία επεξεργασία).....	87

Εικόνα 8.30. Αποτελέσματα σεναρίων καθίζησης 1 έως 3, με παρουσίαση των διαγραμμάτων μετακινήσεων στον άξονα Z(m).....	88
Εικόνα 8.31. Αποτελέσματα σεναρίων καθίζησης 4 και 5, με παρουσίαση των διαγραμμάτων μετακινήσεων στον άξονα Z(m)	89
Εικόνα 8.32. Θέσεις επιλογής κόμβων ελέγχου για την καταγραφή των εκτός επιπέδου μετακινήσεων. Αριστερά εικόνα βόρεια όψη, δεξιά νότια όψη(ιδία επεξεργασία)	90
Εικόνα 8.33. Μετακινήσεις εκτός επιπέδου στους κόμβους ελέγχου στην Βόρεια όψη (ιδία επεξεργασία)	91
Εικόνα 8.34. Μετακινήσεις εκτός επιπέδου στους κόμβους ελέγχου στην Νότια όψη (ιδία επεξεργασία).....	92
Εικόνα 8.35. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (1X-0.3Y με ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)	93
Εικόνα 8.36. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (-0.3X-1Y με ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία).....	93
Εικόνα 8.37. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (1X-0.3Y με ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)	94
Εικόνα 8.38. Άγιος Γεώργιος ο Μορμόρης στα Νεροκούρου.....	96
Εικόνα 8.39. Ρωγμή στη βορειοανατολική πλευρά του ναού κατά το έτος 2007 (αρχείο ΕΦΑ).....	97
Εικόνα 8.40. Φωτογραφίες από τις δομικές βλάβες που είχε το καθολικό κατά το έτος 2018 (Αρχείο ΕΦΑ)	99
Εικόνα 8.41. Φωτογραφική τεκμηρίωση των δομικών βλαβών κατά το έτος 2022 (ιδία επεξεργασία)	100
Εικόνα 8.42. Τρόπος δόμησης του ναού Άγιος Γεώργιος στα Νεροκούρου (ιδία επεξεργασία)	101
Εικόνα 8.43. Θέση τοποθέτησης αισθητήρων (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021).....	103
Εικόνα 8.44. Αποτελέσματα ανάλυσης για τον συνδυασμό φόρτισης $1.0E_x + 0.3E_y$, όπου 1-2 οι διατμητικές τάσεις στον άξονα S _{zx} και οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στις εικόνες 3-4 (σε Pa).....	105
Εικόνα 8.45. Σενάρια καθίζησης.....	106

Εικόνα 8.46. Αποτέλεσμα αναλύσεων για το σενάριο 3.....	107
Εικόνα 8.47. Αποτελέσματα ανάλυσης για το σενάριο 1.....	107
Εικόνα 8.48. Αποτελέσματα αναλύσεων για το σενάριο 2.....	108
Εικόνα 8.49. Αποτελέσματα ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρονοιστορία βάσης, για το σεισμό της Ζακύνθου 2018, και ειδικότερα για ναό του Αγίου γεωργίου του μορμόρη. Με αριθμούς 1,2 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στο κατακόρυφο άξονα Z (m), με 3,4 τα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων (Pa) και με 5,6 τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων (Pa).....	111
Εικόνα 8.50. Αποτελέσματα ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρονοιστορία βάσης, για το σεισμό της Ζακύνθου 2018, και ειδικότερα για ναό του Προφήτη Ηλία. Με αριθμούς 1,2 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στο κατακόρυφο άξονα Z (m), με 3,4 τα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων (Pa) και με 5,6 τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων (Pa).....	112

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5-1. Ποσοστό συχνότητας εμφάνισης δομικής βλάβης στην κόγχη των ναών (βάση εξεταζόμενου δείγματος)	29
Πίνακας 8-1. Πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας (ιδία επεξεργασία).....	55
Πίνακας 8-2. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών των 15 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής και των μέγιστων τιμών παραμορφώσεων που εμφανίζει η κατασκευή (ιδία επεξεργασία).....	60
Πίνακας 8-3. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών των 15 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής και των μέγιστων τιμών παραμορφώσεων που εμφανίζει η κατασκευή (ιδία επεξεργασία).....	81
Πίνακας 8-4. Τιμές εκτίμησης των χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας από λαξευτούς λίθους (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021)	102
Πίνακας 8-5. Τιμές εκτίμησης χαρακτηριστικών αργολιθοδομής (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021)	102
Πίνακας 8-6. Συγκεντρωτικός πίνακας από τις συχνότητες που μετρήθηκαν το πεδίο και από εκείνες	104

4. Εισαγωγή

Αποτελεί πραγματικότητα, πως κατά την περίοδο της ενετοκρατίας ο κυρίαρχος αρχιτεκτονικός ρυθμός κατασκευής ναών αποτέλεσε εκείνος των «Μονόχωρων Καμαροσκέπαστων». Ο συγκεκριμένος τύπος ναών κυριάρχησε λόγω της σχετικά απλής κατασκευαστικής διαδικασίας του. Κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας αποτέλεσαν οι ναοί του Αγίου Γεωργίου Μορμόρη στα Νεροκούρου (16^{ος} αιώνας), του Προφήτη Ηλία στις Μουρνιές (16^{ος} αιώνας) και της Παναγίας της Κεράς στην Αγία Ρουμέλη (15^{ος} αιώνας). Η επιλογή των παραπάνω ναών έγινε κατόπιν διεξαγωγής αυτοψιών σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ναών, επιλέγοντας τελικώς, εκείνους με τις χαρακτηριστικότερες βλάβες.

Κατά την ανάλυση μνημειακών κατασκευών υπάρχουν εν γένη αβεβαιότητες όσον αφορά την εκτίμησή των μηχανικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής και του εδάφους θεμελίωσης. Σε αυτά έρχονται να προτεθούν τα σφάλματα που προκύπτουν κατά την διάρκεια της αποτύπωσης ,ειδικά σε απαιτητικές γεωμετρίες, δημιουργώντας αβεβαιότητες όσο αφορά τις διατομές της τοιχοποιίας και των θόλων της κατασκευής. Έτσι, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η ακρίβεια της αποτύπωσης της κατασκευής, του τρόπου δόμησης της λιθοδομής αλλά και των συνδέσεων μεταξύ των διαφόρων μελών της ,αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της μελέτης ενός υφιστάμενου κτιρίου, το οποίο μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό της ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μελέτης. Με την εφαρμογή μη-καταστρεπτικών μεθόδων, εργαστηριακών ελέγχων και εκτιμήσεων μπορεί να γίνει εφικτός ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μελετώμενων ναών με ικανοποιητική ακρίβεια μειώνοντας έτσι τις αβεβαιότητες των παραπάνω.

Ο τρόπος επίλυσης των ναών της παρούσας διατριβής έγινε με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων παρότι, είναι διαθέσιμο πλήθος μεθόδων για την επίλυση κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία. Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι, ανάλογα με την μοντελοποίηση και την διακριτοποίηση δύναται να υπολογιστούν πολύπλοκες και απαιτητικές κατασκευές-γεωμετρίες με ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων, πράγμα που άλλες μέθοδοι δεν μπορούν να το επιτύχουν. Από την άλλη, κύριο μειονέκτημα της αποτελεί ο αρκετά μεγάλος όγκος υπολογισμών.

Στην παρούσα διατριβή επιδιώκεται ο εντοπισμός των κύριων δομικών βλαβών που μπορούν να εμφανιστούν σε μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς. Παράλληλα γίνεται διερεύνηση των διαφόρων μεθόδων επεμβάσεων που μπορούν να εφαρμοστούν με κύριο γνώμονα την διατήρηση των αξιών του προς αποκατάσταση κτιρίου-μνημείου.

5. Τύποι ναών που συναντώνται στον Νομό Χανίων

Στο μνημειακό έργο του Gerola έγινε καταγραφή συνολικά 809 τοιχογραφημένων ναών συνολικά στην Κρήτη κατά το έτος 1903. Από αυτούς οι 274 βρίσκονται εντός της έκτασης του νομού Χανίων. Αρχιτεκτονικώς, οι ναοί που απαντώνται γενικώς στην Κρήτη είναι εκείνοι των Μονόκλιτων θολοσκεπών, των Μικρών βασιλικών δίκλιτων ή τρίκλιτων όντας καμαροσκέπαστοι, οι σταυρικοί ή σταυροειδής με τρούλο και οι Σταυρεπίστεγοι. Κύριο αντικείμενο της εργασίας θα αποτελέσει το είδος των μονόκλιτων θολοσκεπών ή μονόχωρων καμαροσκέπαστων αλλά για λόγους πληρότητας θα αναφερθούν συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των υπόλοιπων αρχιτεκτονικών τύπων (Μακριδάκης Α.,1965).

Αποτελεί πραγματικότητα πως ο πλέον κυρίαρχος αρχιτεκτονικός ρυθμός κατασκευής χριστιανικών ναών είναι εκείνος του μονόχωρου καμαροσκέπαστου. Η ευρεία διάδοση του συγκεκριμένου είδους πιθανόν να έγινε λόγω της πιο απλής κατασκευαστικής του διαδικασίας, εν συγκρίσει των υπόλοιπων ειδών. Με την πάροδο των ετών προκύπτει να υποχωρεί κάθε άλλο αρχιτεκτονικό είδος ναού, με την κατασκευή μονόχωρων καμαροσκέπαστων ναών σε διάφορες παραλλαγές. Τον 13ο με 15ο αιώνα οι εκκλησίες του συγκεκριμένου τύπου, στην πλειονότητα τους, ήταν μικρού μεγέθους με εξωτερικές διαστάσεις έως 3 μέτρα πλάτος & 5 μέτρα μήκος. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες του συγκεκριμένου είδους, είχαν μέγιστο μήκος 11- 12 μέτρα. Οι αναλογίες διαστάσεων πλάτους προς ύψος, των εξωτερικών διαστάσεων των ναών, συνήθως ήταν από 1:1 έως 1:1.5. Από τον 16ο αιώνα λαμβάνει χώρα η διαφοροποίηση του μεγέθους των μονόχωρων ναών, δίνοντας έμφαση στην διάσταση του ύψους με την υπερύψωση του τριγωνικού αετώματος, καθώς και ο καλύτερος φωτισμός – αερισμός του χώρου κατασκευάζοντας πλευρικά μεγαλύτερα ανοίγματα (Γκρατζιου Ο.,2009).

Ένα άλλο είδος ναών είναι εκείνοι που υπάγονται στον αρχιτεκτονικό ρυθμό μικροί βασιλικοί δίκλιτοι ή τρίκλιτοι. Η εμφάνιση αυτού του είδους γίνεται περί τον 13^ο αιώνα, όταν έχουν πλέον εξελιχθεί οι κατασκευαστικές τεχνικές, με τυπικές διαστάσεις μήκος 8-12μ., πλάτος 2.5-4 μ. και ύψος 3.5-4.5μ. Ο αριθμός τους είναι σημαντικά μικρότερος από εκείνων των μονόχωρων καμαροσκέπαστων (Γκρατζιου Ο.,2009). Η στέγη τους συνήθως επικαλύπτεται με βυζαντινά κεραμίδια σε αυτόν το τύπο ναών, ανήκει και ο τύπος των μονόκλιτων με θολωτό τρούλο. (Μακριδάκης Α.,1965)

Συμπληρώνοντας τα παραπάνω, ένα ακόμα είδος ναών, είναι εκείνο των σταυρικών ή των σταυροειδών εγγεγραμμένων με τρούλο ναών. Το είδος αυτό χρονολογικά ορίζεται στην περίοδο μεταξύ 8^{ου}-10^{ου} αιώνα. Στα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι οι ισοσκελής σταυροί, όπου στους τρίκλητους έχουν τετραγωνικό σχήμα το οποίο μορφοποιείται από την ανασταύρωση της καμάρας και εκτείνεται μέχρι το τύμπανο του τρούλου (Μακριδάκης Α.,1965). Ο σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο ναός ικανοποιεί πλήρως τις λειτουργικές ανάγκες της εποχής του, ενώ εκφράζει πολλά συμβολικά νοήματα, παρέχοντας την δυνατότητα αναπτύξεως της εικονογραφίας στις επιφάνειες τοίχων και θόλων στο εσωτερικού του (Μπούρας Χ.,2001).

Τέλος, στα παραπάνω είδη ναών που απαντώνται στην Κρήτη, είναι εκείνο του Σταυρεπίστεγου ναού. Οι σταυρεπίστεγοι ναοί έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι διαθέτουν στέγη με σχήμα σταυρού, με τις πρώτες καταγραφές του συγκεκριμένου είδους να γίνονται περί τον 14ο αιώνα (Μακριδάκης Α.,1965). Ειδικότερα αναλύοντας περισσότερο το συγκεκριμένο είδος αυτό, παρατηρείται ότι οι σταυρεπίστεγοι ναοί απαρτίζονται από επιμέρους θολοσκεπείς βασιλικές συνήθως μονόκλιτες και μικρού μεγέθους, με το εξής ιδιαίτερο στοιχείο: ο κατά μήκος ημικυλινδρικός θόλος διακόπτεται σε μικρή απόσταση από το ιερό δημιουργώντας ένα κενό που σκεπάζεται με άλλον ημικυλινδρικό θόλο εγκαρσίως τοποθετημένο. Η γέννηση του δευτέρου θόλου βρίσκεται ψηλότερα από το εκείνη του πρώτου θόλου. Λόγω των παραπάνω δημιουργείται ένα είδος εγκάρσιου κλίτους που δίνει στον εσωτερικό χώρο την εντύπωση του σταυρού και το οποίο σε συνδυασμό με την δίκλινη στέγη δημιουργεί την ίδια εντύπωση και στο εξωτερικό. Οι τρίκλιτοι σταυρεπίστεγοι ναοί είναι σπάνιοι (Μπούρας Χ.,2001) .

6. Συνήθεις τύποι δομικών βλαβών που απαντώνται σε μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς

Τα περιεχόμενα του παρόντος κεφαλαίου αποτελούν προϊόν ιδίας εργασίας μέσω αυτοψιών σε Μονόχωρους Καμαροσκέπαστους ναούς που βρίσκονται στο Νομό Χανίων. Τα αποτελέσματα που θα παρατεθούν βασίζονται κυρίως μέσω της φωτογραφικής τεκμηρίωσης και της συσχέτισης των αναλογιών των μελετώμενων ναών. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να εντοπιστούν τα κύρια δομικά προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν στους Μονόχωρους Καμαροσκέπαστους ναούς. Με άλλα λόγια η ενότητα αυτή παραθέτει τις βασικές αδυναμίες του φέροντος οργανισμού του συγκεκριμένου είδους ναών.

Κύριο κριτήριο της συγκεκριμένης έρευνας αποτέλεσε η ύπαρξη δομικών βλαβών στους υπό μελέτη ναούς, με το εξεταζόμενο δείγμα να ανέρχεται στους 25 ναούς (βλέπε παράρτημα Α). Κύρια δυσκολία αποτέλεσε το γεγονός ότι η πλειονότητα τους ήταν αποκατεστημένοι, με αποτέλεσμα να έχουν καλυφθεί οι όποιες τυχόν βλάβες παρουσιάζονται στο παρελθόν και σε μερικές περιπτώσεις να μην είναι καν ευδιάκριτα τα ίχνη των επισκευών λόγω των επιχρισμάτων. Ουσιαστικά σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται ευρήματα από έναν «πρωτοβάθμιο» έλεγχο που στηρίζεται στην φωτογραφική τεκμηρίωση του κάθε φορέα καθώς και την μέτρηση των βασικών διαστάσεων του. Στο παράρτημα Α γίνεται η παρουσίαση των ναών (ονομαστικά) που μελετήθηκαν σε συνδυασμό με την παράθεση στοιχείων για τις βασικές διαστάσεις τους. Σε επόμενο κεφάλαιο έγινε επιλογή τριών ναών με τις χαρακτηριστικότερες βλάβες, για να μελετηθούν υπό την δράση στατικών και δυναμικών φορτίων

6.1 Είδη δομικών βλαβών που παρουσιάζονται σε μονοχωρους καμαροσκέπαστους ναούς



Εικόνα 6.1. Παρουσία μηχανισμού αστοχίας
έναντι εφελκυσμού εκκλησία Προφήτης Ηλίας
Μουρνιές (ιδία επεξεργασία)

6.1.1 Αστοχία ελκυστήρα

(Σπυράκος Κ., 2019) Η εφαρμογή ελκυστήρων σε υφιστάμενα κτίρια αποτελεί μία μέθοδο ενίσχυσης τους και ανάλογα με τον τύπο του ελκυστήρα δύναται να διαφοροποιηθεί ο τρόπος λειτουργίας τους. Αναλυτικότερα, οι τύποι ελκυστήρων που μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να ενισχυθεί ο φέρον οργανισμός ενός κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία μπορεί να είναι κυκλικός, ορθογωνικός, ορθογωνικός με πολλές ράβδους, λεπίδας , με λάμες σχήματος Υ, με προφίλ UPN και γωνιακός. Τα μέρη από τα οποία αποτελούνται συνήθεις ελκυστήρες είναι το χαλύβδινο επίμηκες τμήμα, οι πλάκες αγκύρωσης και οι συνδέσεις των ράβδων. Σε ελκυστήρες τύπου «ορθογωνικής πλάκας αγκύρωσης» δύναται να παρουσιαστούν δύο είδη αστοχιών, όπου είναι :

- Αστοχία ελκυστήρα τύπου « ορθογωνικής πλάκας αγκύρωσης» λόγω εφελκυσμού
- Αστοχία ελκυστήρα τύπου « ορθογωνικής πλάκας αγκύρωσης» λόγω διάτμησης

Στις εικόνες Εικόνα 6.1 και Εικόνα 6.2 παρουσιάζονται η μορφή των ρωγμών που προκαλούνται από την αστοχία και η χαλάρωση του χαλύβδινου επιμήκους τμήματος αντίστοιχα.



Εικόνα 6.2. Χαλάρωση τενόντων ελκυστήρα
(Εκκλησία προφήτης Ηλίας στις Μουρνίες
(ιδία επεξεργασία)

6.1.1.1 Αστοχία ελκυστήρα τύπου «ορθογωνικής πλάκας αγκύρωσης» λόγω εφελκυσμού

(Σπυράκος Κ., 2019) Η μηχανισμός αστοχίας τοιχοποιίας υπό την δράση εφελκυστικών δυνάμεων, που εφαρμόζεται από ορθογωνική πλάκα αγκύρωσης ελκυστήρα έχει κωνική μορφή. Ορίζεται ως πάχος τοιχοποιίας t , με a και b το μήκος και το πλάτος αντίστοιχα, της πλάκας αγκύρωσης του ελκυστήρα. Έτσι προκύπτει ότι $A_1 = a * b$ είναι το εμβαδόν της πλάκας αγκύρωσης του ελκυστήρα και $A_2 = (a + 2 * t) * (b + 2 * t)$ το εμβαδό της μεγάλης βάσης του κώνου που αστοχεί. Έτσι, προκύπτει ότι η αντοχή της τοιχοποιίας σε εφελκυσμό είναι:

$$F_{t,\varepsilon} = 2 * f_{td} * t(a + b + 2 * t)$$

Όπου: f_{td} είναι η αντοχή της τοιχοποιίας σε εφελκυσμό και $F_{t,\varepsilon}$ η δύναμη που εφαρμόζεται στην τοιχοποιία από την πλάκα αγκύρωσης. Παρατηρείται ότι η τελική αντοχή της τοιχοποιίας έναντι εφελκυσμού στο σημείο σύνδεσης με το ελκυστήρα είναι ανάλογη του πάχους και της εφελκυστικής της αντοχής ενώ εξαρτάται από το άθροισμα των διαστάσεων της πλάκας αγκύρωσης.

6.1.1.2 Αστοχία ελκυστήρα τύπου «ορθογωνικής πλάκας αγκύρωσης» λόγω διάτμησης

(Σπυράκος Κ., 2019) Η αστοχία ελκυστήρα τύπου «ορθογωνικής πλάκας αγκύρωσης» λόγω διάτμησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κατηγορίες. Στην μία κατηγορία κατατάσσονται οι τοιχοποιίες από οπτόπλινθους, από λαξευτούς λίθους και από αργολιθοδομές με μικρούς λίθους και μεγάλους αρμούς(κατηγορία Β) και στην άλλη κατηγορία οι άλλοι τρόποι δόμησης (κατηγορία Α).

Κατηγορία Α

Στην περίπτωση αυτή η αστοχία εμφανίζεται με την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων σε επιφάνεια ορθογωνίου πρίσματος. Η αντοχή της τοιχοποιίας σε τέμνουσας δίνεται από τον τύπο

$$F_{t,\delta} = 2 * t[f_{v0} * (\alpha + b + 2 * t) + \mu * \sigma_0 * (\alpha + t)]/\gamma_m$$

Όπου; f_{v0} η μέση διατμητική αντοχή απουσία κατακόρυφου φορτίου, μ ο συντελεστής τριβής, σ_0 η μέση τάση στην επιφάνεια αστοχίας και γ_m συντελεστής ασφάλειας

Κατηγορία Β

Στην περίπτωση αυτή η αστοχία της τοιχοποιίας επέρχεται με την αστοχία του κονιάματος, με τους λίθους να μετακινούνται στην επιφάνεια επαφής τους χωρίς να παρουσιάζουν κάποιου είδους βλάβη. Στην γενική περίπτωση αυτή της κατηγορίας η αντοχή της λιθοδομής είναι:

$$F_{t,\delta} = 2 * t[f_{v0} * (\alpha + b) + \mu * \sigma_0 * \alpha]/\gamma_m$$

Από το σύνολο των ναών που μελετήθηκαν μόνο σε έναν εξ αυτών είχε γίνει η προσθήκη ελκυστήρων. Ο ναός αυτός είναι ο Προφήτης Ηλίας όπου βρίσκεται στις Μουρνιές και επιλέχθηκε για επιπλέον ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο. Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη ενίσχυση στον ναό έχει αστοχήσει.

6.1.2 Οξείδωση χαλύβδινων μελών



Οι προσθήκες μεταλλικών ελασμάτων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας για την αποκατάσταση της αποτελεί μία διαδεδομένη πρακτική. Σε αυτήν την εφαρμογή, η οξείδωση του χάλυβα που εφαρμόζεται προκαλεί αστοχία των λίθων και κατ' επέκταση της τοιχοποιίας. Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η αστοχία λίθου που στο εσωτερικό του έχει γίνει προσθήκη μεταλλικό στοιχείου. Στην φωτογραφία διακρίνονται οι χαρακτηριστικές ρηγματώσεις του συγκεκριμένου τρόπου αστοχίας των λίθων.

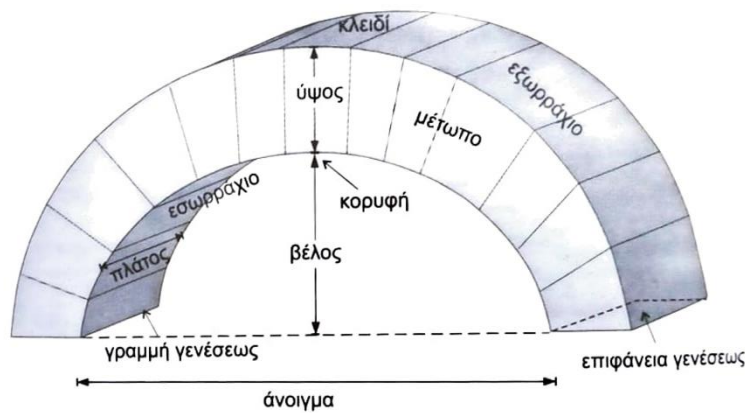
Παρουσία του φαινομένου της οξείδωσης ο χάλυβας αποκτάει μεγαλύτερο όγκο. Η αύξηση του όγκου προκαλεί σταδιακή αύξηση των τάσεων στα τοιχώματα που είναι σε επαφή με τον λίθο μέχρι να επέλθει τελικά η αστοχία, όπου εμφανίζεται με την μορφή ρηγματώσεων στον λίθο.

Εικόνα 6.3. Υπέρβαση θλιπτική
αντοχής λιθοσσωμάτων Άγιος
χρυσόστομος Κατσιφαριανά (ιδία
επεξεργασία)

6.1.3 Βλάβες θολών

Ως κυλινδρικοί θόλοι ορίζονται οι κυλινδρικές επιφάνειες οι οποίες προκύπτουν από παράλληλη επανάληψη μιας αψίδας. Κύρια χρήση τους γενικά είναι η στέγαση ορθογωνικών χώρων όπως είναι οι ναοί. Οι δυνάμεις που εφαρμόζουν στην υπόλοιπη κατασκευή είναι οι ωθήσεις προς τους διαμήκεις τοίχους και στις γωνίες που συμβάλουν οι εγκάρσιοι και διαμήκεις τοίχοι. Υπό την δράση αυτών των δυνάμεων είναι δυνατό να προκληθεί εκτός επιπέδου αστοχία στους διαμήκεις τοίχους.

Τα υλικά κατασκευής των θόλων είναι λιθοδομή (κυρίως λαξευτοί λίθοι) ή οπτοπλινθοδομή επειδή σαν υλικό παρουσιάζει ικανοποιητική θλιπτική αντοχή. Η συνηθέστερη βλάβη που παρατηρείται στους θόλους είναι η ρηγμάτωση του τμήματος της κορυφής τους συνήθως μικρής έκτασης και πλάτους το οποίο μπορεί να επισκευαστεί εύκολα.



Εικόνα 6.4. Μέρη θόλων (Καραντώνη Φ., 2012)

Οι αστοχίες που μπορούν να παρουσιαστούν στους θόλους είναι:

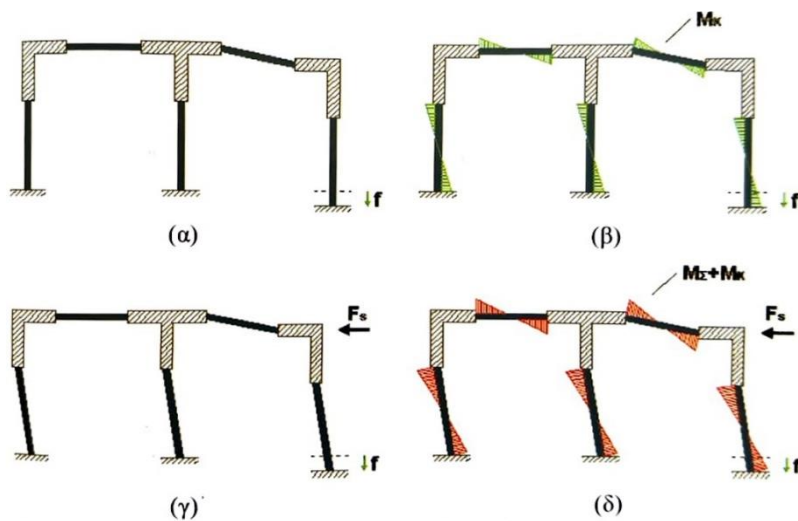
- Σε περίπτωση λόγω ανεπαρκούς διατομής (ύψους) θόλου, τότε, το σημείο της αστοχίας εξαρτάται από το είδος της φόρτισης και το βέλος του. Η αστοχία μπορεί να εκδηλωθεί στο εσωτερικό της κλείδας, στα άκρα του εξωραχίου και μπορεί να επέλθει αστοχία της κλείδας.
- Υπό την δράση κατακόρυφου συγκεντρωμένου φορτίου η θέση εμφάνισης της αστοχίας είναι το σημείο εφαρμογής του φορτίου με την αντοχή του θόλου να εξαρτάται από την γεωμετρία του.
- Στην περίπτωση που οι στηρίξεις υποχωρούν ή στρέφονται η αστοχία μπορεί να εκδηλωθεί με ρηγμάτωση του εσωραχίου στο τμήμα που βρίσκεται προς την βάση που έχει εκδηλωθεί η καθίζηση.

- Τέλος οι θόλοι υπό τις δράσεις του σεισμού επηρεάζονται είτε άμεσα με την δημιουργία ρηγματώσεων, είτε έμμεσα με την μετακίνηση εκτός φάσεων των γενέσεων του θόλου

6.1.4 Βλάβες λόγω καθιζήσεων

Στα προηγούμενα θα πρέπει να προστεθεί, η πιο συνήθης αίτια εμφάνισης δομικών βλαβών σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία, δηλαδή εκείνη της διαφορικής καθιζήσεως. Η παρουσία διαφορικών καθιζήσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του εδάφους θεμελίωσης αλλά και από την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα (Σπυράκος Κ., 2019).

Η παρουσία καθιζήσεων σε καμία περίπτωση δεν συνεπάγεται άμεσα ότι στην κατασκευή θα υπάρξουν ρηγματώσεις. Στην περίπτωση



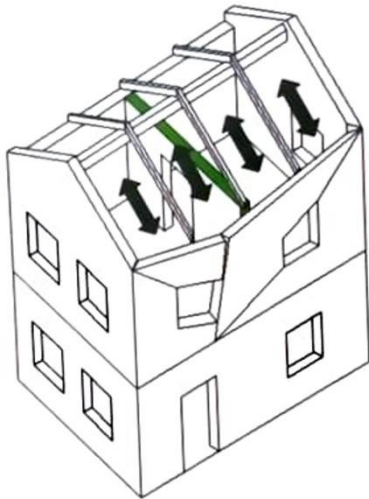
ομοιόμορφης καθίζησης δεν παρουσιάζονται ρηγματώσεις στην κατασκευή ενώ στην περίπτωση που λαμβάνουν χώρα διαφορικές καθιζήσεις τότε γίνεται η εμφάνιση δομικών βλαβών. Υπάρχει περίπτωση να έχει λάβει χώρα το γεγονός της διαφορικής καθίζησης αλλά να μην παρουσιαστούν βλάβες στην κατασκευή και με την επιβολή κάποιας δυναμικής φόρτισης (π.χ. σεισμός) να επέλθει η αστοχία ή ακόμα και κατάρρευση. Σχηματικά παρουσιάζονται τα παραπάνω στην Εικόνα 6.5. Οι τύποι των καθιζήσεων μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες όπου είναι :

- Κατακόρυφη καθίζηση στο άκρο της κατασκευής
- Κατακόρυφη καθίζηση στο κέντρο της κατασκευής
- Ανομοιόμορφη καθίζηση σε όλο το εύρος της θεμελίωσης
- Υποχώρηση του εδάφους λόγω έκκεντρων φορτίων

Εικόνα 6.5. Σχηματική παρουσίαση των τάσεων λόγω α) μερικής καθίζησης β) Ροπές λόγω καθίζησης γ) Παραμόρφωση λόγω σεισμού και καθίζησης δ) ροπές λόγω σεισμούς και καθίζησης (Σπυράκος Κ., 2019)

Σημείωση: Σε ποσοστό 21% εκ των ναών που έγιναν αυτοψίες, υπήρξαν ενδείξεις πιθανής παρουσίας καθιζήσεως.

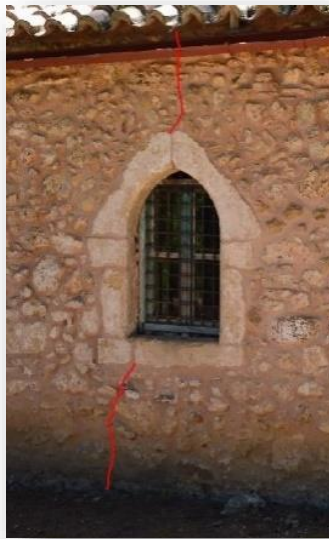
6.1.5 Βλάβες λόγω δυναμικών φορτίων



6.1.5.1 Συμπεριφορά του εδάφους υπό δυναμικές φορτίσεις

Οι σεισμικές δράσεις, τα οχήματα ή εργασίες κατασκευής πασσάλων ή ορυγμάτων, υπό περιπτώσεις, δύναται να προκαλέσουν διαφορετική καθίζηση του εδάφους. Ωστόσο, το είδος του εδάφους της θεμελίωσης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό, την συμπεριφορά του, έναντι των παραπάνω δυναμικών φορτίσεων. Αμμώδη εδάφη επηρεάζονται περισσότερο από δυναμικές φορτίσεις, ενώ αργιλικά εδάφη φαίνονται να παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά. Στα αμμώδη εδάφη, η δυναμική φόρτιση οδηγεί στην συμπύκνωση τους, με άμεσο επακόλουθο την καθίζηση τους, σε αντίθεση με τα αργιλικά εδάφη που δεν παρουσιάζουν καθιζήσεις υπό την δράση ίδιων φαινομένων (Σπυράκος Κ., 2019).

Εικόνα 6.6. Μηχανισμός εκτός επιπέδου κάμψης (Σπυράκος Κ., 2019)



Εικόνα 6.8. Ρωγμή στο ανώφλι του παραθύρου (κάμψη εκτός επιπέδου) και κάτω από το παράθυρο (ένδειξη καθίζησης) στο ναό της Παναγία στην Σπηλιά κισάμου (Ιδία επεξεργασία)

6.1.5.2 Εκτός επιπέδου κάμψη

Ο μηχανισμός της εκτός επιπέδου κάμψης αποτελεί ένα συνηθισμένο αίτιο βλαβών των κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία. Ως δράσεις που μπορούν να ενεργοποιήσουν το μηχανισμό αυτό, μπορεί να είναι οι ωθήσεις από τον θόλο ή την στέγη ή λόγω των δράσεων σεισμού. Ο τρόπος εμφάνισης του συγκεκριμένου μηχανισμού δύνανται να επηρεαστεί από το είδος των συνδέσεων μεταξύ διαμηκών και εγκάρσιων τοίχων της κατασκευής. Ουσιαστικά ο τρόπος αστοχίας της τοιχοποιίας φέρεται να είναι με την μορφή σφήνας, με την τοξοειδή μετακίνηση εκτός επιπέδου της.. Η μετακίνηση αυτή μπορεί λαμβάνει

χώρα σταδιακά υπό την δράση πολλαπλών κύκλων φόρτισης μέχρις ότου επέλθει η κατάρρευση. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου αυτού πιθανόν να παρουσιαστούν κατακόρυφες ρηγματώσεις. Οι ρηγματώσεις αυτές συνήθως εμφανίζονται στα ανώφλια των παραθύρων και συνδυαστικά μπορούν να λαμβάνουν χώρα και άλλα φαινόμενα επιταχύνοντας το ρυθμό εξέλιξης των βλαβών , όπως για παράδειγμα η καθίζηση. Στην Εικόνα 9.20 και Εικόνα 9.21 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις που καταγράφηκαν εκτός επιπέδου στην εκκλησία του Προφήτη Ηλία στις



Εικόνα 6.7. Ρωγμή στο ανώφλι του παραθύρου (κάμψη εκτός επιπέδου) στον ναό της Αγίας αικατερίνης στον Κουφό (Ιδία

Μουρνιές. Επιπλέον, στην Εικόνα 6.8 και Εικόνα 6.7 παρουσιάζονται ρωγμές που οφείλονται σε κάμψη εκτός επιπέδου αλλά βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο, (Σπυράκος Κ., 2019)



6.1.5.3 Αστοχία σύνδεσης στις γωνίες και στις συμβολές των τοίχων

(Tomazevic M., κ.α.,2004) Η αστοχία σύνδεσης στις γωνίες και στις συμβολές των τοίχων αποτελεί ένα χαρακτηριστικό τύπο βλάβης σε ναούς. Κύριος λόγος εμφανίζεται να είναι η κακή ποιότητα των υλικών που έχουν εφαρμοστεί, τόσο των λίθων όσο και των κονιαμάτων. Επιπλέον η πρόχειρη σύνδεση που τυχόν έχει γίνει μεταξύ εγκαρσίων και διαμήκων τοίχων μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμα λόγο. Σαν αποτέλεσμα αυτού του τύπου αστοχίας είναι η αποκόλληση των τοίχων ή ακόμη και η κατάρρευση με ανατροπή εκτός επιπέδου της τοιχοποιίας. Η συγκεκριμένη βλάβη εμφανίζεται συνήθως μετά από την δράση κάποιας δυναμικής φόρτισης (π.χ.σεισμός) (Tomazevic M., κ.α.,2004).

Σημείωση: Στους ναούς που πραγματοποιήθηκαν αυτοψίες το συγκεκριμένο είδος βλάβης εμφανίστηκε σε ποσοστό 7.14%.

Εικόνα 6.9. Αστοχία σύνδεσης στις γωνίες και στις συμβολές των τοίχων Αγιος Γεωργιος στα Νεροκούρου (Ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 6.10 Αποκατεστημένο κωδωνοστάσιο
Αγίος Αντώνιος Ξηροκάμπι Κυδωνίας (Ιδία
επεξεργασία)

6.1.6 Αστοχία δίλοβου Κωδωνοστασίου

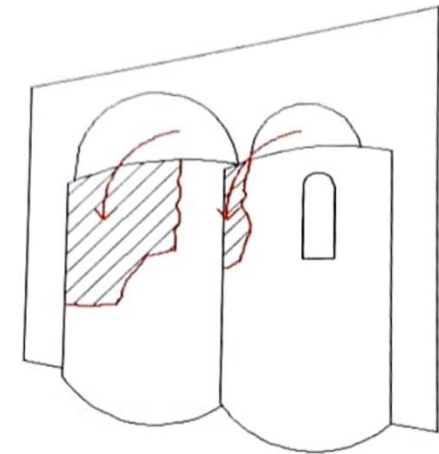
Τα κωδωνοστάσια των ναών αποτελούν ένα από τα πιο ευάλωτα δομικά στοιχεία τους. Στους μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς που έγιναν οι αυτοψίες τα κωδωνοστάσια που έχουν κατασκευαστεί ανάγονται στον τύπο του «δίλοβου κωδωνοστασίου». Όντας υψίκορμα και λεπτότοιχα αποτελούν στοιχείο αρκετά ευάλωτο στις δυναμικές δράσεις (π.χ. σεισμός). Απουσία πλευρικών στηρίξεων, και λόγω του μικρού πλάτους έδρασης υπάρχει κίνδυνος έναντι ανατροπής και κατάρρευσης τους. Τέλος, σε ποσοστό 25% των ναών που έγινε αυτοψία παρατηρήθηκε ότι τα κωδωνοστάσια είχαν αποκατασταθεί- αναστηλωθεί.



Εικόνα 6.11. Αστοχία σύνδεσης κόγχης με την τοιχοποιία του υπόλοιπου ναού (ιδία επεξεργασία)

6.1.7 Βλάβες κόγχης ναών

Ένα ιδιαίτερο δομικό μέρος των μονόχωρων καμαρασκέπαστων ναών και γενικότερα όλων των ναών, αποτελεί η κόγχη. Η κόγχη τοποθετείται στην ανατολική πλευρά του ναού, αποτελώντας διακοσμητικό και λειτουργικό μέρος του ιερού. Το σχήμα της είναι κυλινδρικό με τεταρτοσφαιρικό σχήμα στο άνω της μέρος. Η γεωμετρία της, την καθιστά δομικό στοιχείο το οποίο αναπτύσσει συγκεκριμένους τρόπους αστοχίας. (Σπυράκος Κ.,2019) Οι μηχανισμοί αστοχίας μπορεί να είναι η αστοχία της συνδέσεως της με τον ναό, η δημιουργία μηχανισμού εκτός επιπέδου και η δημιουργία ρωγμών στο τεταρτοσφαίριο της. Ως κύρια αιτία αυτών των βλαβών παρουσιάζεται η διαφορετική δυσκαμψία της από την υπόλοιπη κατασκευή, με αποτέλεσμα την διαφορετική της συμπεριφορά υπό την δράση δυναμικών φορτίων (π.χ. σεισμός)



Εικόνα 6.12. Γράφημα παρουσάσης Μηχανισμού αστοχίας κόγχης (Σπυράκος Κ.,2019)

ΕΙΔΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΒΛΑΒΗΣ		Ποσοστό (%)
Βλάβη στην περιοχή της κόγχης	Εμφανής βλάβη	15.38
	Ίχνη επισκευών	7.69

Πίνακας 6-1. Ποσοστό συχνότητας εμφάνισης δομικής βλάβης στην κόγχη των ναών (βάση εξεταζόμενου δείγματος)

7. Μεθοδολογία έρευνας

Κατά την εκπόνηση μίας μελέτης στατικής επάρκειας οποιουδήποτε υφιστάμενου φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο ή φέρουσα τοιχοποιία είναι σημαντικό να γίνει μία έρευνα όσο αφορά την τεκμηρίωση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του υπό μελέτη κτιρίου. Ο μελετητής μηχανικός οφείλει να έχει άριστη γνώση του αντικειμένου που μελετάει καθώς η εργασία αυτή είναι ιδιαίτερα απαιτητική και θα πρέπει να γίνεται με την απαραίτητη προσοχή.. Μία άστοχη εκτίμηση των ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν την κατασκευή μπορεί να οδηγήσει στην υπερεκτίμηση των αντοχών του υφιστάμενου φορέα με αποτέλεσμα την εμφανιση απρόσμενων βλαβών υπό την επιβολή των δράσεων σχεδιασμού. Αντίθετα, μία υποεκτίμηση των αντοχών μπορεί να οδηγήσει στην υπερδιαστασιολόγηση των επεμβάσεων που θα προταθούν που ίσως να επιφέρει την αδυναμία της εκπόνησης της αποκατάστασης από τον κύριο του έργου, Για αυτό συνίσταται για την εξάλειψη των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν εν γένη σε μία τέτοια διαδικασία, όσο αφορά το τρόπο δόμησης και τα υλικά της κατασκευής (μηχανικές ιδιότητες, βαθμός διάβρωσης υλικών κ.α.) του εκάστοτε κτιρίου να γίνονται διερευνητικές ενέργειες για τον επαρκή προσδιορισμό τους.

Βασικές ενέργειες για την διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υφισταμένου κτιρίου είναι η αναζήτηση του ιστορικού του κτιρίου από τις αρμόδιες υπηρεσίες (πολεοδομία, αρχαιολογία κ.α.). Αυτό το βήμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την τεκμηρίωση των κατασκευαστικών φάσεων του φορέα, την εκτίμηση των αναμενόμενων υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την δόμηση του φορέα και την πιθανή καταγραφή τυχόν βλαβών που έχει παρουσιάσει ο φορέας ανά τα χρόνια, με τις αντίστοιχες επιδιορθώσεις που έχουν λάβει χώρα. Άλλο ένα σημαντικό μέρος της διαδικασίας διερεύνησης είναι η λεπτομερής αποτύπωση του υπό μελέτη κτιρίου αν δεν υπάρχουν σχέδια ή η διαπίστωση της εφαρμογής των σχεδίων που είναι διαθέσιμα από προηγούμενες μελέτες..

Όσο αφορά την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που έχει κατασκευασθεί ο φορέας μπορούν να εφαρμοσθούν μη καταστρεπτικές μέθοδοι προσδιορισμού των υλικών (υπέρηχοι, κρουσιμέτρηση, μέθοδος OMA) ή οπτική αναγνώριση των υλικών μέσω της αποκάλυψης τμημάτων των δομικών μελών βάση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Η παραπάνω διαδικασία της αποκάλυψης των

δομικών μελών μπορεί να εφαρμοστεί και για την διαπίστωση του τρόπου δόμησης και σύνδεσης των μελών. Στις επόμενες υποενότητες θα αναλυθούν περαιτέρω τα βήματα που αναφέρθηκαν στον παρόν εδάφιο.

7.1 Αποτύπωση φορέα

Η ακριβής αποτύπωση της γεωμετρίας του υφισταμένου κτιρίου αποτελεί ένα από τα πιο βασικά μέρη της διαδικασίας της μελέτης στατικής επάρκειας. Ο μελετητής μηχανικός οφείλει να γνωρίζει τις βασικές αρχές λειτουργίας καθώς και της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί με τον εξοπλισμό που χειρίζεται. Σε περίπτωση που υπάρχουν σχέδια του εξεταζόμενου κτιρίου αρκεί να διαπιστωθεί αν τηρείται η γεωμετρία του φορέα. Σε αντίθετη περίπτωση κρίνεται απαραίτητη η σύνταξη αναλυτικών σχεδίων (όψεων, τομών, κατόψεων) όπου να αποτυπώνεται τόσο η γεωμετρία του κτιρίου όσο και των μελών που αποτελούν τα φέροντα στοιχεία του κτιρίου.

Ο εξοπλισμός που επιλέγεται πρέπει να είναι κατάλληλος για τις ειδικές απαιτήσεις που προκύπτουν κατά την αποτύπωση ενός κτιρίου. Αρκετά δύσκολα δομικά στοιχεία προς αποτύπωση αποτελούν, όσο αφορά τους ναούς, η κόγχη και ο θόλος. Σε τέτοιου είδους κτίρια συνίσταται η χρήση προηγμένων ψηφιακών μέσων αποτύπωσης όπως είναι το total station, 3D Laser scanner και drones. Η χρήση αναλογικών μέσων όπως είναι η μετροταινία συνίσταται να αποφεύγεται όσο αφορά την αποτύπωση καμπύλων στοιχείων καθώς πολύ εύκολα μπορεί να γίνει εσφαλμένη εκτίμηση των διατομών του μελετώμενου κτιρίου. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του ακόλουθου εξοπλισμού κατά περίπτωση για την αποτύπωση των μελετώμενων ναών:

- Μετροταινία
- Total station (Μοντέλο Hi-Target HTS-420R)
- 3D laser Scanner
- Laser απονστασιόμετρο Leica 3d Disto για αποτύπωση εσωτερικών χώρων.

- Χρήση Drones για την εξαγωγή ορθοφωτογραφιών.

Επειδή ξεφεύγει από το πλαίσιο του σκοπού της συγκεκριμένης εργασίας η εξήγηση των αρχών λειτουργίας του εκάστοτε εξοπλισμού, θα αρκεστούμε στην ονομαστική αναφορά του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.

7.2 Τεκμηρίωση μηχανικών χαρακτηριστικών και τρόπου δομήσεως του φορέα

Η τεκμηρίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας καθώς και του τρόπου δόμησης της αποτελούν διαδικασίες αρκετά απαιτητικές.

(ΟΑΣΠ,2022) Κατά την διερεύνηση του τρόπου δόμησης της κατασκευής πρέπει να γίνουν κατανοητές οι κατασκευαστικές φάσεις της κατασκευής αλλά και οι συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων. Ανάλογα της σπουδαιότητας και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του μελετώμενου κτιρίου μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες εργασίες για την διαπίστωση του τρόπου δομήσεως της τοιχοποιίας:

- Σε περίπτωση που το κτίριο ή τμήμα κτιρίου έχει καταρρεύσει μπορεί να διαπιστωθεί ο τρόπος δόμησης τους φέροντος οργανισμού με οπτική παρατήρηση.
- Σε περίπτωση που είναι εφικτό να αφαιρεθούν οι κάσες από τα πλαίσια των ανοιγμάτων μπορεί να παρατηρηθεί ο τρόπος δόμησης μέσω οπτική παρατήρησης.
- Ένας εναλλακτικός τρόπος είναι σε κάθε όψη να γίνει αφαίρεση μικρού μέρους των λίθων ώστε να διαπιστωθεί ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας.(Μετά την παρατήρηση οι λίθοι που αφαιρέθηκαν θα πρέπει να επανατοποθετηθούν εκ νέου στην τοιχοποιία).
- Σε άλλη περίπτωση, γίνεται πυρηνοληψία σε χαρακτηριστικές θέσεις της τοιχοποιίας, όπου με οπτική παρατήρηση των πυρήνων γίνεται αντιληπτός ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας.

-
- Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η εφαρμογή οποιασδήποτε από τις άνω μεθόδους, συνίσταται η διαπίστωση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας μέσω ραντάρ και ενδοσκοπήσεων.
 - Μπορεί να γίνει συσχέτιση με τον τρόπο δομήσεως γειτονικών κτιρίων αν διαπιστώνεται ότι έχουν κοινό τρόπο δομήσεως.

Σημείωση: Σε περίπτωση που είναι δυνατή η αφαίρεση τμήματος των επιχρισμάτων που βρίσκονται επί της τοιχοποιίας ή η τοιχοποιία είναι ανεπίχριστη, τα αποτελέσματα του τρόπου δομήσεως της γίνονται πιο αξιόπιστα.

Οι παραπάνω διαδικασίες χρησιμοποιούνται στην διαπίστωση χρήσης ειδικών μελών από μέταλλο ή από ξύλο ή και την διαπίστωση του τρόπου σύνδεσης της τοιχοποιίας. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και για την τεκμηρίωση των τυχών κατασκευαστικών φάσεων του φέροντος οργανισμού

7.3 Μέθοδοι τεκμηρίωσης της δομής και των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας

Στην σύγχρονη εποχή υπάρχει μεγάλο πλήθος δοκιμών όπου μπορούν να βρουν εφαρμογή για την αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης ενός κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία. Οι μέθοδοι αυτές κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, δηλαδή ως «καταστρεπτικές μέθοδοι» και ως «Μη καταστρεπτικές μέθοδοι». Οι μέθοδοι αυτές ανανεώνονται-αναβαθμίζονται διαρκώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Παρακάτω θα γίνει μία συνοπτική περιγραφή των βασικών μεθόδων που εφαρμόζονται τη σημερινή εποχή.

7.3.1 Καταστρεπτικές μέθοδοι

Καταστρεπτικές μέθοδοι ορίζονται ως οι μέθοδοι εκείνες που εφαρμόζονται είτε με την λήψη πυρήνων από το υπό εξέταση υλικό, με σκοπό κυρίως το καθορισμό της δομής αλλά και της θλιπτικής αντοχής του. Τα δοκίμια τα οποία δημιουργούνται στο εργαστήριο με τον ίδιο τρόπο και υλικά από τα οποία δομείται η κατασκευή, για τον προσδιορισμό τα αντοχής του μέτρου ελαστικότητας του υλικού ή του συνόλου της τοιχοποιίας.

Επιγραμματικά αναφέρονται οι δοκιμές που έχουν αναπτυχθεί όσον αφορά την αποτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας. Αναλυτικότερα οι πιο διαδεδομένες είναι: η πυρηνοληψία και η μέθοδος των επίπεδων γρύλων. Επίσης σε αυτήν την κατηγορία μπορούν να ενταχθούν οι παρακάτω δοκιμές εργαστηρίου : δοκιμή θλιπτικής αντοχής λιθοσώματος ή κονιάματος, δοκιμή εφελκυστικής και διατμητικής αντοχής κονιάματος, δοκιμές ενεμάτων, μέτρηση θλιπτικής αντοχής σε τοιχίσκους, η δοκιμή διαγώνιου εφελκυσμού και δοκιμή σε σεισμικό προσομοιωτή. Στην παρούσα εργασία εφαρμόσθηκε η δοκιμή αποτίμησης θλιπτικής αντοχής λίθων κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ-EN192 όπου και θα περιγραφεί αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

7.3.1.1 Δοκιμή θλίψης- Πρότυπο ΕΛΟΤ-EN 1926

(Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης,2006) Η συγκεκριμένη δοκιμή δημιουργήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής πετρωμάτων έναντι μονοαξονικής θλίψης.. Συνοπτικά για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η κατάλληλη διαμόρφωση δοκιμίων τα οποία εν συνεχεία τοποθετούνται σε ειδική συσκευή για την εκτέλεση της δοκιμής (βλέπε Εικόνα 7.1). Η θέση που τοποθετούνται τα δοκίμια είναι στο κέντρο της συσκευής. Κατόπιν εφαρμόζεται στο δοκίμιο φόρτιση η οποία σταδιακά αυξάνεται με σταθερό ρυθμό έως ότου επέλθει η αστοχία του.

(Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης,2006) Η διαμόρφωση των δοκιμίων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν κυλινδρικό σχήμα και αναλογία διαστάσεων $H/D \geq 2$, όπου H το ύψος και D η διάμετρος του δοκιμίου. Η ελάχιστη διάμετρος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 54mm και πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το μέγιστο μέγεθος κόκκου του υπό δοκιμή πετρώματος. Οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες με ανοχή 0.02mm, κάθετες στο διαμήκη άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Η πλευρική επιφάνεια πρέπει να είναι λεία, με απόκλιση όχι περισσότερο από 0.3mm. Πριν την διεξαγωγή της δοκιμής



Εικόνα 7.1. Πειραματική διάταξη δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Geotech,2023)

τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν ξηρανθεί σε θερμοκρασία $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$, για χρόνο $(24 \pm 2)\text{h}$ μέχρι όπου η διαφορά μεταξύ δύο διαφορετικών μετρήσεων της μάζας τους, να είναι μικρότερη από 0.1%.

(Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης, 2006) Πριν την εκτέλεση της δοκιμής είναι απαραίτητο να μετρηθούν οι διαστάσεις των δοκιμίων με ακρίβεια 0,1mm η διάμετρος του ενώ το ύψος του με ακρίβεια 1,0mm. Η τοποθέτηση του δοκιμίου γίνεται στο κέντρο της διάταξης. Κατόπιν εφαρμόζεται φόρτιση στο δοκίμιο με σταθερό ρυθμό αύξησης $(1 \pm 0,5)\text{Mpa/s}$. Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου καταγράφεται με ακρίβεια 10KN.

(Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης, 2006) Η μέγιστη θλιπτική τάση του δοκιμίου υπολογίζεται από την σχέση: $R = \frac{F}{A}$ όπου F η μέγιστη δύναμη που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο, A το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα θα πρέπει να είναι με ακρίβεια 1Mpa. Η αντοχή έναντι μονοαξονικής θλίψης του εξεταζόμενου πετρώματος αποτελεί τον μέσο όρο των μεγίστων αντοχών που παρουσίασαν τα επιμέρους δοκίμια που εξετάστηκαν.

7.3.2 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι

(Σπυράκος Κ., 2019), Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου και αποτίμησης των δυναμικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας. Ως μη καταστρεπτική μέθοδος ορίζεται εκείνη που δεν προκαλεί οποιασδήποτε είδους βλάβη στο υπό εξέταση δοκίμιο ή κτίριο. Ονομαστικά αναφέρονται οι πιο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι που είναι: Μέτρηση εύρους ρωγμών (ρωγμόμετρο), η χρήση ραντάρ, η χρήση υπερήχων, η θερμογραφική μέθοδος, η μέθοδος της ενδοσκόπησης η ραδιογραφία, η σφύρα Schmidt και η μέθοδος OMA. Εξ αυτών θα γίνει περιγραφή των μεθόδων εκείνων που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής στις παρακάτω ενότητες

7.3.2.1 Μέθοδος με χρήση υπερήχων

(Καραντώνη Φ., 2012) Η μέθοδος των υπερήχων παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται σε ομογενή υλικά για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η φέρουσα τοιχοποιία σε πολλές περιπτώσεις αποτελείται από ποικίλα υλικά όπως είναι το

αρμολόγημα, το επίχρισμα, και λίθοι από διαφορετικών είδη δηλαδή αποτελεί ανομοιογενές υλικό. Για τον λόγο αυτής της ανομοιογένειας της τοιχοποιίας τα αποτελέσματα που εξάγονται δεν είναι πολύ ακριβή. Για την ταυτοποίηση των υλικών της τοιχοποιίας η μέθοδος χρησιμοποιεί την βασική αρχή ότι διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετική ταχύτητα διάδοσης κυμάτων, όντας χαρακτηριστική τιμή και μοναδική για το κάθε υλικό. Το σύστημα των υπερήχων που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε παθητικό είτε ενεργητικό. Το παθητικό μπορεί να καταγράψει τα κύματα την στιγμή που δημιουργείται η ρωγμή ενώ το ενεργητικό αποτελείται από ένα σύστημα πομπού και δέκτη. Στο ενεργητικό σύστημα ο πομπός παράγει ένα υψίσυχνο ήχο όπου λαμβάνεται από το δέκτη.

Τα είδη των κυμάτων είναι τρία τα διαμήκη, τα εγκάρσια και τα επιφανειακά. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές τους:

$$\text{Ταχύτητα διαμηκών κυμάτων: } v_p^2 = \frac{E}{\rho} \frac{g(1-\eta)}{\rho(1+\eta)*(1-2\eta)}$$

$$\text{Ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων: } v_s^2 = \frac{G}{\rho} \frac{gE}{2\rho(1+\eta)}$$

$$\text{Ταχύτητα επιφανειακών κυμάτων: } v_R^2 = k^2 * v_s^2$$

Όπου : v_p , v_s , v_R είναι η ταχύτητα των διαμηκών, εγκάρσιων και επιφανειακών κυμάτων αντίστοιχα, E και G είναι το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης του υλικού, ρ η πυκνότητα του υλικού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και η ο λόγος Poisson.



Εικόνα 7.2. Συσκευή υπερήχων (ιδία επεξεργασία)

7.3.2.2 Σφύρα Schmidt (κρουσίμετρο)

(Καραντώνη Φ.,2012) Η μέθοδος της σφύρας Schmit βασίζεται στην συσχέτιση της αντοχής του εξεταζόμενου στοιχείου (λίθος ή κονίαμα στην περίπτωση της φέρουσα τοιχοποιίας) με την σκληρότητα που δύνανται να διαθέτει. Η μέθοδος εφαρμόζεται και σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Κατά την εφαρμογή της δοκιμής είναι απαραίτητο η επιφάνεια όπου τοποθετείται κάθετα η συσκευή, να είναι λεία. Η συσκευή χρησιμοποιεί μία απλή διάταξη μάζας και ελατηρίου όπου έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια που εξετάζεται ώστε να προσδιορισθεί η αντοχή της. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι η διασπορά των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μπορεί να είναι $\pm 20\%$, οπότε κατά συνέπεια θα πρέπει να εξετάζονται με κριτική σκέψη οι μετρούμενες τιμές.



Εικόνα 7.3. Συσκευή Κρουσιμέτρησης (Total station,2023)

7.3.2.3 Μέθοδος OMA (Operational modal analysis)

(Zahid F. κ.α., 2020) Η μέθοδος operational modal analysis (OMA),αποτελεί μία μέθοδο προσδιορισμού των δυναμικών χαρακτηριστικών μίας κατασκευής. Επειδή ο προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής, διεγείροντας την είναι αρκετά δύσκολο να εφαρμοστεί στην πραγματικότητα, η μέθοδος αξιοποιεί τα κύματα- δονήσεις που διαδίδονται στο περιβάλλον όπως είναι για παράδειγμα ο αέρας η κίνηση των οχημάτων κ.α. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάζονται από αυτοματοποιημένους αλγόριθμους και τελικά αποδίδουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να βασίζονται σε ποικίλες μεθόδους και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ονομαστικά μερικές εξ αυτών :

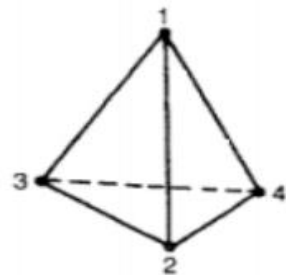
- Peak Picking (PP)
- Frequency domain decomposition (FDD)

- Time domain decomposition (TDD)
- Natural excitation technique (NEXT)
- Auto regressive moving average (ARMA)
- Stochastic subspace identification (SSI)

(Magalhaes F.) Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της μεθόδου Peak. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά απλή και γρήγορη όπου σε αυτήν καταγράφονται τα διάφορα τοπικά μέγιστα των καταγραφών του επιταχυνσιογράφου. Ουσιαστικά αυτά τα μέγιστα αποτελούν τις φυσικές ιδιοσυχνότητες του κτιρίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη και ακριβής αλλά στην περίπτωση που τα μέγιστα που παρουσιάζονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους ίσως τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν να είναι εσφαλμένα. Οπότε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κατά περίπτωση είναι πολύ σημαντική.

8. Παραδοχές μοντελοποίησης

8.1 Πεπερασμένα στοιχεία



Τετράεδρο

Εικόνα 8.1. Τετραεδρικό πεπερασμένο στοιχείο με 4 κόμβους (Χελιντον Σ., 2018)

Η μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί μία μέθοδο η οποία έχει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους της μηχανικής. Η προσομοίωση κτιριακών κατασκευών μπορεί να επιτευχθεί με ικανοποιητικά ακριβή αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή.

Στην παρούσα εργασία η διακριτοποίηση που επιλέχθηκε έγινε έπειτα από διάφορες δοκιμές και αναλύσεις προκαταρκτικών μοντέλων ώστε να γίνει η όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση των φορέων που μελετήθηκαν. Το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκε είναι τετραεδρικό με τέσσερις κόμβους και 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Επιλέχθηκε τα στοιχεία αυτά να έχουν μέγιστο μήκος πλευρών 0,3m. Η επιλογή έγινε τόσο για να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης του μοντέλου όσο και για να εξαχθούν αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας.. Γενικά παρατηρήθηκε πύκνωση στην διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων κυρίως στις περιοχές αλλαγής της γεωμετρίας (π.χ. ανοίγματα) και στα σημεία όπου έγιναν επεμβάσεις, με το όριο

αναλογίας των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων να παραμένει στα θεμιτά όρια πάντα.

8.2 Αναλύσεις γραμμική- μη γραμμική

(ΟΑΣΠ,2022) Η αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας ενός υφιστάμενου φορέα από φέρουσα τοιχοποιία αποτελεί αρκετά απαιτητική διαδικασία. Όντας από την φύση της η σύσταση της φέρουσας τοιχοποιίας από ανομοιογενές υλικό, δημιουργείται μία δυσκολία όσο αφορά τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις λόγω μη καταγραφής, στις περισσότερες περιπτώσεις, του ιστορικού των δομικών βλαβών της κατασκευής, υπάρχει μία εγγενής δυσκολία στην κατανόηση της συμπεριφοράς του φέροντος οργανισμού σε προηγούμενες φορτίσεις. Άλλη μία δυσκολία έγκειται στη διεξακρίβωση του τρόπου συνδέσεως των διαφόρων μελών

της, καθώς και στον τρόπο θεμελίωσης του φορέα. Έχοντας τα παραπάνω υπόψιν, οι δυο τρόποι με τους οποίους μπορεί να αναλυθεί υπολογιστικά μία κατασκευή μπορεί να είναι είτε με γραμμική είτε με μη γραμμική.

(ΟΑΣΠ,2022) Στις γραμμικές μεθόδους ανάλυσης μπορούν να προσομοιωθεί επαρκώς η συμπεριφορά της κατασκευής. Ουσιαστικά σε αυτού του είδους τις αναλύσεις ο φορέας θεωρείται ότι δεν λαμβάνει πλαστικές παραμορφώσεις έχοντας ουσιαστικά σταθερή πλαστιμότητα. Αυτή η φιλοσοφία αναλύσεων μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την κατασκευή όσο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή αλλά όχι πέραν αυτής. Δηλαδή για τα φαινόμενα σχεδιασμού δεν μπορούν να εξαχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς στην κατασκευή λαμβάνουν χώρα μόνιμες παραμορφώσεις-μετακινήσεις που επηρεάζουν την τελική πλαστιμότητα του φορέα.

(ΟΑΣΠ,2022)Από την άλλη οι μη γραμμικές μέθοδοι ή διαφορετικά ανελαστικές μέθοδοι ανάλυσης μας επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα υπό την φόρτιση των δράσεων σχεδιασμού. Με άλλα λόγια οι συγκεκριμένες μέθοδοι, αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κατασκευών καθώς μέσω αυτών μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα όσο αφορά τους μηχανισμούς αστοχίας που θα παρουσιαστούν στην κατασκευή.

8.3 Φορτίσεις

8.3.1 Στατικές φορτίσεις

Οι συνδυασμοί φόρτισης που επιβλήθηκαν στην κατασκευή ήταν όσο αφορούσε τις στατικές φορτίσεις $1G+0,3Q$, όπου G το ίδιο βάρος της κατασκευής και $Q = 1 \text{ KN/m}^2$ τα κινητά φορτία επί της κατασκευής.

8.3.2 Δυναμικές φορτίσεις

8.3.2.1 Γραμμική ανάλυση

Επειδή σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να παρουσιαστεί το κανονιστικό πλαίσιο του ΚΑΔΕΤ(2022) και του EN1998-3:2005 θα παρατεθούν οι παραδοχές μόνο της παρούσας μελέτης. (ΟΑΣΠ,2022) Το φάσμα σχεδιασμού της οριζόντιας συνιστώσας του σεισμού υπολογίστηκε σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές:

1. Η σεισμική ζώνη της περιοχής είναι 2. Κατά συνέπεια προκύπτει: $\alpha = 0.24$
2. Η κατηγορία σπουδαιότητας της κατασκευής είναι Σ_2 . Άρα: $\gamma_1 = 1.00$
3. Παραδοχή κατηγορίας εδάφους Β. Συνεπώς οι χαρακτηριστικές περίοδοι είναι $S = 1.00$, $T_B = 0.15sec$
, $T_c = 0.50sec$ και $T_D = 2.00sec$
4. Ο συντελεστής q για άοπλη τοιχοποιία είναι $q = 1.5$
5. Ο συντελεστής $\eta = 1$
6. Το ποσοστό απόσβεσης σε άοπλη τοιχοποιία είναι $\xi = 5\%$
7. Ο λόγος $\frac{\alpha_{g,ref}}{a_g} = 1$ όπου $\alpha_{g,ref}$ είναι η οριζόντια εδαφική επιτάχυνση αναφοράς, που ορίζεται με πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης 10% τα 50 χρόνια συμβατικής ζωής του έργου, a_g είναι η οριζόντια εδαφική επιτάχυνση, που αναφέρεται στην αντίστοιχη του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών της σεισμικής δράσης με την αντίστοιχη ανηγμένη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση

Οι συνδυασμοί των σεισμικών δράσεων που επιλέχθηκαν να επιβληθούν στις κατασκευές που θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι $1X+0.3Y$, $-1X+0.3Y$, $0.3X+1Y$ και $-0.3X-1Y$, θεωρώντας την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού αμελητέα. Με αυτόν το τρόπο λαμβάνεται ουσιαστικά κάθε φορά διαφορετικό ποσοστό της σεισμικής επιτάχυνσης ότι δρα στην κατασκευή και σε διαφορετική διεύθυνση,

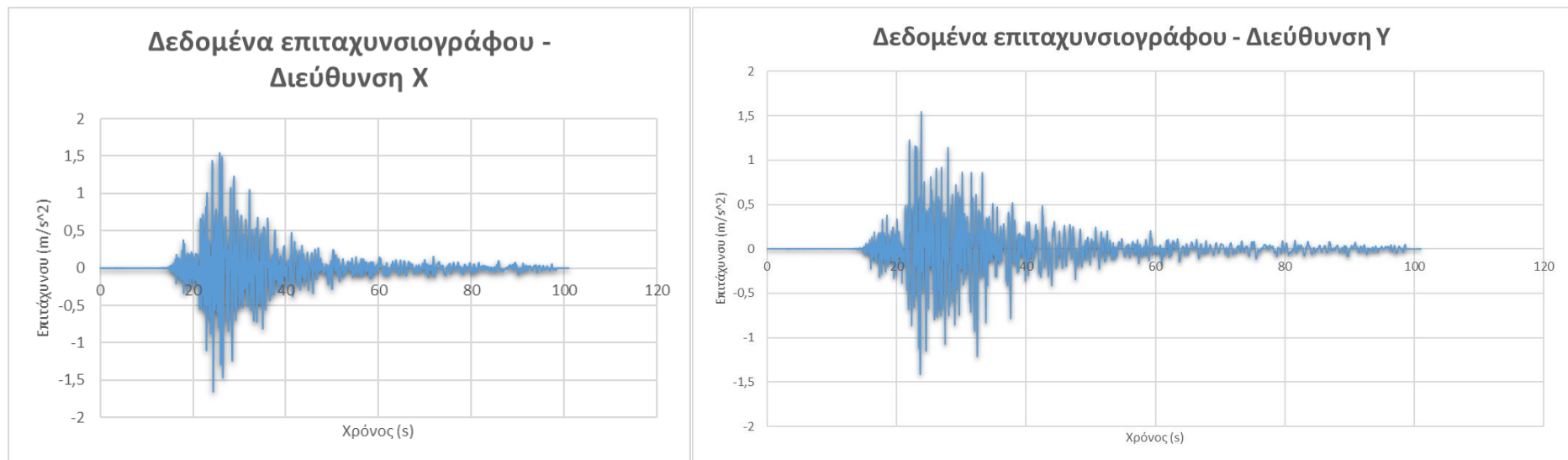


Εικόνα 8.2. Φάσμα σχεδιασμού (Ιδία επεξεργασία)

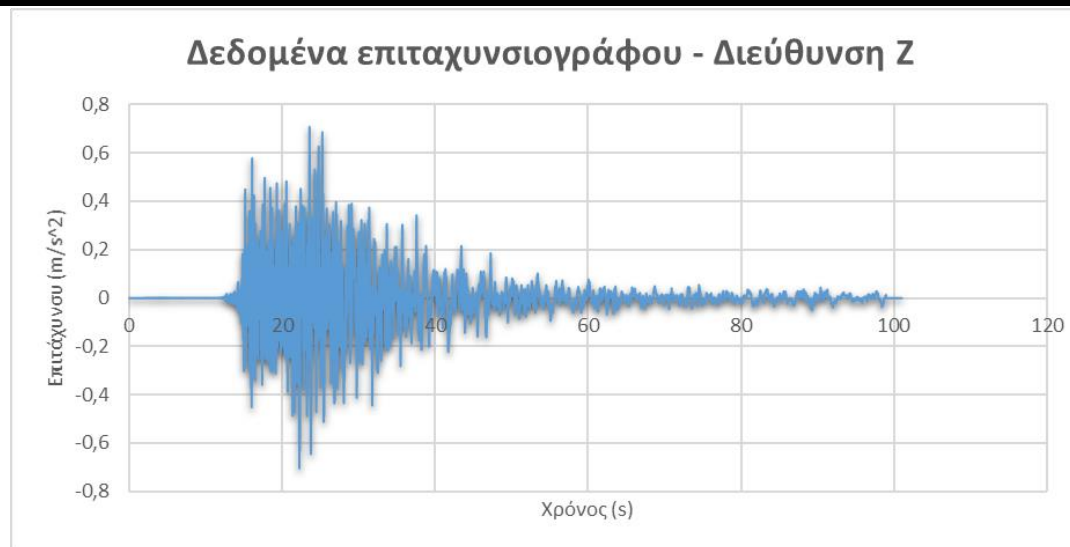
8.3.2.2 Μη γραμμική ανάλυση

Ανελαστική δυναμική ανάλυση με χρονιοιστορία βάσης

Η δυναμική ανάλυση με χρονιοιστορία βάσης (μερικές φορές αποκαλείται ανάλυση στο χρόνο) είναι μία ανάλυση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δυναμικής απόκρισης μιας κατασκευής υπό την δράση σεισμικών δράσεων από πραγματικές καταγραφές είτε από συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα. Η συγκεκριμένη ανάλυση συνίσταται να γίνεται σε συνδυασμό με την διενέργεια μιας «ανελαστικής στατικής ανάλυσης». Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μόνο η ανελαστική δυναμική ανάλυση. Επιπλέον καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε ήταν εκείνη της σεισμικής διέγερσης που έλαβε χώρα στην Ζάκυνθο κατά το έτος 2018. Η συγκεκριμένη διέγερση είχε μέγεθος 6.8 βαθμούς της κλίμακας ρίχτερ.



Εικόνα 8.3. Δεδομενα επιταχυνσιογράφου για το σεισμό της Ζακύνθου που έλαβε χώρα το 2018 ,
για τις διευθύνσεις X,Y (ΙΤΣΑΚ,2018)



Εικόνα 8.4. Δεδομένα επιταχυνσιογράφου για το σεισμό της Ζακύνθου που έλαβε χώρα το 2018 ,
για την διεύθυνση Z (ΙΤΣΑΚ,2018)

9. Μελέτες περίπτωσης

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η αναφορά των αποτελεσμάτων από τις αυτοψίες που πραγματοποιήθηκαν σε μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς στο νομό Χανίων. Η ενότητα εκείνη βασίστηκε στην οπτική επιθεώρηση και μέτρηση των επιμέρους διαστάσεων τους. Συμπληρωματικά κατά περίπτωση, έγιναν μετρήσεις των αντοχών των δομικών λίθων για την εκτίμηση των μηχανικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας. Στην παρούσα ενότητα επιλέχθηκαν οι ναοί εκείνοι που παρουσίαζαν τις πιο χαρακτηριστικές δομικές βλάβες. Οι ναοί αυτοί ήταν ο Άγιος Γεώργιος ο Μορμόρης που βρίσκεται στα Νεροκούρου, ο Προφήτης Ηλίας που βρίσκεται στις Μουρνιές και η Παναγία η Κερά που βρίσκεται στην Αγία Ρουμέλη. Σκοπός των αναλύσεων που θα παρατεθούν στην συνέχεια είναι ο προσδιορισμός των αιτιών που οδήγησαν στην εμφάνιση των δομικών βλαβών του εκάστοτε ναού.

9.1 Μελέτη περίπτωση Παναγία η κερά που βρίσκεται στην Αγία Ρουμέλη

9.1.1 Γενική Περιγραφή

Η εκκλησία της Παναγίας της Κεράς βρίσκεται στο οικισμό της Αγίας Ρουμέλης, και ειδικότερα στην έξοδο του περιπατητικού μονοπατιού του Φαραγγιού της Σαμαριάς. (Παπαλέξη Χ.,2017) Η ύπαρξη του οικισμού της Αγίας Ρουμέλης χρονολογείται από τον 8^ο αι. π.Χ. Η αρχαία πόλη ονομαζόταν Τάρρα και υπάρχουν αναφορές για την διατήρηση της σε όλες τις περιόδους (κλασσική, Ελληνιστική , Ρωμαϊκή). Η αρχαία πόλη ήταν αφιερωμένη στο θεό Απόλλωνα Ταρραίο και πιθανολογείται η ύπαρξη ναού αφιερωμένη στο θεό. Στην θέση που εικάζεται ότι βρισκόταν ο ναός του Απόλλωνα κατασκευάστηκε ένας ναός που εντάσσεται στο είδος της «Τρίκλητης Βασιλικής», όντας ξυλόστεγης. Ο ναός αυτός διατηρείται σήμερα σε ερειπιώδη κατάσταση ενώ σώζεται τμήμα του ψηφιδωτού δαπέδου του αρχαίου ναού. Η σημερινή εκκλησία της παναγίας αποτελεί νεότερο οικοδόμημα. Ο ναός αυτός εντάσσεται στο είδος του «Μονόχωρου καμαροσκέπαστου» με το περίγραμμα του να εφάπτεται με το χώρο του ιερού της παλαιότερης τρίκλητης (βλέπε Εικόνα 9.1).



Εικόνα 9.1. Αποψη Παναγίας κεράς στην Αγία Ρουμέλη (ιδία επεξεργασία)

Ο ναός της παναγίας έχει διαστάσεις 5.80μ. πλάτος, 4.54μ. μήκος και ύψος 5.44μ. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε σύγκριση με του υπολοίπους ναούς της περιοχής είναι οι ασυνήθιστες αναλογίες διαστάσεων κόγχης και υπόλοιπου ναού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εγγράφετε στο περίγραμμα της παλαιοχριστιανικής βασιλικής. (Ανδριανάκης Μ.,2008) Η κατασκευή του ναού χρονολογείται περί το 15^ο αιώνα. Ο ναός είχε τοιχογραφηθεί την ίδια περίοδο της κατασκευής του, αλλά μεταγενέστερά λόγω πυρκαγιάς, οι τοιχογραφίες υπέστησαν σοβαρές βλάβες. Σήμερα, διασώζεται μικρό τμήμα των τοιχογραφιών. Το τέμπλο στο εσωτερικό είναι νεότερο και η αγία τράπεζα κτιστή προσαρτημένη στην κόγχη. Στην δυτική όψη του ναού έχει κατασκευαστεί νεότερο κωδωνοστάσιο από σκυρόδεμα. Επιπλέον στην νότια πλευρά του ναού εξωτερικά έχει προσαρτηθεί αρκοσόλιο στο οξυκόρυφο τόξο. Νότια της βασιλική σώζεται ένας καμαροσκέπαστος τάφος, ο οποίος πιθανώς

ανήκε σε κάποια διακεκριμένη προσωπικότητα της παλαιοχριστιανικής εποχής. Στην Εικόνα 9.2 παρουσιάζεται συγκριτικά η κατάσταση του περιβάλλοντος χώρου και της εκκλησίας περί τις αρχές του 20^{ου} αιώνα αλλά και κατά το έτος 2023



Εικόνα 9.2. Αριστερά και δεξιά συγκριτικές φωτογραφίες από τον προαύλιο χώρο του ναού της Παναγίας της κεράς κατά τις αρχές του 20^{ου} αιώνα (Gerola G.1905-1932) και κατά το έτος 2023 (ιδία επεξεργασία) αντίστοιχα

9.2 Ιστορικό δομικών βλαβών- Επεμβάσεων

9.2.1 Ιστορικό δομικών βλαβών

Αποτελεί πραγματικότητα πως για τον ναό της Παναγίας έχουν υπάρξει ελάχιστες καταγραφές όσο αφορά την κατάσταση του και τις επεμβάσεις αποκατάστασης που έχουν γίνει ανά τα έτη. Οι καταγραφές που θα παρουσιαστούν στην παρούσα διπλωματική περιορίζονται σε τρεις αναφορές μία σύμφωνα με το αρχείο της Εφορείας Βυζαντινών αρχαιοτήτων κατά το έτος 1997, μία κατά το 2008 από τον Μιχάλη Ανδριανάκη και μία στο πλαίσιο της διεξαγωγής του ερευνητικού προγράμματος « Έρευνα και ανάπτυξη δικτύων επίσκεψης και ανάδειξης του πολιτισμικού τοπίου στο δήμο Σφακίων» κατά το έτος 2020.



Εικόνα 9.3. Στις φωτογραφίες παρουσιάζεται η δυτική όψη του ναού κατά τα έτη, 2008 (Ανδριανάκης Μ.,2008) αριστερά και 2020 δεξιά (Σκουτέλης Ν. κ.α., 2020)

Κατά το έτος 2008, ο Μιχάλης Ανδριανάκης στο βιβλίο « Το φαράγγι της Σαμαριάς-καταφύγιο ζωής ορμητήριο ελευθερίας» παρουσιάζει μία φωτογραφία της δυτικής όψευς της Παναγίας της Κεράς όπου μπορεί να εντοπισθεί η ύπαρξη μίας κάθετης ρωγμής στην μέση περίπου της κόγχης του ναού. Η συγκεκριμένη ρωγμή φαίνεται να διατρέχει καθ' ύψος όλη την τοιχοποιία (βλέπε Εικόνα 9.3).

Το έτος 2020 διαπιστώθηκαν στην δυτική όψη δύο ρωγμές στο μέσον της κόγχης του ναού. Η μία ταυτίζεται με την καταγραφή από το έτος 2008 ενώ η άλλη διατρέχει μόνο το άνω μισό μέρος της τοιχοποιίας καθ' ύψος (βλέπε Εικόνα 9.3). Με μπλε χρώμα στην εικόνα παρουσιάζονται τα σημεία εκείνα που εντοπίζονται οι ρωγμές στον ναό.

9.2.2 Ιστορικό επεμβάσεων

Μόνες γραπτές πηγές ,για την τεκμηρίωση του ιστορικού των επεμβάσεων που έχουν εφαρμοσθεί στον ναό της Παναγίας της Κεράς, βρέθηκαν στο Αρχείο της εφορείας Βυζαντινών αρχαιοτήτων Χανίων). Αναλυτικότερα θα παρουσιαστούν κατά χρονολογική σειρά τα ακόλουθα:

(Αρχείο εφορείας βυζαντινών αρχαιοτήτων Χανίων) Κατά την ημερομηνία 20/6/1997 σε υπογεγραμμένο σημείωμα από τον Μιχάλη Ανδριανάκη, γίνεται αναφορά στην έγκριση της επιχορήγησης ύψους 3.700.000 δραχμών για την αποκατάσταση του ναού της Παναγίας της κεράς. Οι ενέργειες που προβλέφθηκαν να γίνουν ήταν:

- Η αποτύπωση του μνημείου
- Η απομάκρυνση τόσο από το μνημείο όσο και περιμετρικά της βλάστησης και των σωρών από λίθους με σκοπό την ανάδειξη του μνημείου
- Η απομάκρυνση των προϊόντων της κατάρρευσής από το εσωτερικό και των λαξευτών δομών
- Συγκέντρωση των δομών του αρχαίου ναού σε ξεχωριστή θέση στον περιβάλλοντα χώρο
- Καθαίρεση του χωμάτινου δώματος και των ετοιμόρροπων τμημάτων της νεότερης τοιχοποιίας

- Στερέωση των επικίνδυνων τμημάτων της αρχικής τοιχοποιίας και στεγάνωση του θόλου του ναού
- Σύνταξη μελέτης αποκατάστασης

(Αρχείο εφορείας βυζαντινών αρχαιοτήτων Χανίων) Κατά την ημερομηνία 25/8/1998 έγγραφο με τίτλο «Διαβίβαση προμελέτης» Αναφέρεται ότι έπειτα από τις εργασίες της Εφορείας Αρχαιοτήτων Χανίων και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν προέκυψε προϋπολογισμός 30 εκατομμυρίων δραχμών για τις απαιτούμενες εργασίες αποκατάστασης, προστασίας και ανάδειξης του ναού.

(Αρχείο εφορείας βυζαντινών αρχαιοτήτων Χανίων) Σε υπογεγραμμένη τεχνική έκθεση για την αποκατάσταση του ναού από τον Φίλιππο Τσαγάκη, χωρίς ημερομηνία και πιθανόν κατά το έτος 1998, περιγράφονται οι ακόλουθες εργασίες με σκοπό την αποκατάσταση και ανάδειξη το μνημείου:

- 1) Καθαρισμός, ανασκαφή και απομάκρυνση υλικών του περιβάλλοντος χώρου
- 2) Καθαρισμός, ανασκαφή εντός του ναού
- 3) Καθαίρεση δωματίων και δεξαμενής
- 4) Συντήρηση ψηφιδωτών, τοιχογραφιών και τέμπλου
- 5) Καθαίρεση και ανακατασκευή αψίδας ιερού και δίλοβου παραθύρου
- 6) Στερέωση τοιχοποιίας και τοπικές ανακατασκευές
- 7) Πλακόστρωση εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντος χώρου
- 8) Κατασκευή νέων ξύλινων κουφωμάτων

9.2.3 Υφιστάμενη κατάσταση

Ο Ναός της Παναγίας της κεράς διατηρείται σε καλή κατάσταση. Κατά τόπους είναι εμφανείς τριχοειδής ρωγμές τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά του ναού. Το τμήμα της κατασκευής με τις πιο σοβαρές βλάβες αποτελεί η κόγχη του ναού όπου είναι εμφανείς δύο κάθετες καθ' ύψος ρωγμές. Οι συγκεκριμένες ρωγμές έχουν επισκευαστεί εσωτερικά του αλλά παρατηρήθηκε ότι κατά τα έτη 2020-2023 σε δύο διαφορετικές αυτοψίες παρουσιάζονται να έχουν μεγαλώσει. Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά τα σχέδια με τις δομικές βλάβες του ναού.

Τα επιχρίσματα στο εξωτερικό του ναού διατηρούνται με τριχοειδής ρηγματώσεις και αποκολλήσεις ενώ σε πολλά σημεία έχει γίνει ανάπτυξη βιολογικών επικαθήσεων. Στην στέγη έχουν εφαρμοσθεί στεγνωτικά κονιάματα προκειμένου να καλυφθούν οι όποιες ασυνέχειες θόλου. Οι τοιχογραφίες του ναού διατηρούνται ελάχιστα ενώ τα νεότερα επιχρίσματα που έχουν εφαρμοσθεί παρουσιάζουν εκτεταμένης κηλίδας αλάτων, πράγμα που υποδεικνύει την παρουσία του φαινομένου της ανοδικής υγρασίας ή της μη επιτυχημένης στέγνωσης του θόλου. Το δάπεδο διατηρείται σε καλή κατάσταση με τοπικές καθίσεις και στο τέμπλο του ναού εμφανίζονται ελάχιστες φθορές.

Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται τα σχέδια δομικών βλαβών του ναού. Κατά το έτος 2020 στο πλαίσιο της διεξαγωγής του ερευνητικού προγράμματος « Έρευνα και ανάπτυξη δικτύων επίσκεψης και ανάδειξης του πολιτισμικού τοπίου στο δήμο Σφακίων », είχε γίνει αποτύπωση στο ναό, καθιστώντας την έτσι μία από τις κύριες πηγές για την έρευνα του ναού. Στην συγκεκριμένη αποτύπωση έγινε επικαιροποίηση και συμπλήρωση των στοιχείων, καθώς έγιναν μετρήσεις στον ναό με εξειδικευμένο εξοπλισμό κατά τις ημερομηνίες 3-4/6/2023.

9.2.4 Κατασκευαστικές φάσεις

Για την μελέτη της στατική επάρκειας του ναού της Παναγίας είναι σημαντικό να αναγνωριστούν οι οικοδομικές φάσεις δόμησης του. Ο ναός έχει καταλάβει το ιερό της προϋφιστάμενης τρίκλιτης βασιλικής. Είναι μονόχωρος καμαροσκέπαστος με εξωτερικό πλάτος 5.80μ. και μήκος 4.54μ. χωρίς να περιλαμβάνονται οι διαστάσεις τις κόγχης. Η κάτοψη του ξεχωρίζει από άλλους αντίστοιχους ναούς της περιοχής και οφείλεται στην προσαρμογή του στο περίγραμμα του παλαιότερου ναού. Επίσης στο εσωτερικό του ανατολικά και δυτικά έχουν κατασκευασθεί δύο

αψίδες στις γωνίες του ορθογωνίου μέρους της κάτοψης. Στην νότια όψη του ναού βρίσκεται προσκολλημένο αρκοσόλιο και στην βόρεια όψη του ναού έχει κατασκευαστεί ένα διώροφο κελί το οποίο είναι αποκατεστημένο στο πλαίσιο παλαιότερων αποκατάστασεων. Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται σε κάτοψη οι οικοδομικές φάσεις του κτιριακού συνόλου.

9.2.5 Υλικά

9.2.5.1 Κονιάματα

(Μαραβελάκη Ν. 2020) Στον ναό της παναγίας δεν έχει γίνει κάποια ανάλυση εφαρμοσθέντων κονιαμάτων στο κτίριο του ναού που υφίσταται σήμερα. Αντιθέτως, έχει γίνει ανάλυση των κονιαμάτων σε τμήματα από το περίγραμμα των εναπομείνων τοιχοποιιών της παλαιοχριστιανικής βασιλικής. Τα κονιάματα που εντοπίστηκαν και έγινε δειγματοληψία, μπορούν να χαρακτηριστούν σαν δύο ειδών ανάλογα με την χρήση, δηλαδή ως κονίαμα δόμησης και ως κονίαμα αρμών.

(Μαραβελάκη Ν. 2020) Το κονίαμα δόμησης έχει καστανή απόχρωση και αποτελείται ουσιαστικά από ασβέστη με μεγάλη ποσότητα εδαφικού υλικού. Η χημική ανάλυση έδειξε ότι περιέχονται μαγνησίτης και ασβεσίτης. Τα αδρανή του είναι ποικίλων μεγεθών με χρώμα σκούρο γκρι. Το κονίαμα αυτό έχει χαμηλή συνοχή και εμφανίζει έντονες ρηγματώσεις. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μετρήθηκε: $E = 2.31 \text{ GPa}$.

(Μαραβελάκη Ν. 2020) Το κονίαμα των αρμών, έχει καστανή απόχρωση και ασβεστιτική σύσταση δηλαδή μαγνησίτη και ασβέστη. Τα αδρανή είναι μικρού μεγέθους με σκούρα γκρι απόχρωση. Επιπλέον, το κονίαμα εμφανίζεται να έχει χαμηλή συνοχή και έντονες ρηγματώσεις.

9.2.5.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας

Για τον προσδιορισμό των αντοχών των λίθων δόμησης του ναού έγινε δειγματοληψία από τον περιβάλλοντα χώρο του ναού. Η περιοχή δειγματοληψίας των λίθων παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.5 και τα ακατέργαστα δείγματα στην Εικόνα 9.4. Τα πετρώματα από τα οποία έχει δομηθεί ο ναός είναι ασβεστοπηριτικής προέλευσης. Για τον προσδιορισμό των αντοχών των δειγμάτων έγινε εφαρμογή του προτύπου ΕΛΟΤ-ΕΝ 1926 και εφαρμογή της δοκιμής υπερήχων..



Εικόνα 9.4. Φωτογραφίες ακατέργαστων δειγμάτων
(ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 9.5. Θέση δειγματοληψίας λίθων (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 9.6. Διαμορφωμένα δοκίμια(Ιδία επεξεργασία)

Λόγω των μικρών διαστάσεων των δοκιμών απαιτήθηκε να γίνει διόρθωση των αντοχών που προέκυψαν από την δοκιμή θλίψης. Για τον υπολογισμό της διορθωμένης θλιπτικής αντοχής των δοκιμών έγινε χρήση της παρακάτω σχέσης(Uzun E. T. e.t. 2018):

$$\sigma'_c = \frac{\sigma_c}{\frac{b}{h} * 0,24 + 0.88}$$

Όπου: σ_c αξονική θλιπτική αντοχή σε kg/cm^2 , σ'_c η διορθωμένη θλιπτική αντοχή (kg/cm^2), b η διάμετρος του δοκιμίου, h το ύψος του δείγματος

Για τον υπολογισμό της αντοχής των δοκιμών σε θλίψη, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις από την δοκιμή υπερήχων, έγινε χρήση της παρακάτω σχέσης ειδικά για ασβεστοπυριγενή πετρώματα (Sertcelik I., e.t.2017):

$$UCS = 0.0192UPV - 47.806$$

Όπου UCS η θλιπτική αντοχή του δείγματος (Mpa), UPV η ταχύτητα του διαμήκους κύματος (m/s)

Δοκίμια (Α/Α)	Διάμετρος (cm)	Μήκος (cm)	Διατομή (m ²)	Χρόνος μετάδοσης (s)	Ταχύτητα κύματος (m/s) UPV	UCS (Mpa)	σc(Mpa)	σc'(Mpa)
1	4.4	6.3	6.08E-05	0.0000134	4701.49	42.46	55.67	53.13
2	4.4	7.2	6.08E-05	0.0000134	5373.13	55.35	48.46	47.20
3	4.4	9.6	6.08E-05	0.0000206	4660.19	41.66	40.8	41.21
4	4.4	7.4	6.08E-05	0.0000159	4654.08	41.55	37.13	36.30
5	4.4	11.9	6.08E-05	0.0000266	4473.68	38.088	45.53	46.99
6	4.4	7.7	6.08E-05	0.0000135	5703.70	61.70	38.23	37.58
7	4.4	6.8	6.08E-05	0.0000163	4171.77	32.29	25.64	24.76

Πίνακας 9-1. Πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας (ιδία επεξεργασία)

Έτσι προκύπτουν:

- η μέση τιμή της : $UPV_m = 44,73Mpa$ από την πειραματική διαδικασία των υπέρηχων
- και $f_m = 41,02Mpa$ η μέση θλιπτική αντοχή των λίθων όπως προέκυψε από την εφαρμογή του προτύπου ΕΛΟΤ EN-1926

Η απόκλιση των δύο μεθόδων ήταν 8,29%, ενώ προς συντηρητικότερη θεώρηση, για τους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη ότι, η θλιπτική αντοχή των λίθων είναι η μικρότερη από τις δύο.

Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

Δαρμαράκης Παναγιώτης

Για τοιχοποιία με κονίαμα λεπτής στρώσης (0.3-3mm) και ασβεστοπυριτικά λιθοσώματα ισχύει (Τριανταφύλλου Α.,2013):

$$f_k = k * f_b^{0.85}$$

με f_b Θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων, και $k=0.80$ Άρα:

$$f_k = k * f_b^{0.85} = 0.80 * (41,02)^{0.85} = 18.79 \text{Mpa}$$

Μέτρο ελαστικότητας

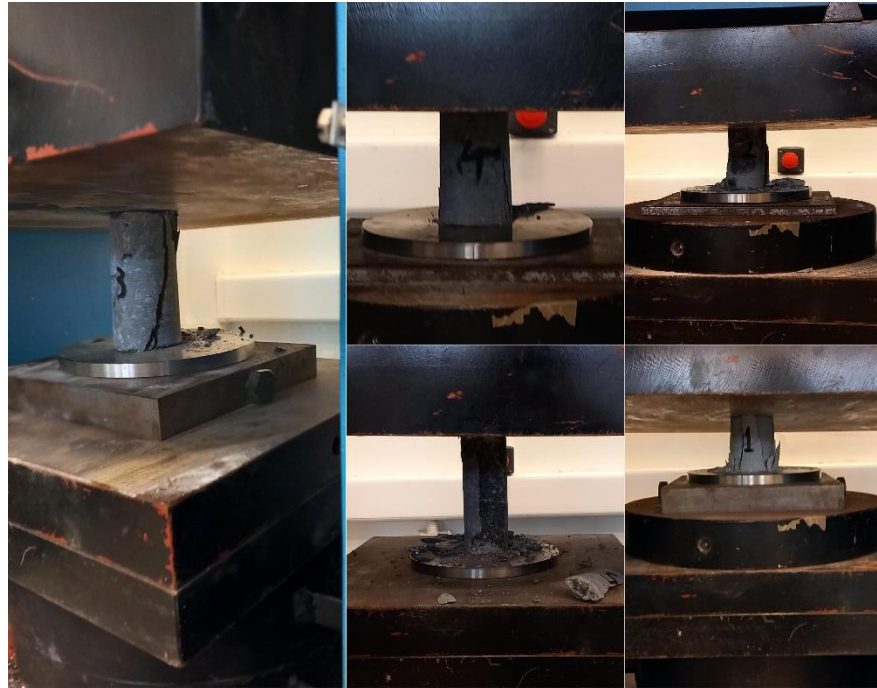
Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_c , το οποίο αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη θλιπτική τάση ίση με το 30% της θλιπτικής αντοχής της f της τοιχοποιίας κυμαίνεται από 300f έως 1200f (Σπυράκος Κ.,2019). Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω παραδοχές για το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας:

Για την τοιχοποιία από λαξευτούς λίθους θεωρήθηκε 900f δηλαδή **$E = 16,91 \text{Gpa}$**

Για την τοιχοποιία από ημιλαξευτούς λίθους θεωρήθηκε 300f δηλαδή **$E = 5,64 \text{Gpa}$**

Πυκνότητα – λόγος poisson

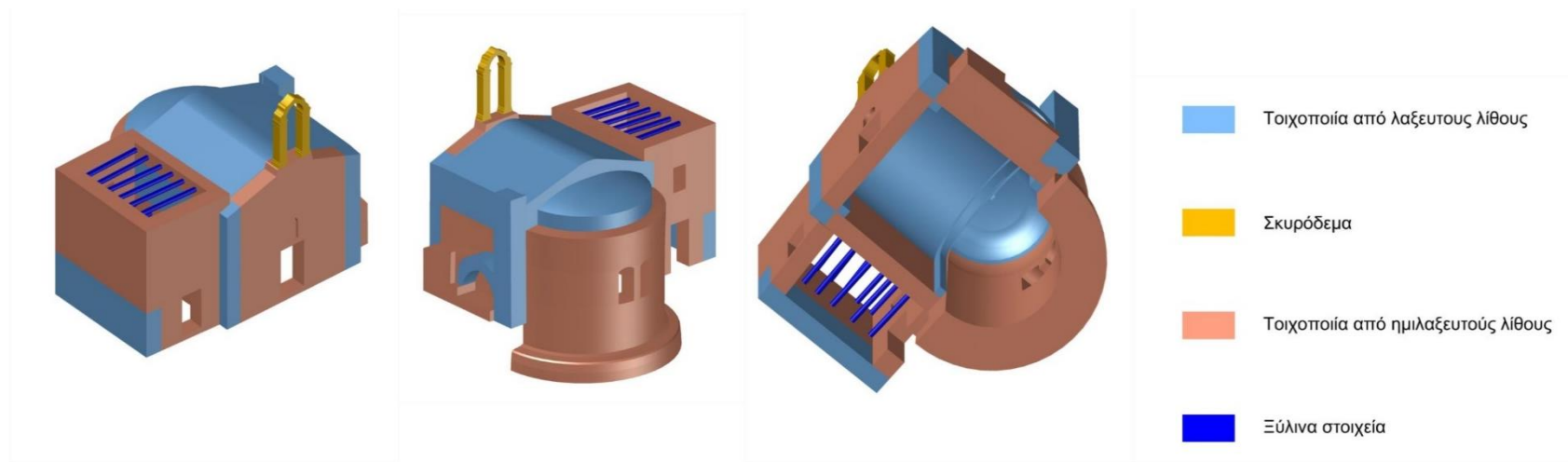
Με βάση το παράρτημα του κεφαλαίου 3 του ΚΑΔΕΤ (2022), η πυκνότητα των λιθοσωμάτων θεωρήθηκε **$p = 2,60 \text{gr/cm}^3$** ενώ ο λόγος poisson $\nu=0.30$



Εικόνα 9.7. Τρόπος αστοχίας δοκιμών (ιδία επεξεργασία)

9.2.5.3 Τρόπος δόμησης τοιχοποιίας ναού

Η διαπίστωση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας του ναού καθίσταται εργασία ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της είναι επιχρισμένο. Στα σχήματα που ακολουθούν παρακάτω, παρουσιάζεται η εκτίμηση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας του ναού και γενικότερα των υλικών δόμησης του ναού (βλέπε Εικόνα 9.8). Οι εκτιμήσεις αυτές προέκυψαν μέσα από παρατήρηση των ανεπίχριστων μερών της τοιχοποιίας κατά τόπους, και από οπτική παρατήρηση του τρόπου δόμησης των γειτονικών κτισμάτων.



Εικόνα 9.8. Διάγραμμα υλικών δόμησης ναού της Παναγίας της κεράς (ιδία επεξεργασία)

9.2.6 Παραδοχές μελέτης- Σενάρια φόρτισης

Το έδαφος θεμελίωσης του ναού της παναγίας της κεράς θεωρήθηκε πως είναι βραχώδες. Η θεώρηση αυτή πηγάζει από την παρατήρηση του χαρακτήρα της περιοχής, όπου ως επί τω πλείστων είναι βραχώδης.

Τα διάφορα μοντέλα της κατασκευής που δημιουργήθηκαν υποβλήθηκαν σε πολλαπλά σενάρια φορτίσεων με σκοπό το προσδιορισμών των αιτιών των δομικών βλαβών που παρουσιάζει ο ναός. Τα σενάρια αυτά ήταν:

- Η ανάλυση του τρόπου με τον οποίο ταλαντώνεται ο φέρων οργανισμός του ναού σε συγκεκριμένες συχνότητες (Ιδιομορφική ανάλυση)
- Ανάλυση υπό την δράση των φορτίων του σεισμού με διενέργει φασματικής ανάλυσης και ανάλυσης χρονοιστορίας
- Επίλυση της κατασκευής για 5 διαφορετικά σενάρια καθιζήσεως

Σκοπός των παραπάνω αναλύσεων είναι η ταυτοποίηση των δομικών βλαβών του φέροντος οργανισμού της κατασκευής και η κατανόηση των αιτιών που έχουν προκληθεί οι δομικές βλάβες του φέροντος οργανισμού.

<i>A/A</i> <i>ιδιομορφής</i>	<i>Ιδιοσυχνότητες Hz</i>	<i>Μέγιστη τιμή της</i> <i>παραμόρφωσης</i> <i>(cm)</i>
1	11.13	0.049
2	22.15	0.007
3	27.68	0.04
4	28.16	0.0044
5	32.91	0.0047
6	36.50	0.0042
7	46.60	0.0038
8	54.66	0.011
9	55.48	0.0073
10	58.04	0.0042
11	60.66	0.0049
12	62.08	0.0065
13	66.98	0.0069
14	68.21	0.01
15	68.98	0.048

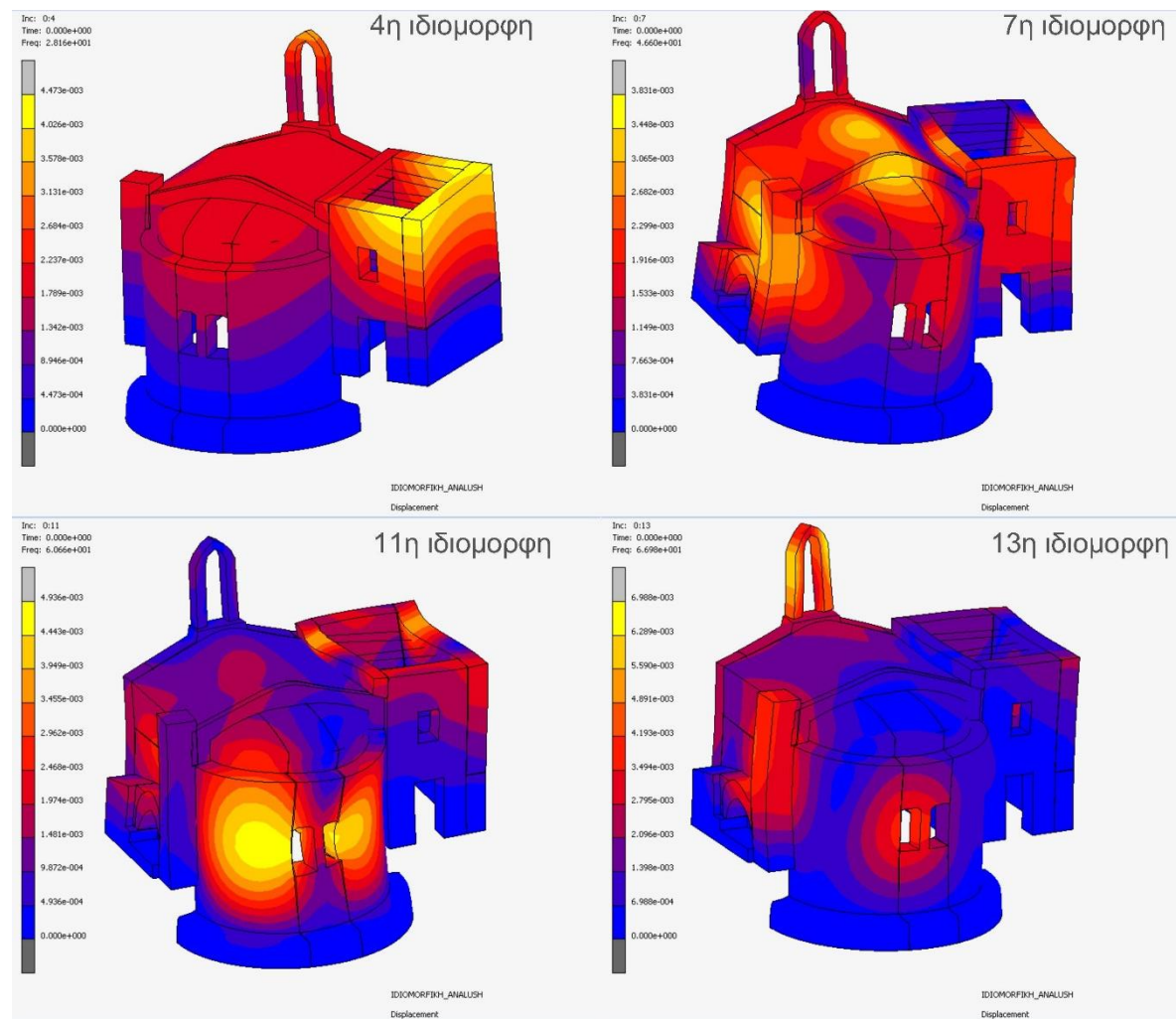
Πίνακας 9-2. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών των 15 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων(Hz) της κατασκευής και των μέγιστων τιμών παραμορφώσεων (m) που εμφανίζει η κατασκευή (ιδία επεξεργασία)

9.2.7 Αποτελέσματα αναλύσεων

9.2.7.1 Ιδιομορφική ανάλυση

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης του φέρον οργανισμού του ναού της Παναγίας της Κεράς. Με άλλα λόγια, θα διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο ταλαντώνεται ο φέρον οργανισμός του ναού υπό συγκεκριμένες συχνότητες . Στον Πίνακα 9-2 παρουσιάζονται οι 15 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής σε συνδυασμό με την μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης.

Το εύρος των 15 πρώτων συχνοτήτων ήταν από 11.13Hz έως 68.98Hz. Αναλυτικότερα, η 4^η ιδιομορφή με συχνότητα 28.16Hz φαίνεται να προκαλεί την εκτός επιπέδου μετακίνηση της διαμήκους τοιχοποιίας του γειτονικού κτιρίου του ναού δηλαδή των κελιών. Η 7^η ιδιομορφή με τιμή συχνότητας 46.60 Hz ενεργοποιεί ταλάντωση, στα σημεία επαφής της κόγχης με τον υπόλοιπο ναό προς το εσωτερικό του ναού. Η 11^η ιδιομορφή με τιμή συχνότητας 60.60Hz διεγείρει τον ναό, με τέτοιο τρόπο ώστε. η κόγχη να ωθείται προς τον βορά. Τέλος, η 13^η ιδιομορφή ταλαντώνει τη κόγχη στο μέσον της και προς το εσωτερικό του ναού.

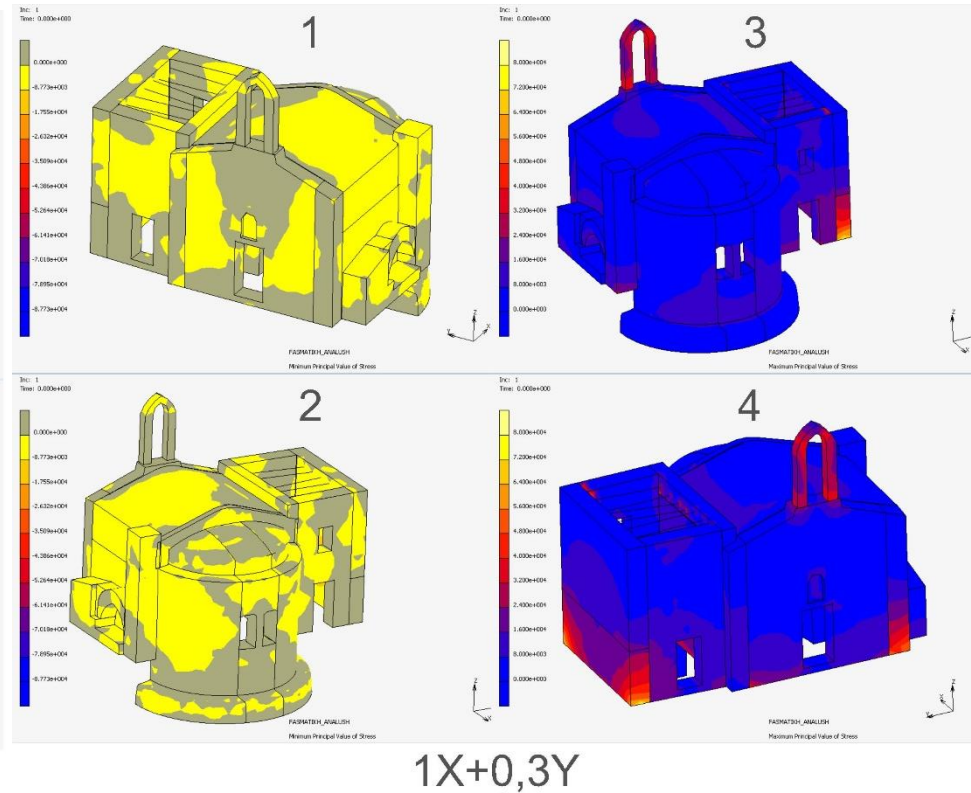
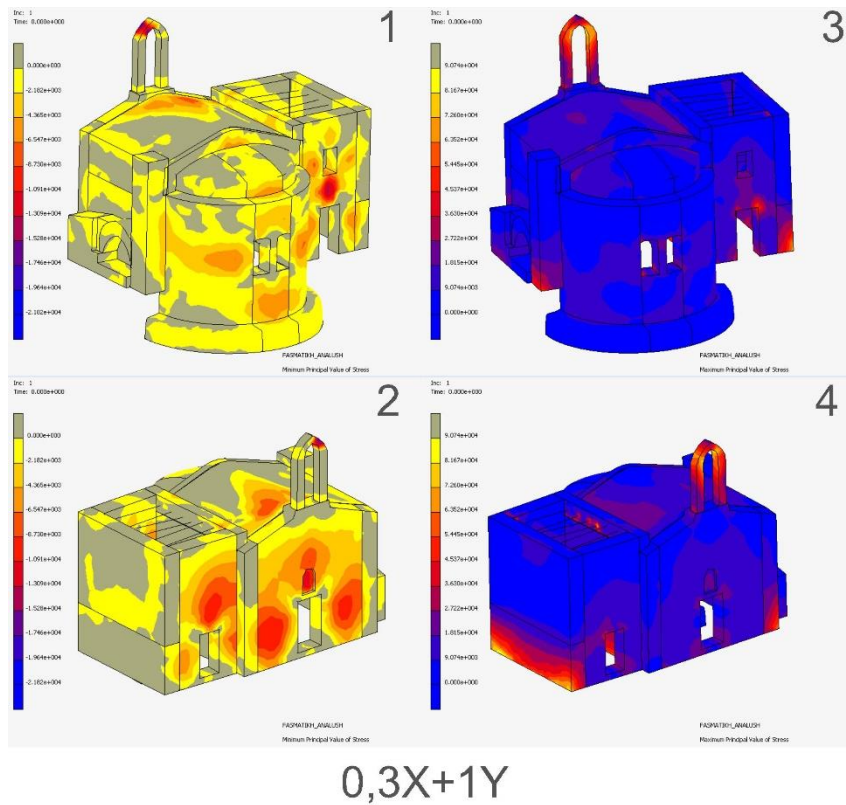


Εικόνα 9.9. Η 4^η ιδιομορφή (28.16Hz) , 7^η ιδιομορφή (46.60Hz), 11^η ιδιομορφή (60.66 Hz) και 13^η ιδιομορφή (66.98Hz) (ιδία επεξεργασία)

9.2.7.2 Φασματική ανάλυση

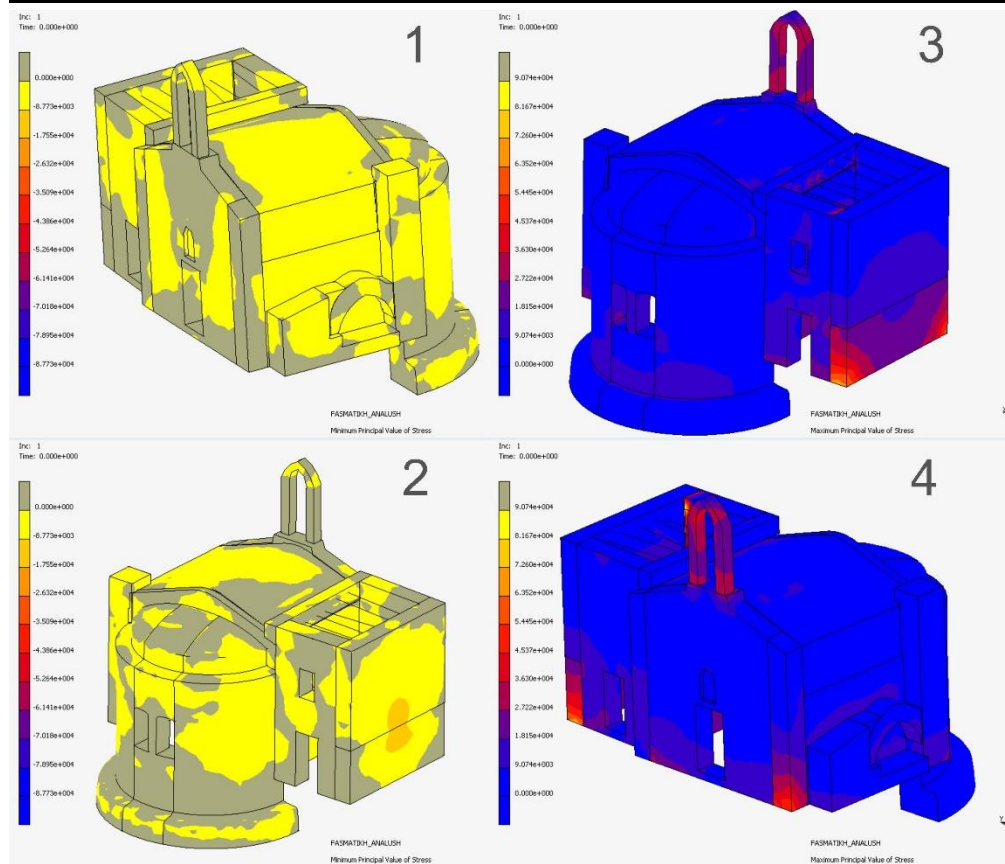
Όσον αφορά τις σεισμικές δράσεις, ο ναός της Παναγίας της κεράς επιλύθηκε για τους συνδυασμούς $1X+0.3Y$, $-1X-0.3Y$, $0.3X+1Y$ και $-0.3X-1.0Y$. Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης θεωρήθηκε αμελητέα. Η επίλυση έγινε στο μοντέλο του ναού χωρίς την προσθήκη της διάταξης των ελκυστήρων που υφίσταται στην πραγματικότητα.

Τα αποτελεσμάτων των φασματικών αναλύσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.11, στην Εικόνα 9.10 και στην Εικόνα 9.12. Στα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων, δεν υπάρχει κάποια περιοχή που να υπερβαίνει την αντοχή της τοιχοποιίας σε θλίψη. Ακόμα, συγκεντρώσεις τάσεων εμφανίζονται τόσο στην ανατολική όψη του ναού όσο και στην δυτική όψη στην περιοχή της κόγχης, με το δυσμενέστερο σεισμικό συνδυασμό να προκύπτει ότι είναι η φόρτιση « $0.3X+1Y$ ».



Εικόνα 9.11. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων με αριθμούς 3,4 ενώ με 1,2 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για τον συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης σε Pa για τον συνδυασμό $0,3X+1Y$ (ιδία επεξεργασία)

Εικόνα 9.10. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων με αριθμούς 3,4 ενώ με 1,2 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για τον συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης σε Pa για τον συνδυασμό $1X+0,3Y$ (ιδία επεξεργασία)

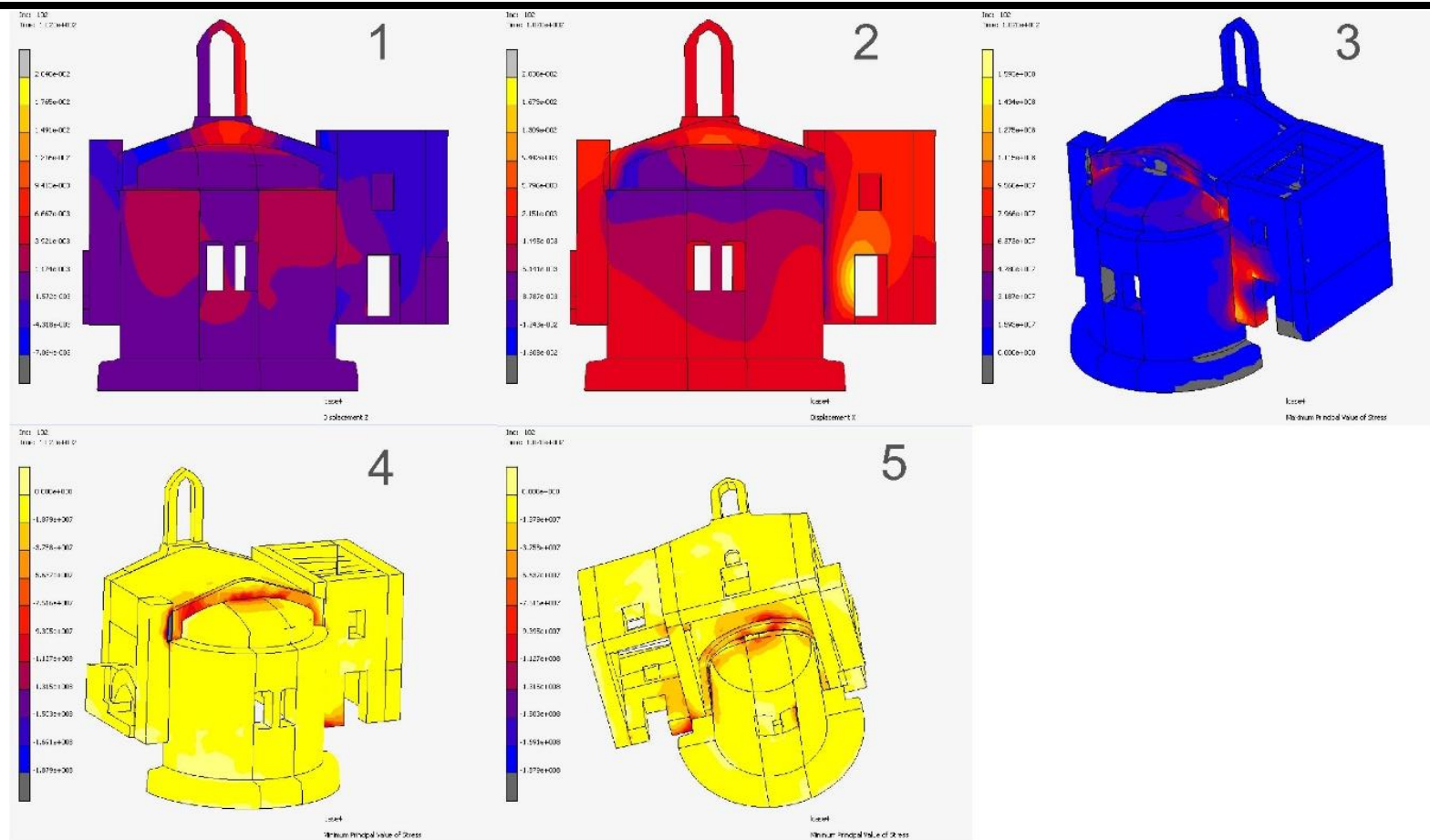


-1X-0,3Y

Εικόνα 9.12. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων με αριθμούς 3,4 ενώ με 1,2 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για τον συνδυασμό της φασματική ανάλυσης σε Pa για τον συνδυασμό -1X-0.3Y (ίδια επεξεργασία)

9.2.7.3 Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοιστορίας

Η ανάλυση με χρονοιστορία βάσης έγινε με χρήση των δεδομένων, για το σεισμό της Ζακύνθου που έλαβε χώρα κατά το έτος 2018. Παρατηρούνται διαφορικές καθιζήσεις στην περιοχή της κόγχης, και ειδικότερα στα σημεία που εμφανίζονται ρωγμές και στην πραγματικότητα στον ναό. Στην ίδια περιοχή επίσης εμφανίζονται μετακινήσεις εκτός επιπέδου της κόγχης. Στο προφίλ εφελκυστικών τάσεων εμφανίζονται συγκεντρώσεις τάσεων στο τεταρτοκύκλιο της κόγχης. Τέλος, η μέγιστη τιμή της θλιπτικής τάσης φαίνεται να μην υπερβαίνει την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

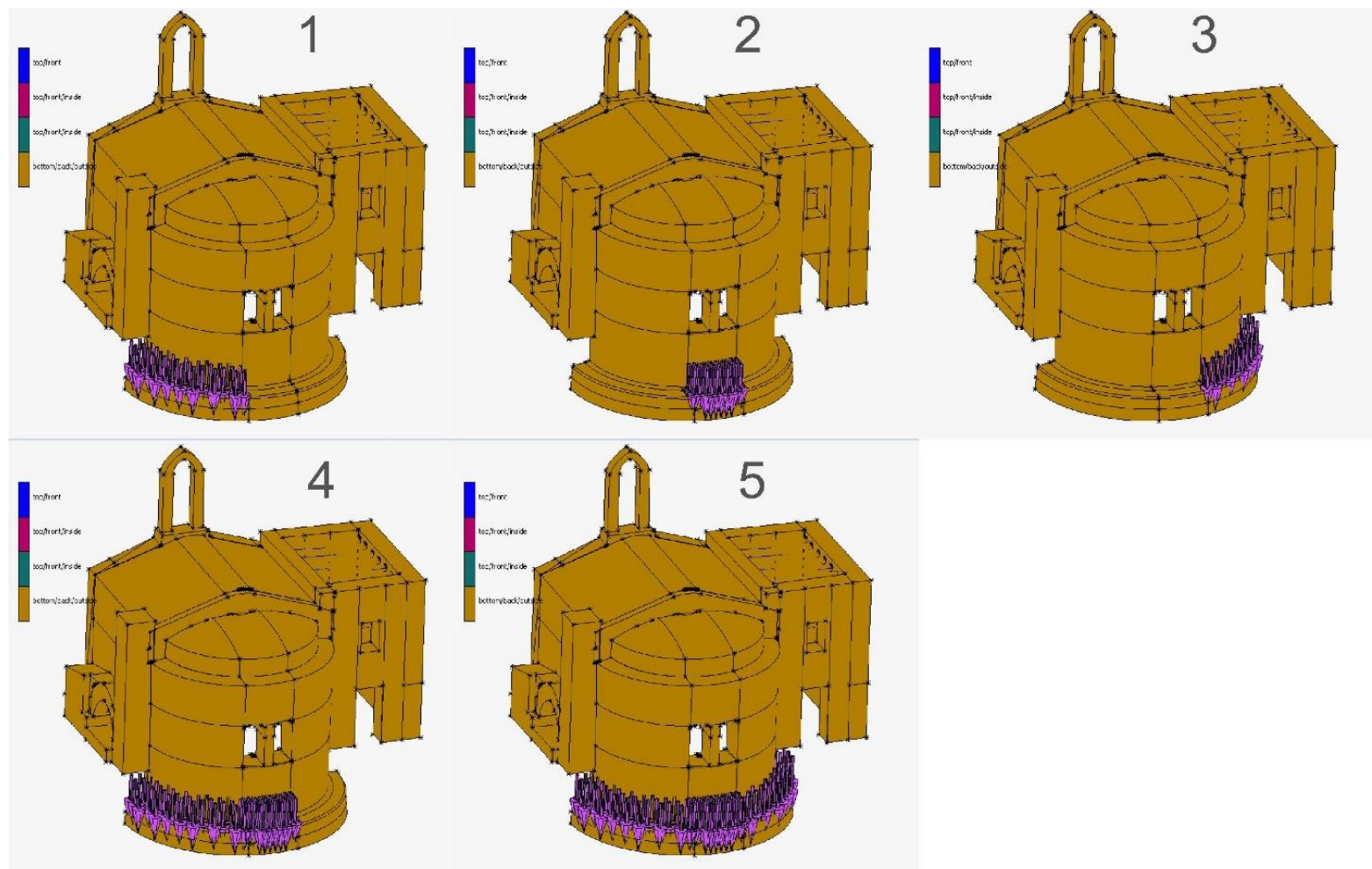


Εικόνα 9.13. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονιοιστορίας για την σεισμική διέγερση της Ζακύνθου το 2018. Παρουσιάζονται με αριθμούς 1,2,3,4 και 5 τα διαγράμματα κατακόρυφων μετακινήσεων(m), μετακινήσεων εκτός επιπέδου (m), εφελκυστικών τάσεων (Pa) και θλιπτικών τάσεων αντίστοιχα (Pa) ,(Ιδία επεξεργασία)

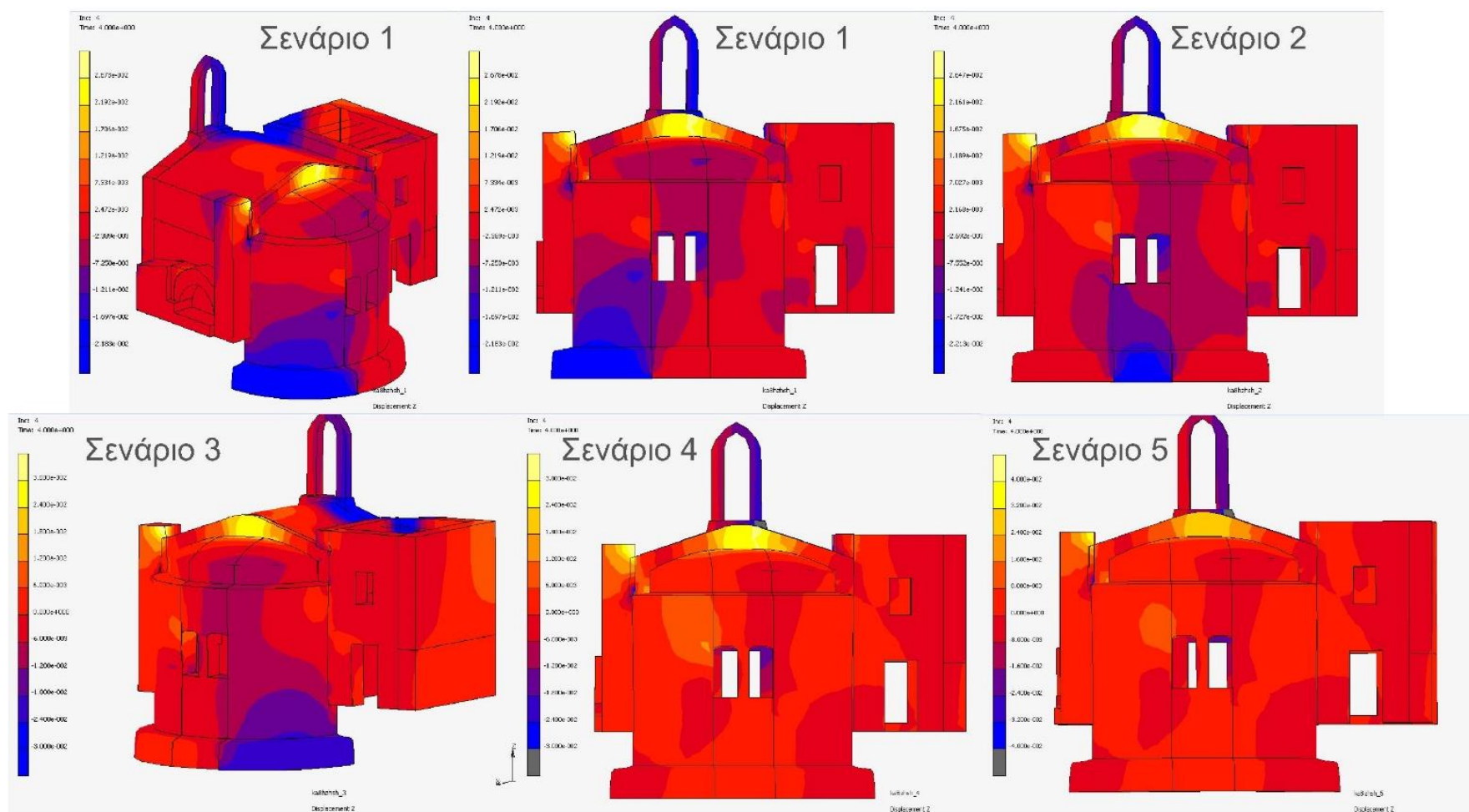
9.2.7.4 Αποτελέσματα Διαφόρων περιπτώσεων καθιζήσεως

Στο ναό της Παναγίας της Κεράς επιλύθηκαν 5 σενάρια καθιζήσεως με σκοπό την ταυτοποίηση των δομικών βλαβών του ναού, με ένα ή περισσότερα από τα σενάρια. Σε όλα τα σενάρια η τιμή της καθιζήσεως θεωρήθηκε ίση με 2 εκατοστά, μιας που στην πραγματικότητα ο ναός δεν εμφανίζει κάποια σημαντική ένδειξη που να δικαιολογεί μεγαλύτερη τιμή.

Στην Εικόνα 9.23 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια των καθιζήσεων. Από όλα τα σενάρια που επιλύθηκαν, εκείνο που φαίνεται να ταυτίζεται μερικώς με τις δομικές βλάβες του ναού, είναι το σενάριο 4 ». Στο διάγραμμα κατακόρυφων μετακινήσεων υπολογίσθηκαν διαφορικές μετακινήσεις και κατ' επέκταση συγκεντρώσεις τάσεων, σε σημεία της κατασκευής που υφίστανται και στην πραγματικότητα ρωγμές στο ναό. Αυτές οι ρωγμές είναι οι δύο κάθετες ρωγμές που διατρέχουν περίπου στο μέσον το ναό.



Εικόνα 9.14. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα 5 σενάρια καθίζησης που επιλύθηκαν για τον ναό της Παναγίας της Κεράς στην Αγία ρουμέλη (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 9.15. Αποτελέσματα σεναρίων καθίζησης και ειδικότερα τα διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων (m). (ιδία επεξεργασία)

9.2.8 Πρόταση αποκατάστασης

Με βάση τις ιδιαίτερες αξίες του μνημείου προτείνονται οι παρακάτω ενέργειες αποκατάστασης του ναού του της Παναγίας της κεράς:

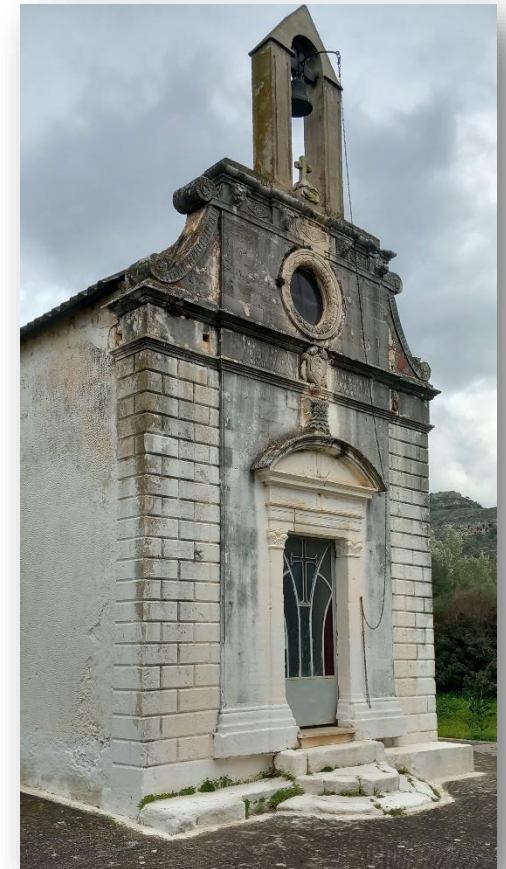
- εκσκαφή του εδάφους θεμελίωσης τμηματικά στην περιοχή της κόγχης και κατόπιν επιλογή του τρόπου ενίσχυσης της (π.χ. προσθήκη δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, κατασκευή αντηρίδων κ.α.)
- Εφαρμογή της μεθόδου του αρμολογήματος με σκοπό την στερέωση του τμήματος της τοιχοποιίας που βρίσκεται στα δυτικά του νεότερου ναού
- Αντικατάσταση λιθοσωμάτων όπου απαιτείται σε περίπτωση που έχουν αστοχήσει
- Εφαρμογή ενεμάτων στην περιοχή της κόγχης που υφίστανται οι δύο κάθετες ρωγμές
- Εφαρμογή κονιαμάτων με σκοπό την πλήρωση των υπόλοιπων ρωγμών του ναού

9.3 Μελέτη περίπτωσης Προφήτης Ηλίας στις Μουρνιές

9.3.1 Γενική Περιγραφή

Η εκκλησία του προφήτη Ηλία βρίσκεται στην περιοχή των Μουρνιών του νομού Χανίων. (Κνιθάκης Β.,2011) Η κατασκευή της χρονολογείται περί το έτος 1598, με τον κατασκευαστή της να είναι ο Πέτρος Καλλέργης. Η εκκλησία έχει καταγραφεί στην απογραφή των εκκλησιών του έτους 1637 με αναφορά ότι άνηκε σε μοναστήρι. (Πατεδάκης Μ.,κ.α.,2016). Όσον αφορά μετά το έτος 1645, όπου η περιοχή των Χανίων καταλήφθηκε από τους Οθωμανούς, η εκκλησία περιήλθε στην κυριότητα της Μονής Αγίας τριάδας των περιβολίων. Έπειτα αναφέρεται ότι η εκκλησία, με της εκτάσεις γης και τα κτίσματα γύρω από αυτήν, προσαρτήθηκαν στην Χαροντιά κατά άγνωστη χρονολογία. Ωστόσο την ημερομηνία 30 Αυγούστου του 1901 ψηφίστηκε ο νόμος 430 « Περὶ αρχαιοτήτων» από την Κρητική βουλή οπότε και ο ναός του Προφήτη Ηλία πέρασε στην δικαιοδοσία της Κρητικής πολιτείας.

Αρχιτεκτονικώς ο ναός ανάγεται στο είδος του μονόχωρου καμαροσκέπαστου χωρίς την ύπαρξη πλευρικών αντιρίδων. Έχει διαστάσεις πλάτος 4,49μ. και μήκος 6,94μ.. Η δυτική όψη είναι δομημένη με λαξευτούς λίθους ενώ υπάρχει παρουσία ανάγλυφων λεπτομεριών. Άνω της θύρας της εισόδου υπάρχει φεγγίτης με ανάγλυφες παραστάσεις και λεπτομέριες. Εκατέρωθεν και κάτω από το κωδονοστάσιο απαντώνται ανάγλυφες μπαρόκ λεπτομέριες. Το κωδονοστάσιο αποτελεί νεότερη προσθήκη και είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς το παλαιότερο από λαξευτούς λίθους φαίνεται να έχει καταρρεύσει (βλέπε Εικόνα 9.19). Στην βόρεια και νότια όψη είναι παρατηρείται η κατασκευή δύο οξυκόρυφων πανομοιότυπων παραθύρων ένα σε κάθε όψη. Στην ανατολική όψη παρατηρείται η κόγχη του ιερού ,όπου διαθέτει ένα



Εικόνα 9.16. Η εκκλησία του Προφήτη Ηλία στις Μουρνιές εν έτη 2023 (ιδία επεξεργασία)

ορθογωνικό παράθυρο μικρών διαστάσεων. Στον ναό έχει γίνει προσθήκη ελκυστήρων για να ενισχυθεί η φέρουσα ικανότητα του φορέα ενώ ο θόλος του ναού έχει επικαλυφθεί με φύλλα ελενίτ.

Στην δυτική όψη του υπάρχουν δύο χαραγμένες επιγραφές. Η μία δίστιχη βρίσκεται στο υπέρθυρο της εισόδου ενώ η άλλη τοποθετείται εκατέρωθεν του ανάγλυφου οικοσήμου των Καλλεργών. (Ξανθουδίδης Σ.,1903) Η πρώτη επιγραφή, πάνω από το υπέρθυρο είναι γραμμένη στα αρχαϊκά. Ωστόσο, μέρος της επιγραφής δεν είναι αναγνώσιμο λόγω της διάβρωσης. Σε αυτήν αναγράφονται τα ακόλουθα:

ΕΔΕΜ ΚΑΤΟΙΚΩΝ ΗΛΙΟΥ.....

ΚΑΙ ΝΑΟΝ ΟΙΚΕΙΝ ΘΝΗΤΟΣ ΩΗΜΑΚΑΡ ΔΕΧΟΥ

Σε ελεύθερη μετάφραση « Αυτός που έχει αξιωθεί να κατοικεί στην εδέμ ως αθάνατος τώρα να κατοικεί αυτόν τον ναό ως θνητός»

(Ξανθουδίδης Σ.,1903) Όσον αφορά την δεύτερη επιγραφή, η οποία τοποθετείτε εκατέρωθεν του οικοσήμου των Καλλέργηδων, έχει γραφεί σε τρεις γραμμές διακοπτόμενες στην μέση με αρχαϊκούς χαρακτήρες. Η επιγραφή αυτή αναφέρει:

ΟΥΡΑΝΟΘΡΕΜΜΟΝ ΕΜΠΥΡΑΡΜΑΤΕ

ΠΕΤΡΟΝ ΤΟΝ ΚΑΛΙΕΡΓΗΝ

ΕΡΓΑΤΗ ΔΟΜΟΥ ΣΑΩ άφγΉ

Σε ελεύθερη μετάφραση « Εσύ που έχεις αναθραφεί στους ουρανούς τον Πέτρο τον Καλλέργη τον κύριο αυτού του δόμου σώσε»



Εικόνα 9.17. Επιγραφή εκατέρωθεν του οικοσήμου των καλέργηδων



Εικόνα 9.18. Επιγραφή πάνω από το υπέρθυρο

(Ξανθουδίδης Σ.,1903) Ο οίκος των Καλλέργηδων, οικογένεια του κατασκευαστή του ναού, φαίνεται ιστορικά ότι είχε έδρα στο Ρέθυμνο και ειδικότερα στην επαρχία Μυλοποτάμου. Σήμερα, απόγονοι της οικογένειας μπορούν να βρεθούν σε διάφορα μέρη της Κρήτης. (Κνιθάκης Β.,2016) Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το οικόσημο των Καλλέργηδων παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με εκείνο που βρίσκεται στην ενετική βίλα Ροτόντα στις Καλάθενες , γεγονός που τονίζει την θέση της οικογενείας στην κοινωνία κατά την ενετοκρατία.

9.3.2 Ιστορικό δομικών βλαβών

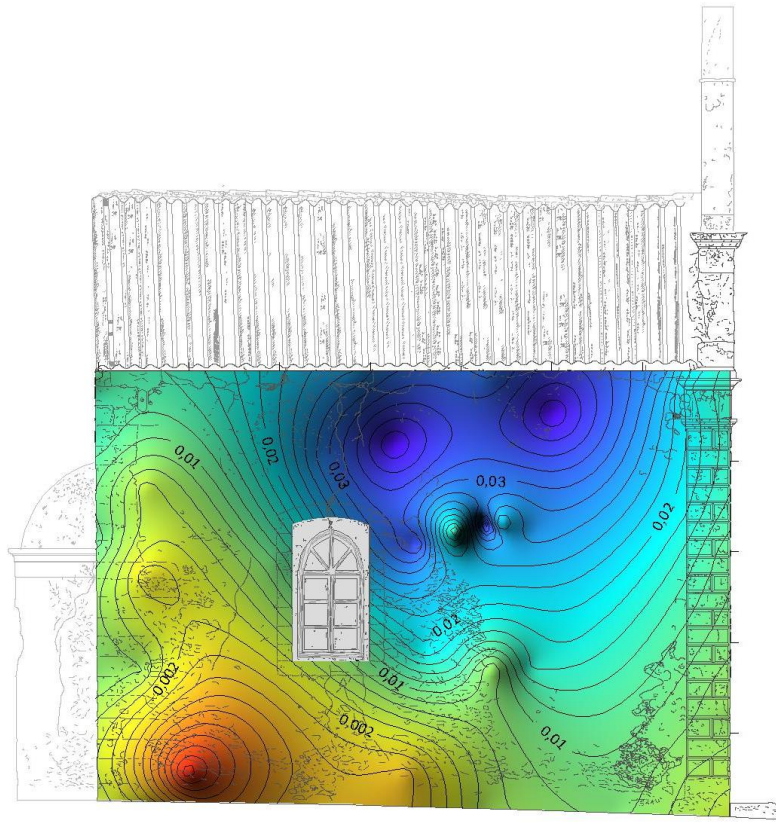
Όσο αφορά το ιστορικό των δομικών βλαβών του ναού του Προφήτη Ηλία υπάρχουν καταγραφές και φωτογραφικό υλικό από τις αρχές του 20ου αιώνα. (Πατεδάκης Μ.,κ.α.,2016) Σε επιστολή του στις 14 Απριλίου 1912 ο τότε επιμελητής του Μουσείου Χανίων Παύλος Α. Βαλάκης επισήμανε την σοβαρότητα της κατάστασης της οποία βρισκόταν ο ναός. Ζητήθηκε εκ μέρους του η άμεση λήψη μέτρων για την προστασία του. Χαρακτηριστικά στην επιστολή του (με Αρ. Πρωτ. 293 ΔΙΕΚΠ 197) αναφέρει «...ο ναός του προφήτου Ηλίου, ανήκων εις την κοινότητα Περιβολίων φέρει εν τη προσόψει αυτού ρήγμα από της θύρας μέχρι του θόλου, τοιαύτα δε ρήγματα και από των δύο πλαγίων παραθύρων και όπισθεν από της κόγχης μέχρι του ενετικού θόλου, διά τούτων δε είναι καταφανές ότι υπάρχει άμεσος κίνδυνος πτώσεως του ωραίου τούτου ναΐσκου». Η προ περιγραφόμενη κατάσταση του ναού επαληθεύεται από τις φωτογραφίες που ελήφθησαν από τον Ξανθουδίδη και τον Gerola κατά τις αρχές του 20^{ου} αιώνα (βλέπε Εικόνα 9.19). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις αναφορές, είχε δημιουργηθεί μία κατά μήκος ρωγμή πλάτους 0,10μ. περίπου, που κατέληγε στην όψη της εισόδου, και η μετακίνηση αυτή γινόταν εμφανής σε χαρακτηριστικά σημεία του ναού (π.χ. το γείσο). Η ρωγμή αυτή εμφανίζονταν στο νότιο τμήμα της οξυκόρυφης καμάρας αλλά και στο νότιο τμήμα του ανατολικού τοίχου. Λόγω αυτής, είχε προκληθεί αποκοπή και κατάρρευση μεγάλου τμήματος του υπερθύρου από τη νότια πλευρά, καθώς επίσης του καμπαναριού από το οποίο διατηρούταν η βάση έδρασης του, με τους λαξευτούς λίθους που το αποτελούσαν να είναι διάσπαρτοι στην οροφή και στον περιβάλλοντα χώρο του ναού . Επιπλέον των προηγούμενων δομικών βλαβών είχε παρατηρηθεί την ίδια εποχή ρωγμή στο ανώφλι του παραθύρου στην νότια όψη του ναού.

(Πατεδάκης Μ.,κ.α.,2016) Σύμφωνα με ανυπόγραφο σημείωμα που βρίσκεται στο αρχείο της Εφορείας αρχαιοτήτων, η ανταπόκριση της διοίκησης ήταν άμεση στις προηγούμενες επιστολές και δόθηκε σε εργολάβο ,η αμοιβή των 429,90 δραχμών, για την εκτέλεση εργασιών αποκατάστασης του ναού. Το ιστορικό των εργασιών που εκτελέστηκαν εκείνη την εποχή δεν υπάρχει διαθέσιμο. Από μεταγενέστερες φωτογραφίες μπορεί κάποιος να αντιληφθεί μερικώς τις εργασίες που εκτελέστηκαν τότε (βλέπε Εικόνα 9.19)

Σε άγνωστη χρονολογία φαίνεται να έχει γίνει προσθήκη διάταξης εκλυστήρων στο ναό όπως και η προσθήκη ελενίτ με σκοπό την επικάλυψη του θόλου. Οι συγκεκριμένες επεμβάσεις έχουν λάβει χώρα πολύ πιθανόν μετάγενέστερα των πρώτων επεμβάσεων του 1912.



Εικόνα 9.19. Η πρώτη η εικόνα η εκκλησία στις αρχές του 20^{ου} αιώνα (Στ. Ξανθουδίδης), Η δεύτερη εικόνα η εκκλησία στις αρχές του 20^{ου} αιώνα (G. Gerola), Η Τρίτη εικόνα η εκκλησία κατά το έτος 1982



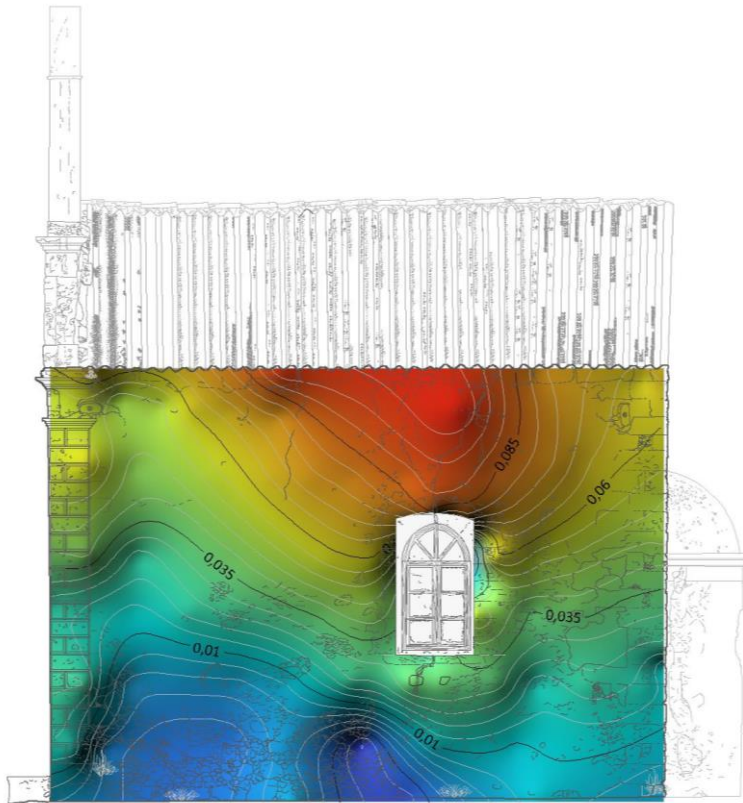
Εικόνα 9.20. Διάγραμμα μετακινήσεων εκτός επιπέδου στην βόρεια όψη του (ίδια επεξεργασία)

τοιχοποιία παρουσιάζει ρηγματώσεις στο σημείο επαφής με την πλάκα αγκύρωσης του ελκυστήρα πράγμα που υποδεικνύει αρχή του μηχανισμού αστοχίας της τοιχοποιίας (βλέπε Εικόνα 6.1).

9.3.3 Υφιστάμενη κατάσταση

Η παρούσα εκτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης γίνεται με βάση την αυτοψία που πραγματοποιήθηκε κατά τον μήνα Απρίλιο του 2023. Στο παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα σχέδια με τις δομικές βλάβες του ναού. Σε αυτή παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

- Η τοιχοποιία της βόρειας και νότια όψης του ναού παρουσιάζει απόκλιση από την κατακόρυφο. Αυτή η απόκλιση στην νότια όψη παρουσιάζει μέγιστη τιμή γύρω στα 10 εκατοστά εμφανιζόμενη μεταξύ του ανωφλιού του παραθύρου και της στέφης της στέγης. Όσον αφορά την βόρεια όψη παρουσιάζεται η μέγιστη απόκλιση από την κατακόρυφο να είναι περί τα 3 εκατοστά. Στην Εικόνα 9.20 και στην Εικόνα 9.21 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις εκτός επιπέδου της βόρειας και νότιας όψης του ναού αντίστοιχα
- Η επέμβαση της ενίσχυσης του φορέα με την προσθήκη ελκυστήρων φαίνεται να έχει αστοχήσει. Στην δυτική όψη έχει αφαιρεθεί μία από τις δύο πλάκες αγκύρωσης με αποτέλεσμα να μην λειτουργεί η διάταξη του ελκυστήρα στο σημείο αυτό. Επιπλέον η



Εικόνα 9.21 Διάγραμμα μετακίνησης εκτός επιπέδου στην νότια όψη του ναού (μονάδες μέτρησης μέτρα)

- Είναι εμφανής η παρουσία του φαινομένου της ανοδικής υγρασίας στην βάση της βόρειας όψης του ναού με την απώλεια του αρμολογήματος στο συγκεκριμένο τμήμα της τοιχοποιίας
- Στην όψη της εισόδου είναι ακόμα εμφανής η συνεχής ρηγματώση άνω του υπερθύρου της θύρας όπου καταλήγει μέχρι την βάση του καμπαναριού. Η συγκεκριμένη ρωγμή είχε επισκευαστεί στο παρελθόν. Η ρωγμή αυτή είναι εμφανής και στο εσωτερικό του ναού. Στην βόρεια όψη παρουσιάζονται ρηγματώσεις στο ανώφλι του παραθύρου καθώς και στα ανατολικά του. Επιπλέον ρηγματώσεις παρουσιάζονται εκατέρωθεν της κόγχης του ιερού οι οποίες είναι εμφανείς και στο εσωτερικό . Πάνω από την κόγχη στο αέτωμα είναι εμφανής ρωγμή μέχρι την στέψη της στέγης. Τέλος στην νότια όψη υπάρχει συνεχής ρωγμή από το έδαφος καθ' όλο το ύψος της τοιχοποιίας στην θέση του παραθύρου. Όσο αφορά τον θόλο είναι εμφανής εσωτερικά μία συνεχής ρωγμή στο μέσον του όπου είναι άγνωστο αν είναι διαμπερής.

9.3.4 Κατασκευαστικές φάσεις

Ο ναός παρουσιάζεται ιστορικά να έχει κατασκευαστεί κατά τον 16^ο αιώνα. Η σημερινή του μορφή του παρουσιάζει λίγες διαφορές από την αρχική κατασκευή. Αρχικά στην δυτική όψη παρατηρείται η προσθήκη νεότερου δίλοβου καμπαναριού από οπλισμένο σκυρόδεμα στην θέση του παλαιότερου από λαξευτούς λίθους (βλέπε Εικόνα 9.19). Σε φωτογραφία του από την καταγραφή που έγινε από το Gerola παρουσιάζεται η εκκλησία να έχει καμπαναριό, έχοντας καταρρεύσει, από λαξευτούς λίθους. Επιπλέον, παρατηρείται η προσθήκη κυματοειδών φύλλων Ελενίτ με σκοπό την κάλυψη του θόλου και κατ' επέκταση πιθανόν την στεγάνωση του από τα όμβρια ύδατα (βλέπε Εικόνα 9.23). Στις όψεις του ναού αλλά και στο εσωτερικό παρατηρείται η προσθήκη διάταξης ελκυστήρων . Οι δύο τελευταίες κατασκευαστικές φάσεις δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθούν χρονικά τότε εφαρμόστηκαν καθώς δεν υπάρχουν καταγραφές για τον ναό εκείνη την περίοδο.



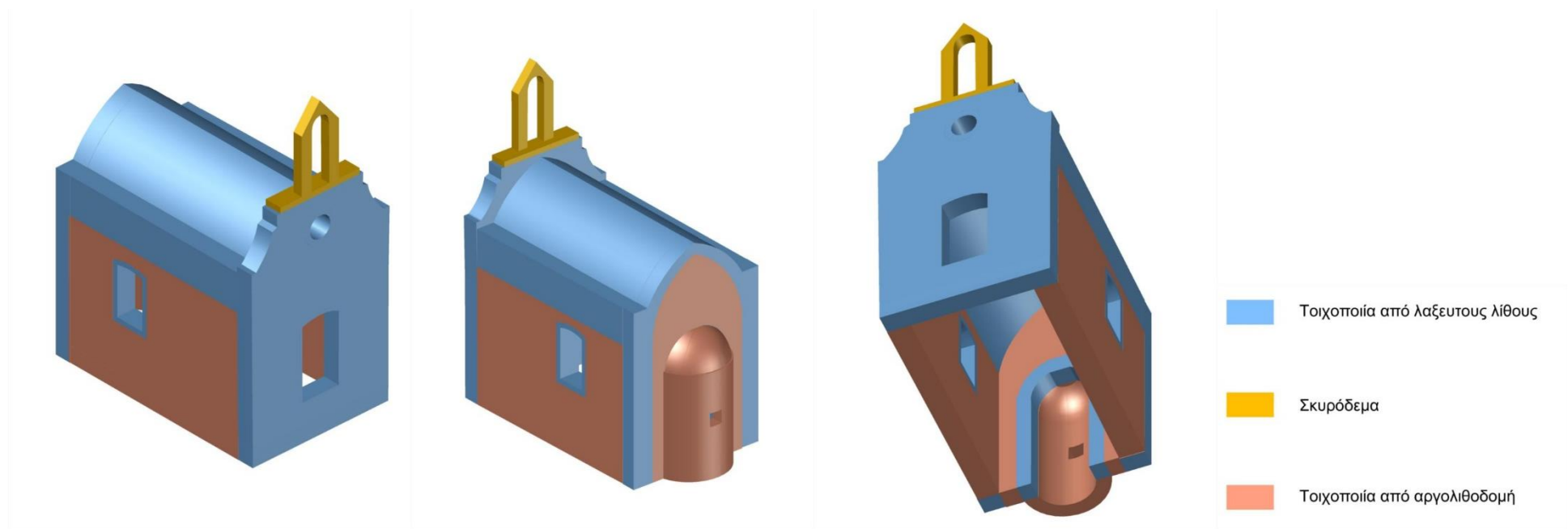
Εικόνα 9.22. Λεπτομέρεια Βορειανατολικής γωνίας ναού προφήτη Ηλία στις μουρνιές (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 9.23. Βόρεια όψη Προφήτη Ηλία στις μουρνιές (ιδία επεξεργασία)

9.3.5 Υλικά

Ελλείψει μετρήσεων όσο αφορά δυναμικά και μηχανικά χαρακτηριστικά θα γίνουν κάποιες παραδοχές όσο αφορά τις αντοχές της τοιχοποιίας του ναού. Οι λαξευτοί λίθοι ανάγονται στο είδος του ασβεστόλιθου με μικρό πάχος κονιάματος δόμησης. Οι λαξευτοί λίθοι κυρίως έχουν χρησιμοποιηθεί για την δόμηση της δυτικής όψης, του θόλου και των γωνιών της τοιχοποιίας. Τα υπόλοιπα μέρη του φέρουν οργανισμό του ναού είναι δομημένα από αργολιθοδομή με μεγάλη χρήση κονιάματος και μικρών ακατέργαστων λίθων. Χρήση σκυροδέματος έχει γίνει μόνο για την κατασκευή του δίλοβου κωδωνοστασίου και της βάσης έδρασης του. Στην Εικόνα 9.24 παρουσιάζονται σχηματικά τα παραπάνω.



Εικόνα 9.24. Διάγραμμα υλικών δόμησης ναού της Παναγίας της κεράς (ιδία επεξεργασία)

Οι βασικές ιδιότητες της τοιχοποιίας θεωρήθηκαν απλοποιητικά όμοιες με εκείνες του ναού το Αγίου Γεωργίου του Μορμόρη που παρουσιάζεται παρακάτω (βλέπε Πίνακας 9-5).

9.3.6 Παραδοχές μελέτης

Όσον αφορά το έδαφος θεμελίωσης του ναού προφήτη Ηλία θεωρήθηκε πως είναι βραχώδες. Η θεώρηση αυτή πηγάζει από την παρατήρηση του χαρακτήρα της περιοχής.

Οι αναλύσεις που έγιναν στο προσομοίωμα της κατασκευής είναι :

- Η ανάλυση του τρόπου με τον οποίο ταλαντώνεται ο φέρων οργανισμός του ναού σε συγκεκριμένες συχνότητες (Ιδιομορφική ανάλυση).
- Ανάλυση της κατασκευής υπό την δράση των φορτίων του σεισμού και την εξέταση της επιρροής της ενίσχυσης των ελκυστήρων με την δημιουργία δύο διαφορετικών μοντέλων
- Ανάλυση για διάφορα σενάρια καθίζησης

Σκοπός των παραπάνω αναλύσεων είναι η ταυτοποίηση των δομικών βλαβών του φέροντος οργανισμού της κατασκευής.

<i>A/A</i> <i>ιδιομορφής</i>	<i>Ιδιοσυχνότητες Hz</i>	<i>Μέγιστη τιμή της</i> <i>παραμόρφωσης</i> <i>(cm)</i>
1	9.51	0.39
2	14.06	0.8
3	17.57	0.53
4	20.21	0.72
5	25.05	6.13
6	26.85	0.86
7	31.26	0.47
8	34.05	0.59
9	34.40	0.99
10	35.04	0.56
11	37.36	0.8
12	38.72	1.7
13	40.64	1.0
14	41.98	0.78
15	44.60	0.85

Πίνακας 9-3. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών των 15 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής και των μέγιστων τιμών παραμορφώσεων που εμφανίζει η κατασκευή (ιδία επεξεργασία)

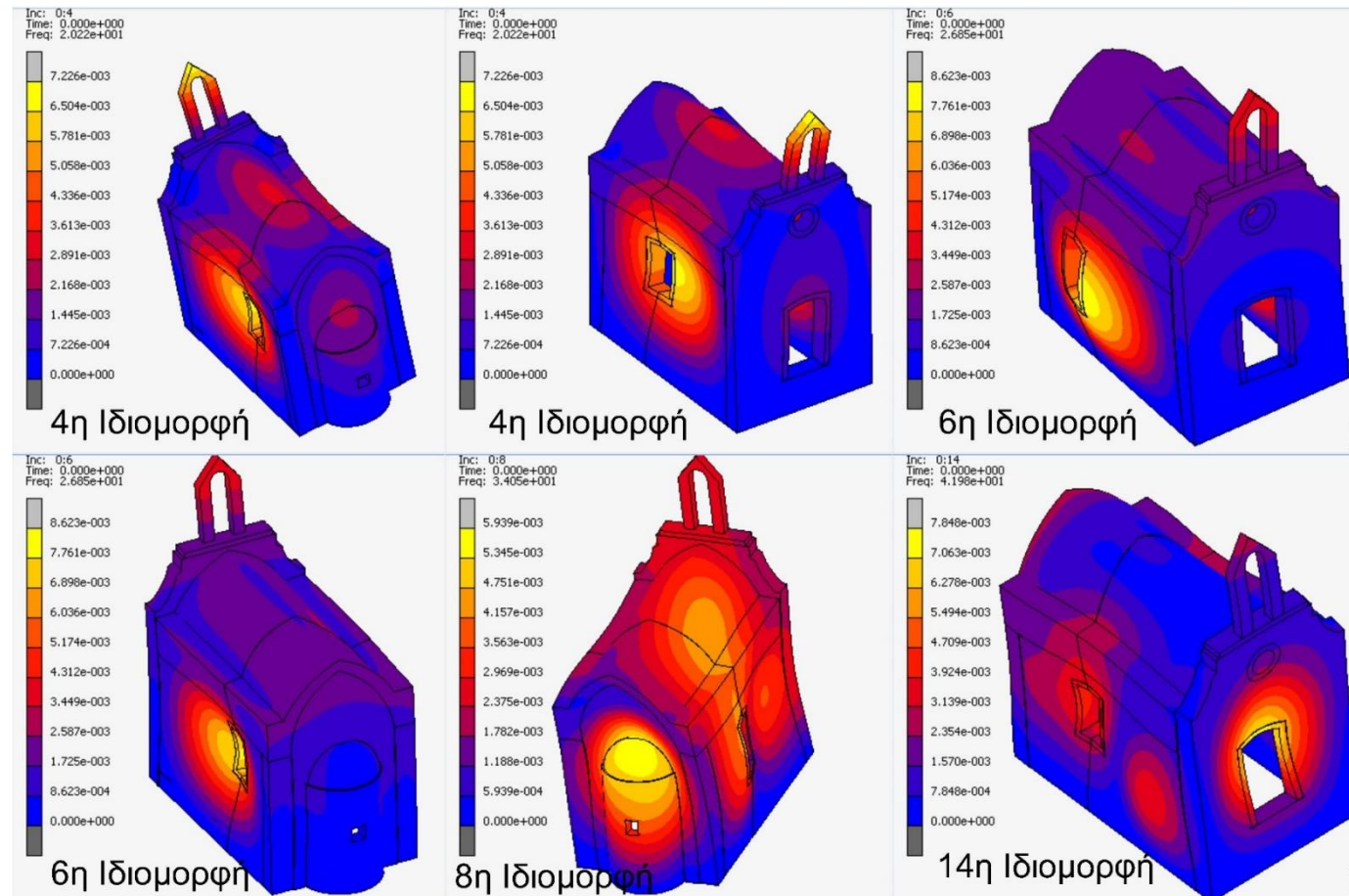
9.3.7 Αποτελέσματα αναλύσεων

9.3.7.1 Ιδιομορφική ανάλυση

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα προϊόντα της ιδιομορφικής ανάλυσης του φέρον οργανισμού του ναού του προφήτη Ηλία. Με άλλα λόγια, θα διερευνηθεί ο τρόπος με το οποίο ταλαντώνεται ο φέρον οργανισμός του υπό συγκεκριμένες συχνότητες. Στον Πίνακα 9-3 παρουσιάζονται οι 15 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής σε συνδυασμό με την μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης.

Το εύρος των 15 πρώτων συχνοτήτων ήταν από 9.51Hz έως 44.60Hz. Αναλυτικότερα, η 4^η ιδιομορφή με συχνότητα 20.21Hz φαίνεται να προκαλεί κίνηση των διαμηκών τοίχων του φορέα προς το εσωτερικό του ναού, με την παραμόρφωση να είναι μέγιστη περίπου στο μέσον τους. Η 6^η ιδιομορφή με τιμή συχνότητας 26.85Hz προκαλεί ταλάντωση του φορέα τέτοια ώστε η νότια διαμήκη τοιχοποιία να παραμορφώνεται προς το εσωτερικό του ναού ενώ η βόρεια διαμήκη τοιχοποιία να ταλαντώνεται προς τον βορά. Όμοια με πριν, η μέγιστη καμπύλωση παρουσιάζεται στο μέσον περίπου των διαμηκών τοίχων. Η 8^η ιδιομορφή με τιμή 34.05 Hz φαίνεται να ενεργοποιεί το μηχανισμό της κόγχης

ωθώντας την προς το εσωτερικό του ναού. Ακόμα, η 14^η ιδιομορφή με τιμή 41.98Hz οδηγεί στην παραμόρφωση της δυτικής όψης του ναού, με φορά προς το εσωτερικό του.

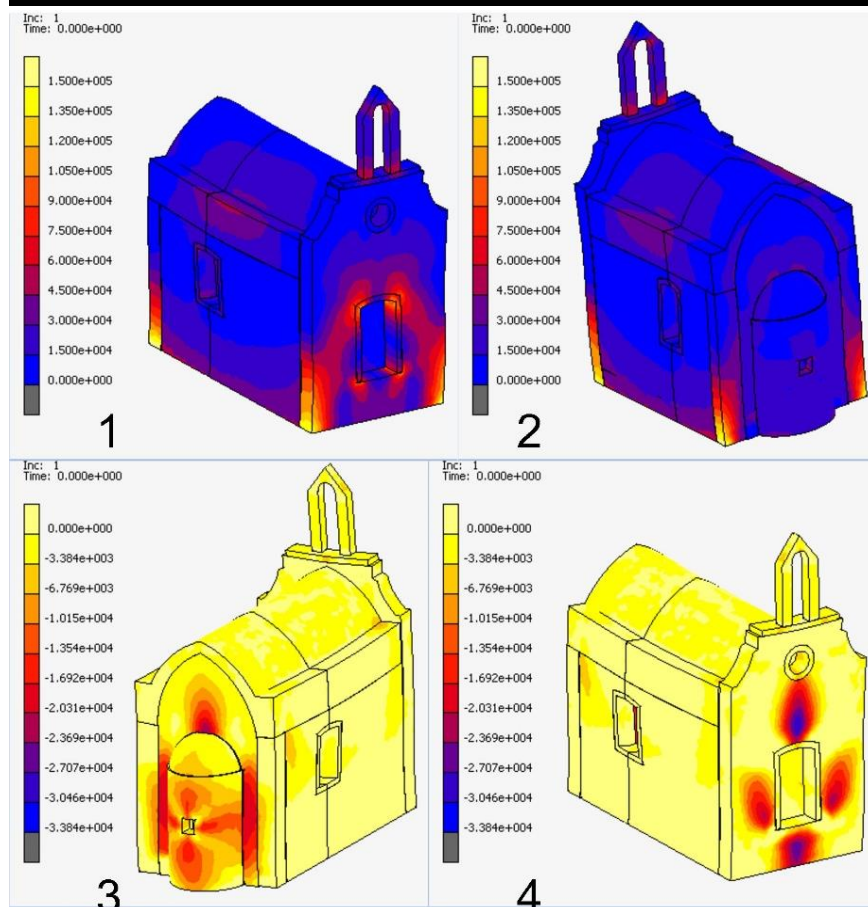


Εικόνα 9.25. Διαγράμματα της 4ης, 5ης, 8ης και 14ης ιδιομορφής του ναού του Προφήτη Ηλίας στις μουρνιές (ιδία επεξεργασία)

9.3.7.2 Φασματική ανάλυση

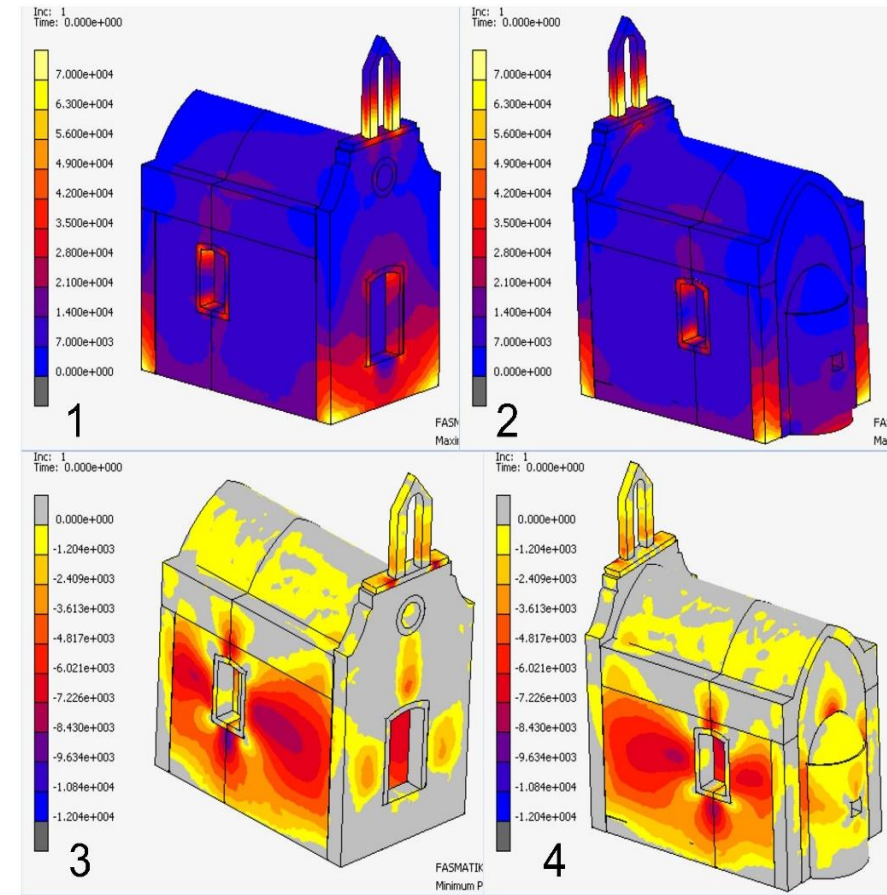
Όσον αφορά τις σεισμικές δράσεις, ο ναός του προφήτη Ηλία επιλύθηκε για του συνδυασμούς $1X+0.3Y$, $-1X-0.3Y$, $0.3X+1Y$ και $-0.3X-1.0Y$. Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης θεωρήθηκε αμελητέα. Η επίλυση έγινε στο μοντέλο του ναού χωρίς την προσθήκη της διάταξης των ελκυστήρων που υφίσταται στην πραγματικότητα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.26, στην Εικόνα 9.27 και στην Εικόνα 9.28. Παρατηρούνται συγκεντρώσεις θλιπτικών τάσεων στην περιοχή ανάμεσα στο υπέρθυρο και τον φεγγίτη. Επιπλέον, παρατηρούνται συγκεντρώσεις τάσεων στα ανώφλια των παραθύρων τόσο σε θλιπτικές τάσεις όσο κι σε εφελκυστηκές. Η περιοχή της κόγχης παρουσιάζει σημαντικές συγκεντρώσεις τάσεων, κυρίως υπό την επίδραση του συνδυασμού « $-0.3X-1Y$ » της σεισμικής διέγερσης. Οι περιοχές που παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις τάσεων, φαίνεται να ταυτίζονται με εκείνες που υπάρχουν δομικές βλάβες στον ναό στην πραγματικότητα.



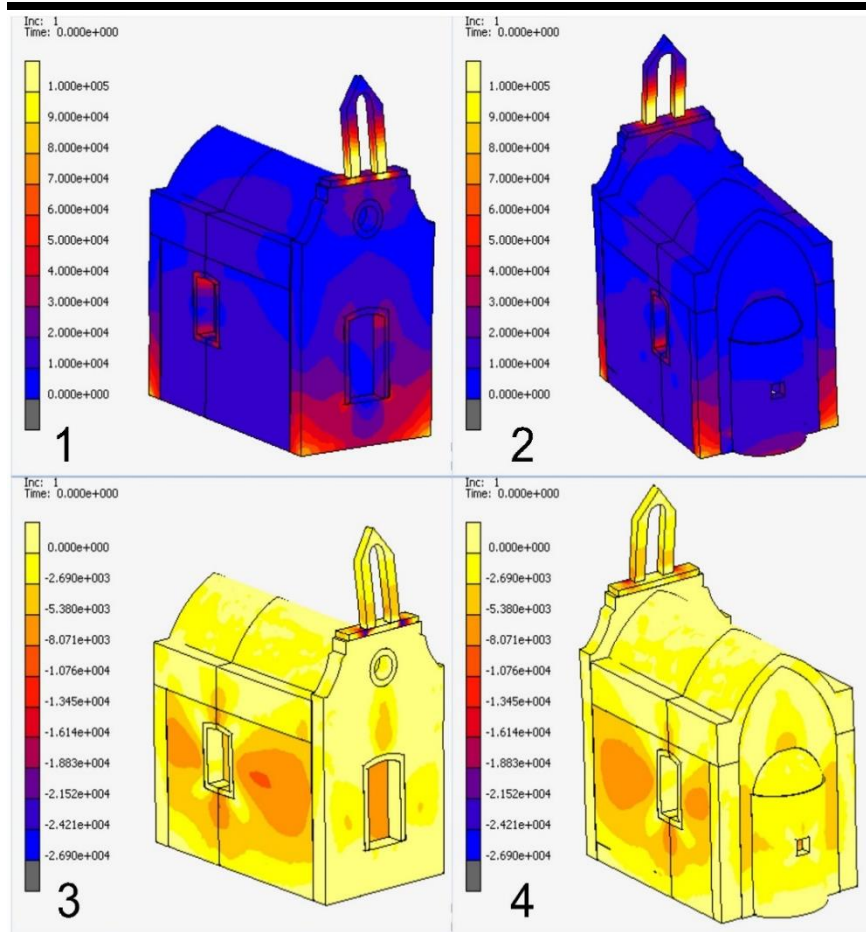
-0.3X-1Y

Εικόνα 9.26. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (-0.3X-1Y χωρίς ελκυστήρες). (ίδια επεξεργασία)



1X-0.3Y

Εικόνα 9.27. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (1X-0.3Y χωρίς ελκυστήρες). (ίδια επεξεργασία)



-1X-0.3Y

Εικόνα 9.28. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (-1X-0.3Y χωρίς ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)

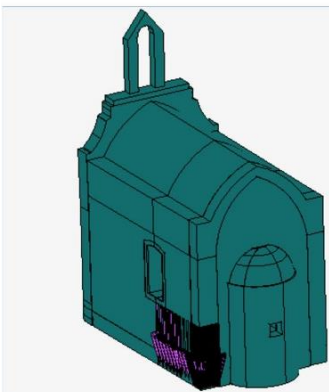
9.3.7.3 Αποτελέσματα σεναρίων καθιζήσεων

Σε προηγούμενη ενότητα έγινε η αναφορά πως η πλέον συνήθης αιτία εμφάνισης δομικών βλαβών σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία είναι εκείνη της καθιζήσεως. Στο ναό του προφήτη Ηλία επιλύθηκαν 5 σενάρια καθιζήσεως με σκοπό την ταυτοποίηση των δομικών βλαβών του ναού, με ένα ή περισσότερα από τα σενάρια. Σε όλα τα σενάρια η τιμή της καθίζησης θεωρήθηκε 2 εκατοστά, μιας που στην πραγματικότητα ο ναός δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερα σημαντική ένδειξη έντονης καθίζησης.

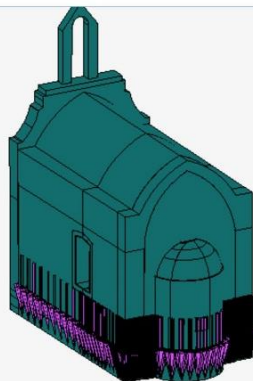
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθούν κάποιες σημαντικές βασικές αρχές της αναλύσεως. Η παρουσία της καθιζήσεως δεν συνεπάγεται απαραίτητως με την εμφάνιση ρηγματώσεων στον φέρον οργανισμό της κατασκευής. Συμπληρωματικά σε αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, οι συγκεντρώσεις τάσεων που δημιουργούνται από το φαινόμενο της καθίζησης, σε συνδυασμό με κάποια σεισμική διέγερση πιθανόν να οδηγούν τελικώς το φέρον οργανισμό του ναού σε αστοχία. Με άλλα λόγια οι περισσότερες δομικές βλάβες αποτελούν αποτέλεσμα πολλαπλών δράσεων στην κατασκευή.

Στην Εικόνα 9.29 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια των καθιζήσεων. Από όλα τα σενάρια που επιλύθηκαν, εκείνο που φαίνεται να ταυτίζεται μερικώς με τις δομικές βλάβες του ναού, είναι το «Σενάριο 3». Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται να λαμβάνουν χώρα, διαφορικές μετακινήσεις, και κατ' επέκταση συγκεντρώσεις τάσεων, σε σημεία της κατασκευής που λαμβάνουν χώρα και στην πραγματικότητα δομικές βλάβες. Τα σημεία αυτά είναι η περιοχή της κόγχης, του αετώματος καθώς και του ανωφλίου του παραθύρου της νότια όψης.

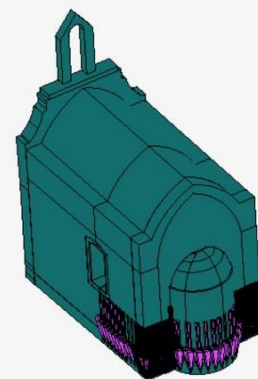
Σενάριο καθίζησης 1



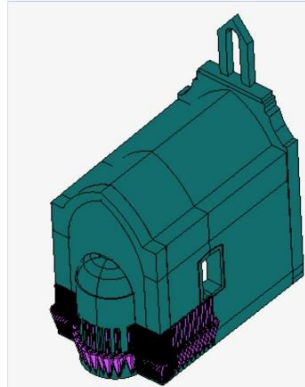
Σενάριο καθίζησης 2



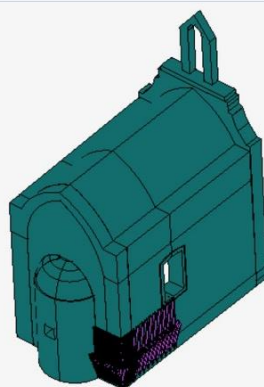
Σενάριο καθίζησης 3



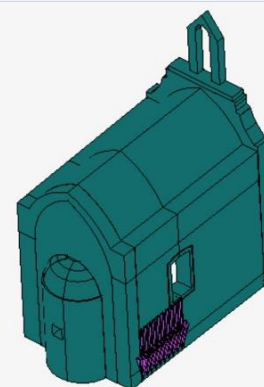
Σενάριο καθίζησης 3



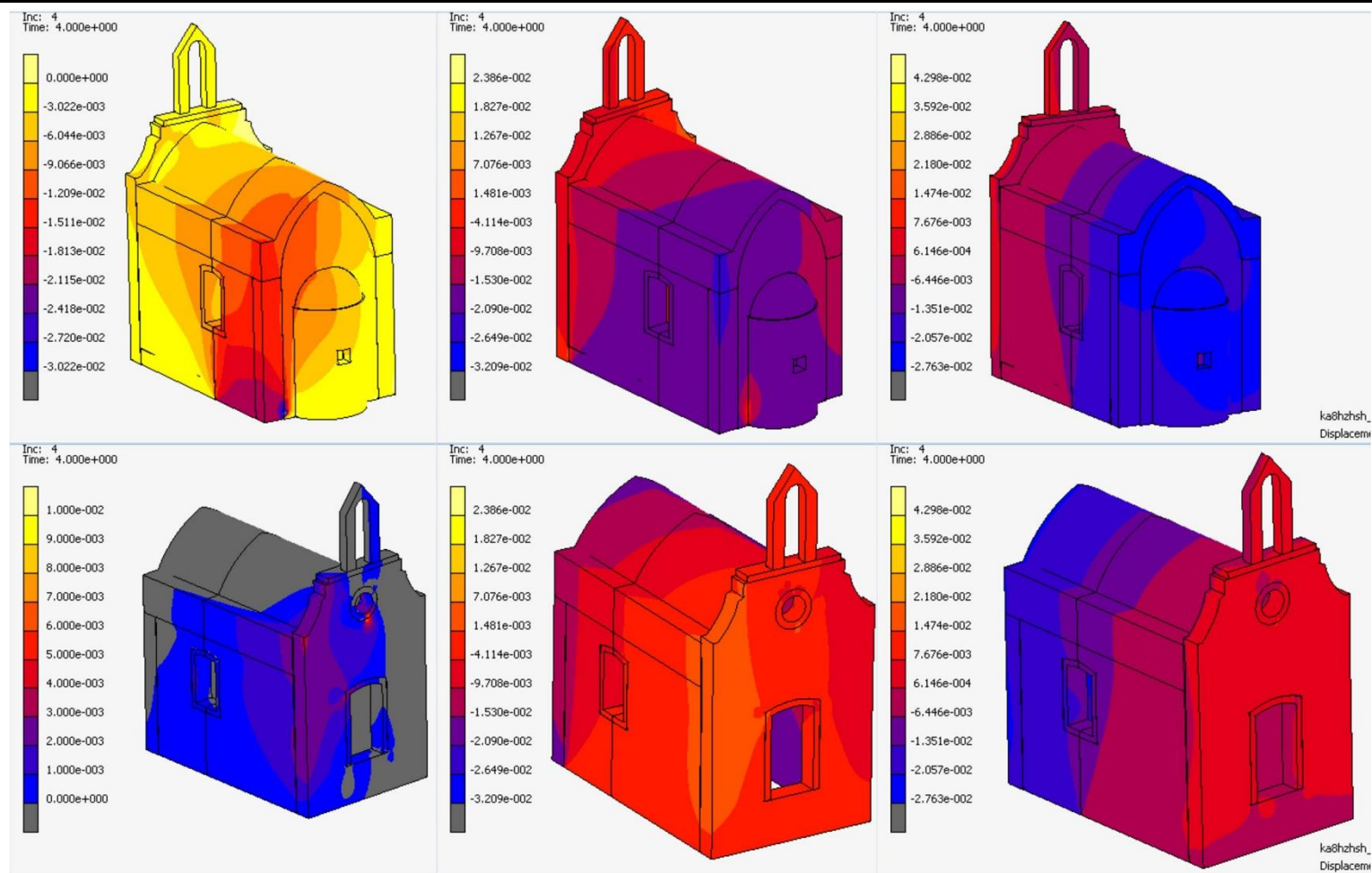
Σενάριο καθίζησης 4



Σενάριο καθίζησης 5

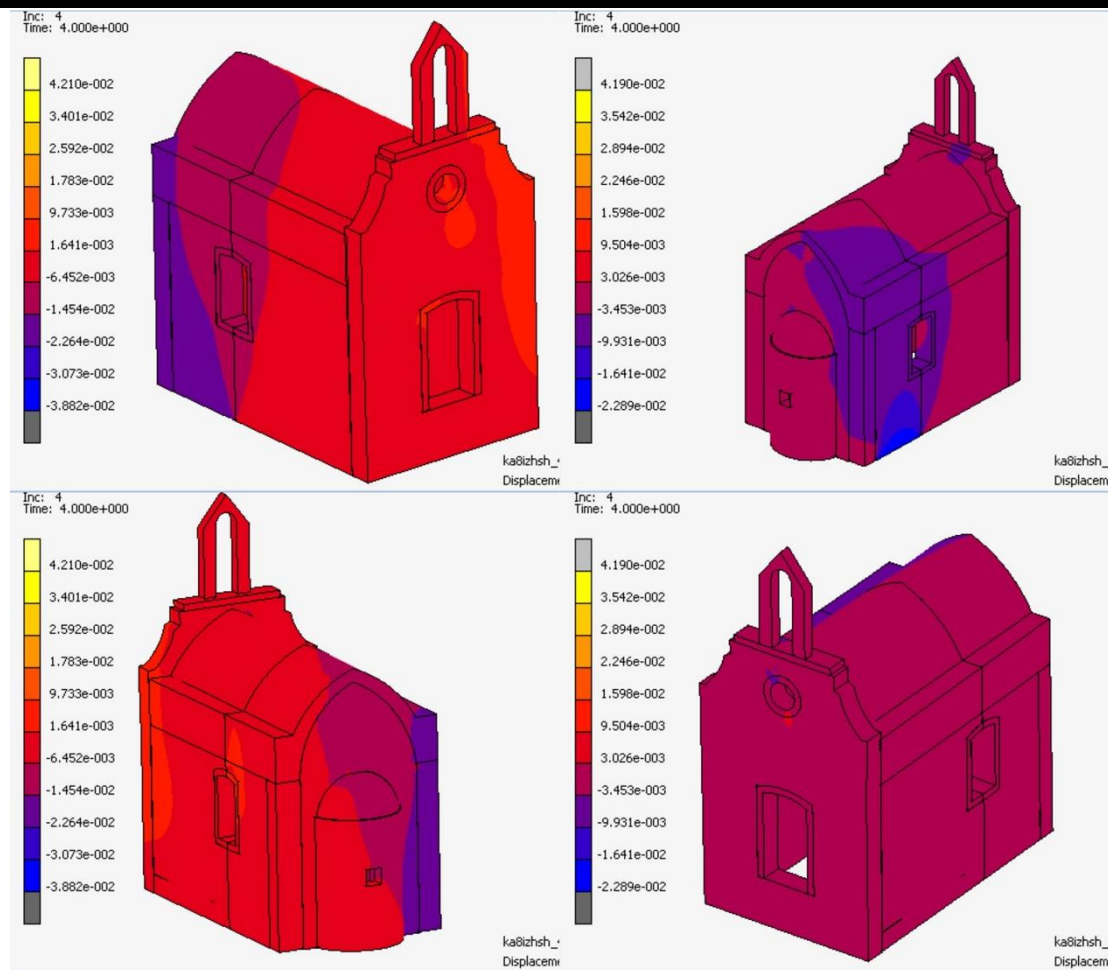


Εικόνα 9.29. Σενάρια καθιζήσεως που επιλύθηκαν για τον ναό του προφήτη Ηλία (ιδία επεξεργασία)



Σενάριο καθίζησης 1 Σενάριο καθίζησης 2 Σενάριο καθίζησης 3

Εικόνα 9.30. Αποτελέσματα σεναρίων καθίζησης 1 έως 3, με παρουσίαση των διαγραμμάτων μετακινήσεων στον άξονα Z(m)

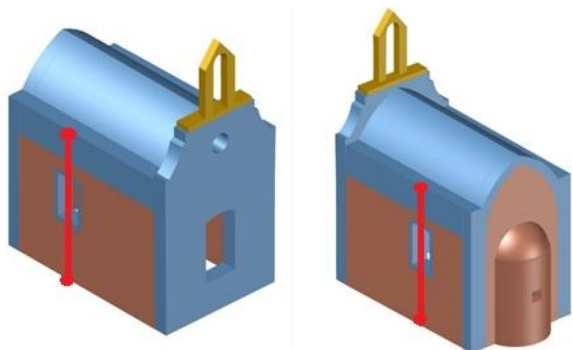


Σενάριο καθίζησης 4

Σενάριο καθίζησης 5

Εικόνα 9.31. Αποτελέσματα σεναρίων καθίζησης 4 και 5, με παρουσίαση των διαγραμμάτων μετακινήσεων στον άξονα Z(m)

9.3.8 Διερεύνηση αποτελεσματικότητας της εφαρμοσθείσας ενίσχυσης με διάταξη ελκυστήρων



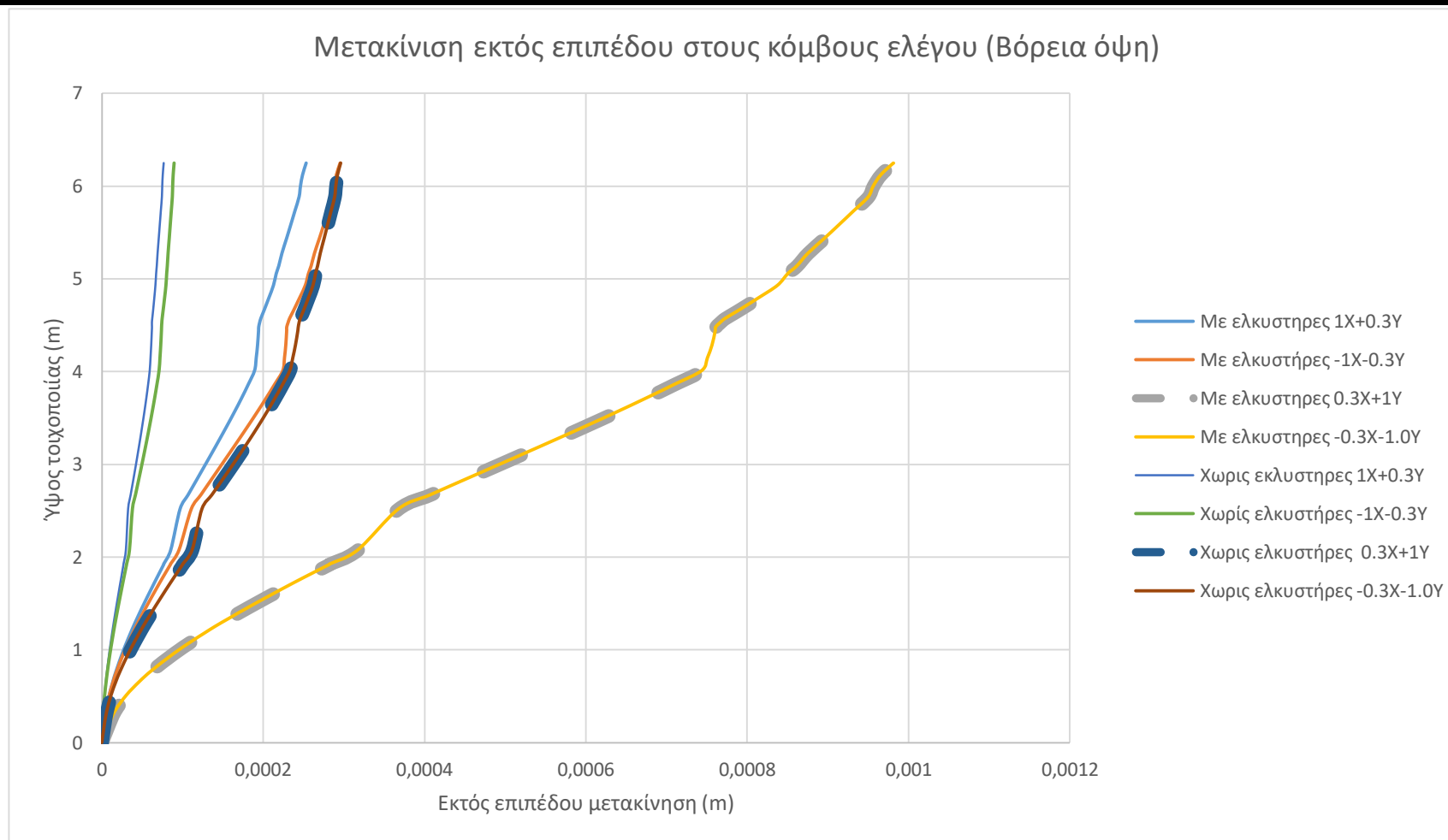
Η παρούσα ενότητα πραγματεύεται την αποτελεσματικότητα της διάταξης των ελκυστήρων που είχε εφαρμοσθεί στον ναό του προφήτη Ηλία στις Μουρνιές, με σκοπό την ενίσχυση του. Οι ελκυστήρες προσομοιώθηκαν σαν γραμμικά στοιχεία βάση των συστάσεων του ισχύοντος κανονισμού. Η επίλυση του μοντέλου του ναού, με την προσθήκη ελκυστήρων, έγινε για τους συνδυασμούς της σεισμικής διέγερσης $1X+0.3Y$, $-1X-0.3Y$, $0.3X+1Y$ και $-0.3X-1.0Y$.

Εικόνα 9.32. Θέσεις επιλογής κόμβων ελέγχου για την καταγραφή των εκτός επιπέδου μετακινήσεων. Αριστερά εικόνα βόρεια όψη, δεξιά νότια όψη (ιδία επεξεργασία)

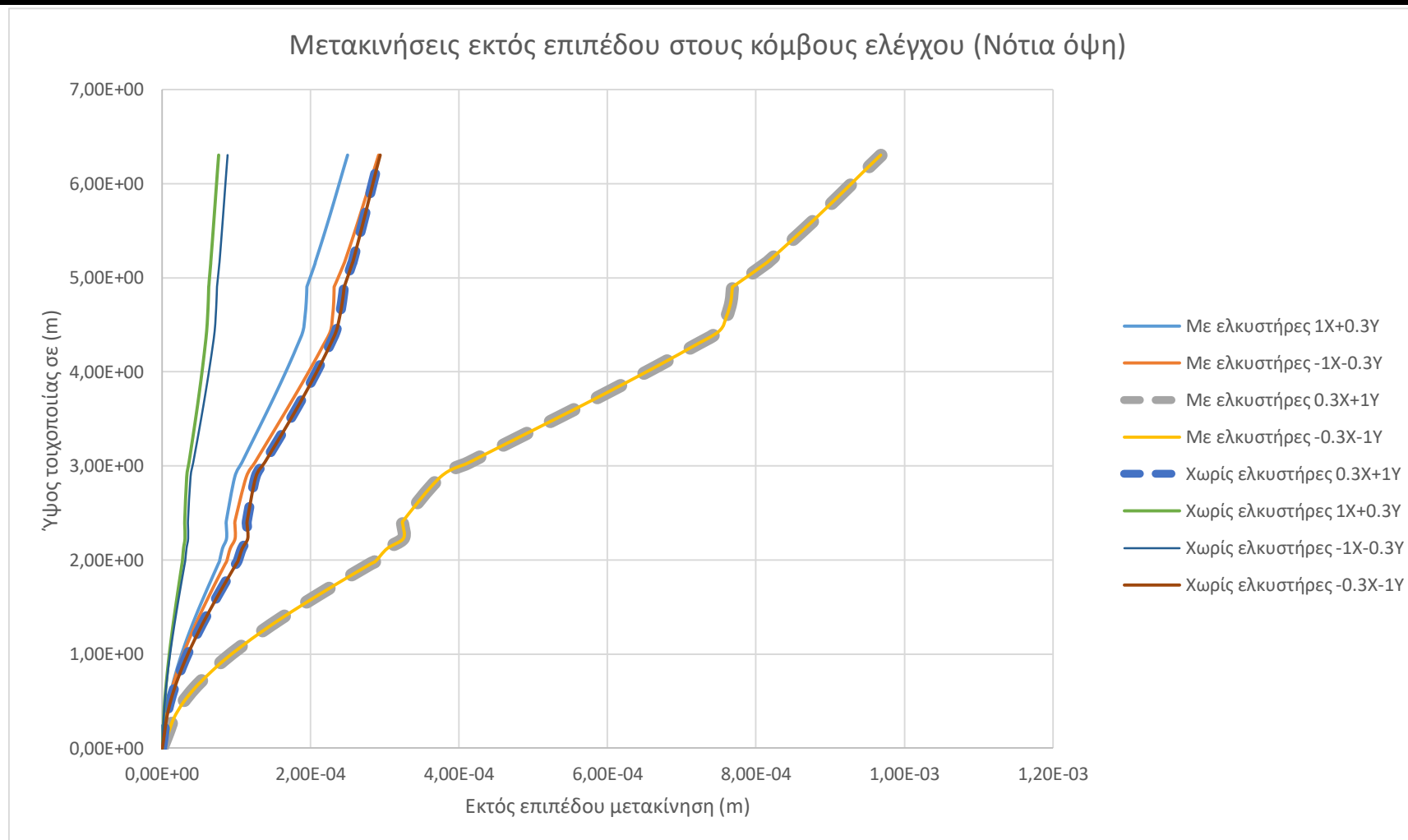
Για την σύγκριση των δύο διαφορετικών μοντέλων του ναού έγινε η επιλογή κόμβων ελέγχου. Κύριο κριτήριο επιλογής των κόμβων ελέγχου ήταν η παρουσία δομικών βλαβών και στην πραγματικότητα στον ναό. Οπότε τα σημεία που επιλέχθηκαν τελικώς είναι, οι περιοχές γύρω από τα παράθυρα των διαμηκών τοίχων (βλέπε Εικόνα 9.32).

Στην Εικόνα 9.33 και στην Εικόνα 9.34 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετακινήσεων εκτός επιπέδου του ναού. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις οι μετακινήσεις παρουσιάζουν μικρή απόκλιση ως προς τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Η μεγαλύτερη μετακίνηση εκτός επιπέδου παρατηρείται για τον συνδυασμό $-0.3X-1.0Y$ και στις δύο όψεις, για την περίπτωση ανάλυσης του μοντέλου χωρίς τους ελκυστήρες. Η μέγιστη τιμή της μετακινήσεως εκτός επιπέδου για το συγκεκριμένο συνδυασμό είναι 1mm.

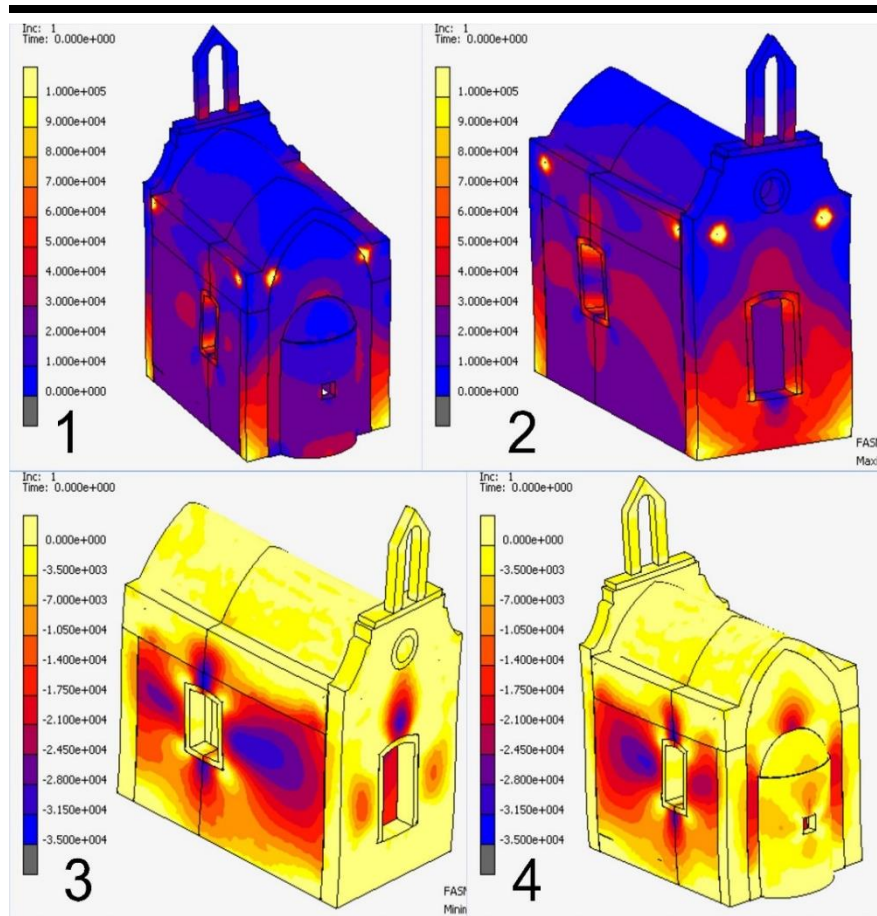
Στην Εικόνα 9.35, στην Εικόνα 9.36 και στην Εικόνα 9.37 παρουσιάζονται οι κατανομές των τάσεων για τις επιλύσεις που έγιναν στο μοντέλο του ναού. Συγκριτικά, με τα αποτελέσματα που έχουν παρατεθεί σε προηγούμενη ενότητα παρατηρείται ότι τα διαγράμματα παραμένουν τα ίδια χωρίς να παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στην κατανομή των τάσεων.



Εικόνα 9.33. Μετακινήσεις εκτός επιπέδου στους κόμβους ελέγχου στην Βόρεια όψη (ίδια επεξεργασία)

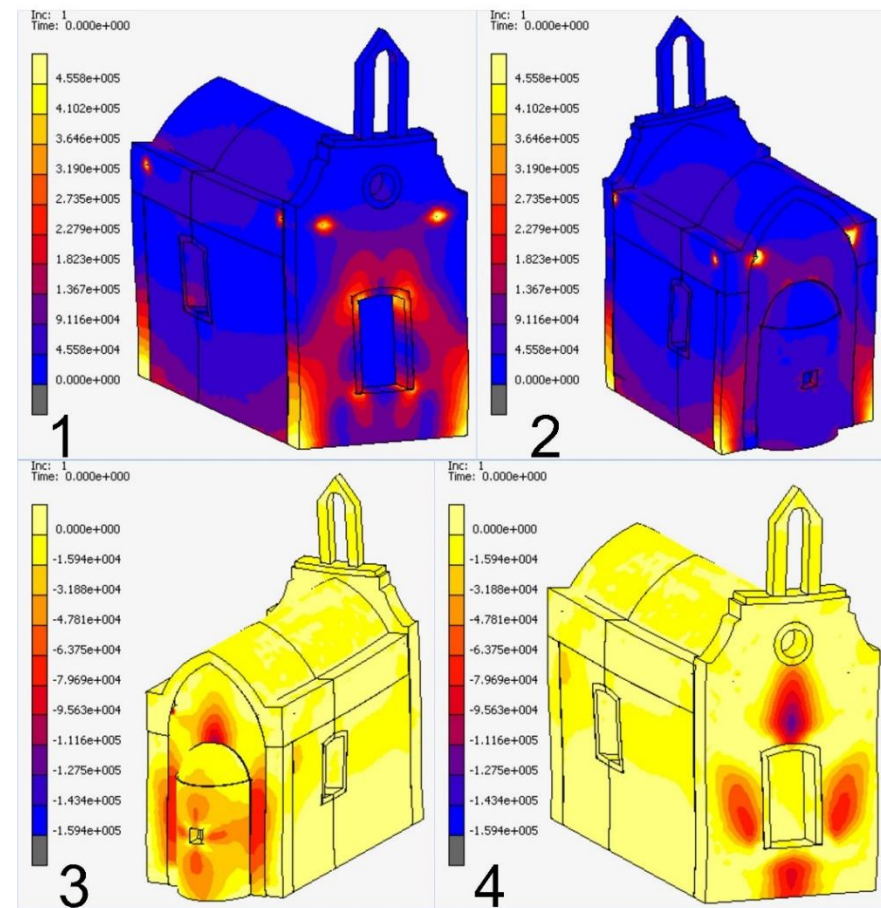


Εικόνα 9.34. Μετακινήσεις εκτός επιπέδου στους κόμβους ελέγχου στην Νότια όψη (ίδια επεξεργασία)



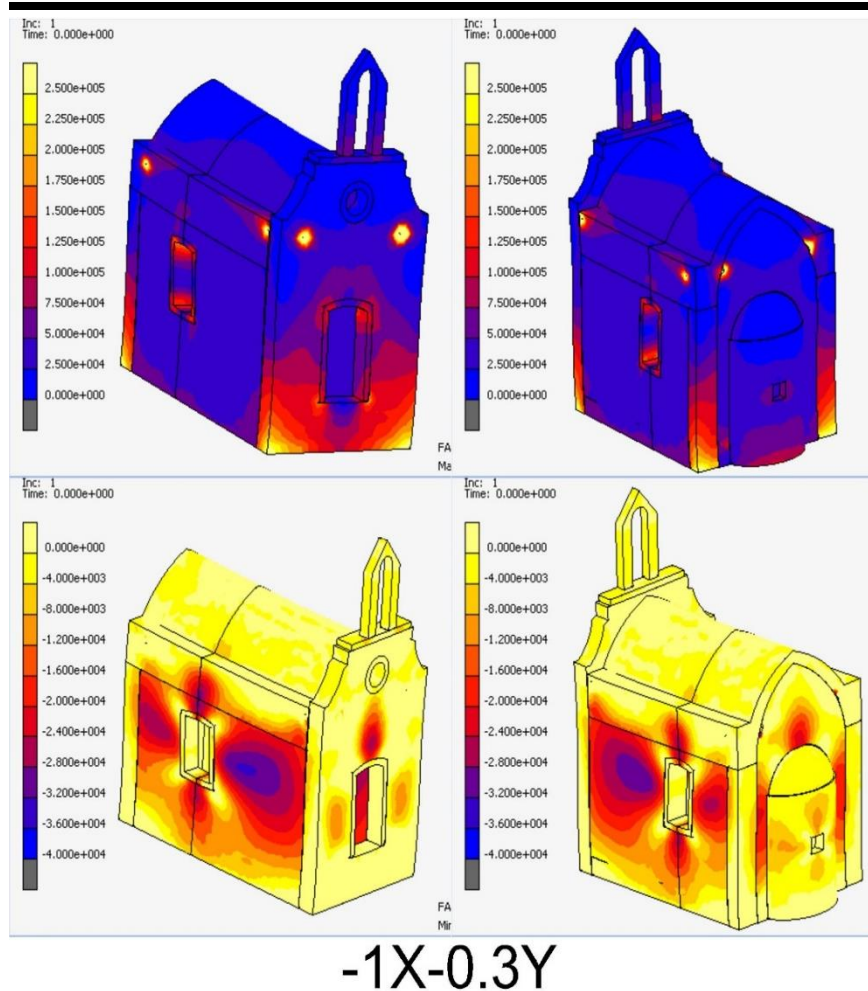
1X-0.3Y

Εικόνα 9.35. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (1X-0.3Y με ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)



-0.3X-1Y

Εικόνα 9.36. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (-0.3X-1Y με ελκυστήρες). (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 9.37. Διαγράμματα τάσεων εφελκυστικών με αριθμούς 1 και 2 ενώ με 3 και 4 τα αντίστοιχα των θλιπτικών τάσεων, για το συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης (1X-0.3Y με ελκυστήρες). (ίδια επεξεργασία)

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη διάταξη ελκυστήρων που υπάρχει στον ναό δεν προσφέρει αποτελεσματική ενίσχυση του φέροντος οργανισμού του. Τα προβληματικά μέρη του ναού, που είναι οι διαμήκης τοίχοι, δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από την ύπαρξη τους, μη βελτιώνοντας την συμπεριφορά τους στις δυναμικές φορτίσεις του σεισμού.

9.3.9 Πρόταση

Με βάση τις ιδιαίτερες αξίες του μνημείου προτείνονται οι παρακάτω ενέργειες αποκατάστασης του ναού του Προφήτη Ηλία:

- Επισκευή και βελτίωση συστήματος ελκυστήρων με προσθήκη τένοντα στο μέσον της ορθογωνικής κάτοψης ή μέσω εφαρμογής συστήματος εξωτερικής περιίδεσης του ναού.
- Ανακατασκευή τοπικά των σημείων που η τοιχοποιία παρουσιάζει ρωγμές και εκτός επιπέδου μετακίνηση.
- Εφαρμογή αρμολογήματος όπου απαιτείται.
- Αφαίρεση κυματοειδών φύλων ελενίτ από τον θόλο.
- Ανάλογα με την κατάσταση του θόλου, να εφαρμοστούν κονιάματα με σκοπό την στεγάνωση του και επισκευή των τυχόν ρωγμών που δύναται να παρουσιάζει.
- Διαμόρφωση των φυτεύσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να αναδεικνύεται το μνημείο.
- Αφαίρεση του δαπέδου από σκυρόδεμα και αντικατάσταση με δάπεδο από φυσικούς λίθους.
- Μελέτη φωτισμού ανάδειξης του μνημείου κατά τις νυχτερινές ώρες.
- Καθαίρεση καμπαναριού από οπλισμένο σκυρόδεμα και κατασκευή εκ νέου από λαξευτούς λίθους χρησιμοποιώντας τους λίθους από το περιβάλλοντα χώρο του ναού.
- Τοποθέτηση καθισμάτων στο εξωτερικό χώρο.

9.4 Μελέτη περίπτωσης Άγιος Γεώργιος ο Μορμόρης στα Νεροκούρου

9.4.1 Γενική Περιγραφή

Η εκκλησία που εξετάζεται στην παρούσα ενότητα βρίσκεται στην περιοχή εντός του οικισμού Νεροκούρου Κυδωνίας Χανίων, σε απόσταση περίπου 5 χιλιομέτρα από την πόλη των Χανίων και είναι αφιερωμένη στον Άγιο Γεώργιο τον Μεθυστή. Η χρονολόγηση της γίνεται περί τον 16^ο αιώνα ενώ έχει χαρακτηρισθεί μνημείο σύμφωνα με το «ΦΕΚ αριθ. Β1/Φ38/15663/348» και έχει γίνει η ένταξη της στην Β' αρχαιολογική ζώνη.

Το μετόχι του Αγίου Γεωργίου του Μορμόρη ανήκει στο τύπο του τετράπλευρου περικλειστού συγκροτήματος κτηρίων, που περιβάλλουν αυλή με μονόχωρο καθολικό στο κέντρο. Οι γενικές διαστάσεις της μονής είναι περίπου 41μ. επί 38μ.

Η εκκλησία του Αγίου Γεωργίου ανήκει στο ιδιαίτερο τύπο του μονόχωρου καμαροσκέπαστου ναού με διαστάσεις 9.40 μ. μήκος και 7.70μ. πλάτος. Η είσοδος του ναού τοποθετείται στην δυτική όψη του ενώ ανατολικά έχει διαμορφωθεί η ημικυκλική κόγχη. Άνω της θύρας της εισόδου βρίσκεται ο κυκλικός φεγγίτης και στην κορυφή το δίβολο κωδωνοστάσιο με κορμό στη βάση και στη στέψη Ο θόλος του ναού είναι οξυκόρυφος με αετωματικές απολήξεις. Στην βόρεια και νότια όψη βρίσκονται 6 αντηρίδες (3 σε κάθε πλευρά) για την ενίσχυση της ευστάθειας του φέροντος οργανισμού του ναού. Στα υψηλότερα σημεία των αντηρίδων είναι εμφανής κατά τόπο λιθοσυρραφές τύπου «Γ».Η κόγχη του ιερού είναι τριμερής εξωτερικά ενώ στην βάση της είναι παχύτερη δημιουργώντας έτσι μία κωνοειδή αντηρίδα . Τέλος, στην ανατολική όψη αποκαλύπτονται τα θεμέλια λόγω της σταδιακής διάβρωσης του εδάφους



Εικόνα 9.38. Άγιος Γεώργιος ο Μορμόρης στα Νεροκούρου

9.4.2 Δομικές βλαβές

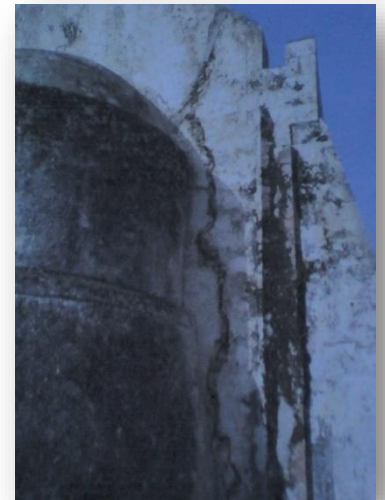
9.4.3 Υποενότητα ιστορικό βλαβών- Επεμβάσεων

Το ιστορικό των δομικών βλαβών που παρουσίασε καθώς και οι αντίστοιχες επεμβάσεις που έχουν γίνει στο ναό παλαιότερα στηρίχθηκε στην άντληση πληροφοριών από το Αρχείο της Εφορείας Βυζαντινών Αρχαιοτήτων του Νομού Χανίων.

- Σύμφωνα με τεχνική έκθεση που συντάχθηκε κατά το έτος 1990, από την Μαρία Ανδρεαδάκη-Βλαζάκη(με αριθμό Πρωτοκόλλου 1458),έγινε αναφορά ότι στο καθολικό της μονής του Αγίου Γεωργίου του Μορμόρη παρουσιάζονται σοβαρά προβλήματα υγρασίας.
- Στις 2-11-2007 σε επιστολή του ο Φρατζεσκάκης Στ. τονίζει την επικινδυνότητα της υφιστάμενης κατάστασης της μονής και κατ' επέκταση του καθολικού.
- Στις 4-11-2007 στο έγγραφο με αριθμό-Πρωτοκόλλου:6696 ο Μιχάλης Γ. Ανδριανάκης υπογράφει την έγκριση των παρακάτω εργασιών:
 - Την πραγματοποίηση της αποκατάστασης των ρηγματώσεων τόσο εξωτερικά όσο και εξωτερικά του ναού με την μέθοδο της Λιθοσυρραφής.
 - Εκπόνηση διερευνητικών εργασιών όσο αφορά την θεμελίωση του ναού προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα των ρηγματώσεων της τοιχοποιίας.

Επιπλέον κατά την ημερομηνία 20-12-2007 σε ανυπόγραφη τεχνική έκθεση αναφέρονται τα εξής δομικά προβλήματα του ναού:

- Η ύπαρξη καθίζησης με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργία μεγάλων κάθετων ρωγμών τόσο στα δεξιά όσο και στα αριστερά του ιερού.



Εικόνα 9.39. Ρωγή στη βορειοανατολική πλευρά του ναού κατά το έτος 2007 (αρχείο ΕΦΑ)

- Τονίζεται η ύπαρξη ρωγμών εσωτερικά στο ιερό του ναού και μία συνεχής ρωγμή στο θόλο με κατεύθυνση βορά- νότο στην περιοχή των παραθύρων.
- Η κατάσταση του καμπαναριού παρουσιάζει φθορές στα διακοσμητικά του στοιχεία ,αποκολλήσεις και διαβρώσεις στα μεταλλικά του στοιχεία.
- Υφίστανται μικρορωγμές στα επιχρίσματα κυρίως στην δυτική όψη του ναού.
- Στις 8/11/2018 στην τεχνική έκθεση των μηχανικών Γεώργιος Χαραλαμπίδης & Βαρβάρα Χαραλαμπίδη αναφέρονται τα ακόλουθα για το καθολικό της μονής:

Εσωτερικά του ναού

- Παρουσιάζονται έντονες ρηγματώσεις καθ' ύψος της βορειανατολικής εσωτερικής γωνίας του ιερού του ναού οι οποίες επεκτείνονται και στο βόρειο τοίχο.
- Μικρότερου εύρους ρηγματώσεις καθ' ύψος του ανατολικού τοίχου του Ιερού του ναού.
- Μικρού εύρους ρηγματώσεις στο δυτικό τοίχο του ναού , πάνω από την είσοδο του.

Εξωτερικά του ναού

- Στο δυτικό τοίχο του ναού, στην εξωτερική παρειά του (δεξιά της εισόδου) παρατηρείται μια έντονη βαθιά καθ' ύψος ρωγμή, που φαίνεται όμως να μην είναι διαμπερής.

- Στον νότιο τοίχο του ναού, στην εξωτερική παρειά του και πάνω από το ύψος του παραθύρου παρατηρείται ρωγμή, η οποία έχει επαλειφθεί πρόχειρα με τσιμεντοκονίαμα σε παλαιότερο χρόνο, για την επισκευή της.
- Στον ανατολικό τοίχο του ναού, στην εξωτερική παρειά του και δυτικά του Ιερού, εμφανίζεται έντονη σε βάθος καθ' ύψος ρωγμή.
- Στον ίδιο τοίχο, ανατολικά του ιερού, στην εξωτερική παρειά, εμφανίζεται έντονη καθ' ύψος ρωγμή η οποία έχει επαλειφθεί και αυτή μερικώς και πρόχειρα με τσιμεντοκονίαμα σε παλιότερο χρόνο.
- Εμφανείς ρηγματώσεις παρατηρούνται στη στέψη του καμπαναριού.
- Η ύπαρξη των τριών αντηρίδων σε καθένα από τους βόρειο και νότιο τοίχους του ναού προσδίδουν στατική ανακούφιση στο κέλυφος.



Εικόνα 9.40. Φωτογραφίες από τις δομικές βλάβες που είχε το καθολικό κατά το έτος 2018 (Αρχείο ΕΦΑ)



επεξεργασία)

9.4.4 Υφιστάμενη κατάσταση

Η υφιστάμενη κατάσταση του ναού αποτυπώθηκε κατόπιν αυτοψίας κατά τα έτη 2021 και 2022 αρχικά στην αποτύπωση της στο πλαίσιο της ομαδικής εργασίας «Θεματικό εργαστήριο» για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα της Αρχιτεκτονικής Σχολής του Πολυτεχνείου Κρήτης ενώ στην συνέχεια έγινε επικαιροποίηση της ήδη υφιστάμενης αποτύπωσης στο πλαίσιο ερευνητικής εργασίας (Stavroulaki M.E.,2023).

Αρχικά στην δυτική όψη του ναού παρουσιάζονται κάθετες ρωγμές εκατέρωθεν της θύρας της εισόδου οι οποίες είναι ασβεστωμένες στο μεγαλύτερο τμήμα τους, σε συνδυασμό με τις ρωγμές δύο λοξές ρωγμές κάτω από τον φεγγίτη. Στην βόρεια όψη παρουσιάζεται μία κάθετη ρωγμή που εκτείνεται από την βάση της τοιχοποιία στην βάση του παραθύρου μέχρι την στέψη της στέγης. Η ρωγμή εκτείνεται (όντας επισκευασμένη) στο θόλο του ναού. Στην νότια όψη υπάρχει κάθετη ρωγμή που ξεκινάει από την βάση της τοιχοποιίας κάτω από το παράθυρο μέχρι την στέψη της στέγης. Επιπλέον

είναι εμφανής μία λοξή ρωγμή που ξεκινάει από την βάση του παραθύρου και συνεχίζεται μέχρι την ανατολική γωνία της τοιχοποιίας υπό γωνία 45 μοιρών η οποία συνεχίζεται μέχρι και την ανατολική όψη. Στον θόλο φαίνονται ίχνη επισκευών τριών διαφορετικών ρωγμών. Στην ανατολική

όψη είναι εμφανείς εκατέρωθεν της κόγχης του ναού επισκευασμένες, με τσιμεντοκονίαμα, δύο κάθετες ρωγμές. Η κόγχη φέρει ίχνη επισκευής μία ρωγμής με τσιμεντοκονίαμα και άνω του τυμπάνου της κόγχης παρουσιάζεται μία κάθετη ρωγμή στο μέσον του αετώματος.

9.4.5 Ιδιότητες υλικών ναού

Στην Εικόνα 9.42 παρουσιάζεται η εκτίμηση του τρόπου δόμησης του ναού του Αγίου Γεωργίου που βρίσκεται στα Νεροκούρου και προέκυψε κατόπιν εκτιμήσεων και οπτικής παρατήρησης της κατασκευής.



Εικόνα 9.42. Τρόπος δόμησης του ναού Αγίος Γεώργιος στα Νεροκούρου (ιδία επεξεργασία)

Για να γίνεται εκτίμηση των δυναμικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας του ναού, πραγματοποιήθηκαν κάποιες παραδοχές και συσχετίσεις με πειραματικές μετρήσεις. Καθώς υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις των χαρακτηριστικών των κονιαμάτων και λίθων από τα γειτονικά κτήρια του του μοναστηριού θεωρήθηκε ότι και ο ναός θα απαρτίζεται από υλικά με παρόμοιες ιδιότητες. Αναλυτικότερα οι ασβεστόλιθοι, από τους οποίους κτίστηκε ο ναός, έχουν πυκνότητα με τιμή 2.38gr/ml. Επιπλέον, το αρμολόγημα που έχει εφαρμοστεί στις Δαρμαράκης Παναγιώτης

γειτονικές κατασκευές προκύπτει να είναι ασβεστοκονίαμα με μικρή υδραυλικότητα και τα αδρανή που απαρτίζεται να είναι πυριτική ή χαλαζιακή άμμος. Η πυκνότητα του αρμολογήματος εκτιμάτε να έχει τιμή 1,39gr/ml.

Πέραν των χημικών αναλύσεων που έχουν γίνει στον ναό έχουν εφαρμοστεί μη καταστροφικές μέθοδοι εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων του. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν ήταν εκείνη της κρουσιμέτρησης και των υπερήχων, μετά από παραχώρηση του σχετικού εξοπλισμού από το «Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής» του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επιπλέον, για την τελική εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών τοιχοποιίας έγινε συσχέτιση με τις τιμές που παρουσιάζονται στο Παράρτημα του Κεφαλαίου 3 του κανονισμού ΚΑΔΕΤ. Οι τιμές που εισήχθησαν στο μοντέλο παρουσιάζονται στους πίνακες παρακάτω. (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021)

Αντοχή τοιχοποιίας από λαξευτούς λίθους

Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας (Mpa)	4.98
Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	4.2
ν (λόγος poisson)	0.30

Πίνακας 9-4. Τιμές εκτίμησης των χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας από λαξευτούς λίθους (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021)

Αντοχή αργολιθοδομής

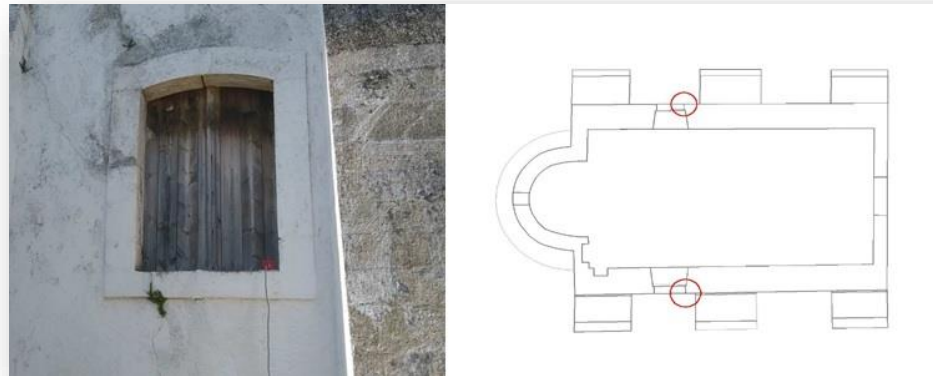
Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας (Mpa)	2.53
Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	1.62
ν (λόγος poisson)	0.30

Πίνακας 9-5. Τιμές εκτίμησης χαρακτηριστικών αργολιθοδομής (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021)

9.4.6 Δυναμικά χαρακτηριστικά ναού

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ναού προέκυψαν από εφαρμογή της μεθόδου OMA (Operational modal analysis, η περιγραφή της μεθόδου έχει γίνει στο κεφάλαιο 4). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης δοκιμής παραχωρήθηκε από το «Εργαστήριο εφαρμοσμένης Μηχανικής» του Πολυτεχνείου Κρήτης.

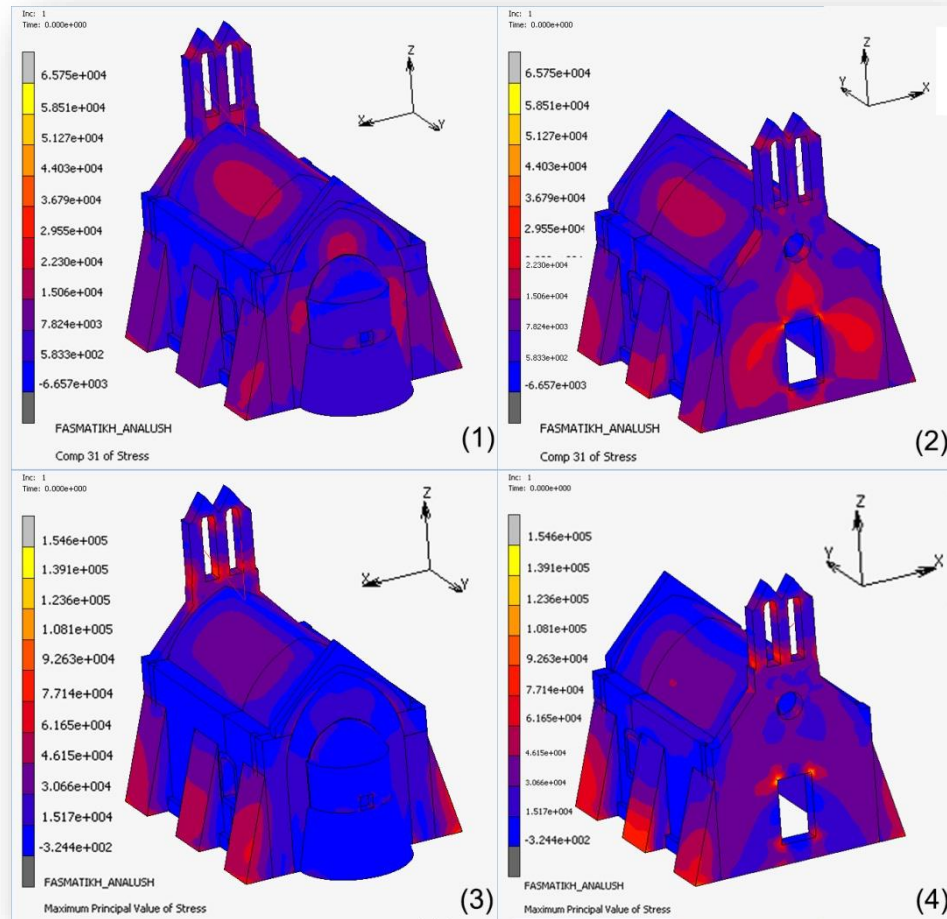
Αρχικά, οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.43 ενώ ο χρόνος της δειγματοληψίας των αισθητήρων ορίστηκε 10 λεπτά. Έπειτα, έγινε η επεξεργασία των δεδομένων μέσω των προγραμμάτων Artemis Testor & Artemis Extractor. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν οι διάφορες χαρακτηριστικές συχνότητες του ναού οι οποίες συγκρίθηκαν με εκείνες του ψηφιακού μοντέλου που δημιουργήθηκε για την στατική και δυναμική ανάλυση του ναού μέσω του προγράμματος Marc mentat (βλέπε Πίνακας 9-6). Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων παρατηρείται ότι, οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν μέσω του ψηφιακού μοντέλου με αύξον αριθμό και τιμή αντίστοιχα, 1^η (7.82Hz) , 2^η (9.82Hz), 11^η (22.69Hz) και 14^η (28.44Hz) παρουσίασαν αρκετά μικρή απόκλιση σε σύγκριση με εκείνες που μετρήθηκαν στο πεδίο (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021).



Εικόνα 9.43. Θέση τοποθέτησης αισθητήρων (Αυγέρου Ν. κ.α., 2021)

Α/Α Ιδιομορφής	Ιδιοσυχνότητες ναού που υπολογίσθηκαν βάσει του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων	Ποσοστό μάζας του ναού που ενεργοποιήθηκε			Ιδιοσυχνότητες που υπολογίσθηκαν από τις μετρήσεις του πεδίου
		X	Y	Z	
1	7.87	0.071	3.98	0.04	7,63
2	9.82	75.74	3.99	0.04	9,95
3	13.74	75.92	4.3	0.09	11.57
4	14.27	75.93	4.46	0.09	11.98
5	14.68	75.93	87.65	0.15	12.33
6	17.19	76.75	87.65	0.16	16.15
7	20.37	76.93	89.83	0.25	16.41
8	20.51	79.23	90,01	0.26	21.35
9	21.00	79.23	90.26	0.27	21.89
10	21.71	82.21	90.26	0.27	22.31
11	22.69	92.19	90.27	0.28	25.99
12	25.18	92.19	91.13	0.33	26.41
13	27.31	92.43	91.15	0.34	28.62
14	28..44	93.31	91.15	0.37	29.48
15	28.79	93.43	91.19	0.17	

Πίνακας 9-6. Συγκεντρωτικός πίνακας από τις συχνότητες που μετρήθηκαν το πεδίο και από εκείνες που υπολογίσθηκαν μέσω της ιδιομορφικής ανάλυσης



Εικόνα 9.44. Αποτελέσματα ανάλυσης για τον συνδυασμό φόρτισης $1.0E_x + 0.3E_y$, όπου 1-2 οι διατμητικές τάσεις στον άξονα S_{zx} και οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στις εικόνες 3-4 (σε Pa)

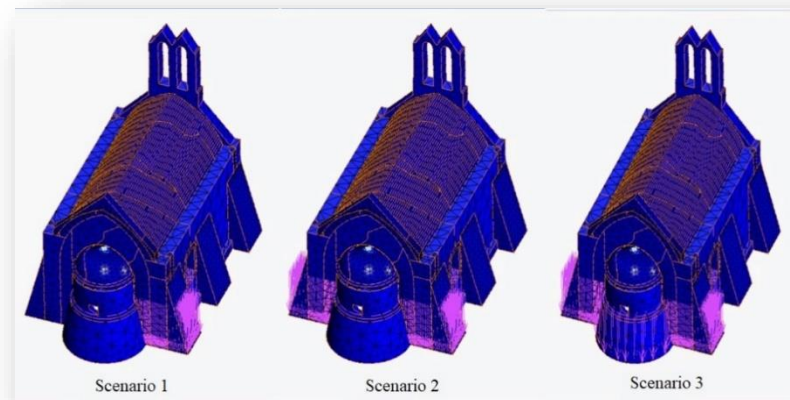
9.4.7 Αποτελέσματα αναλύσεων

Οι σεισμικοί συνδυασμοί με τους οποίους φορτίστηκε η κατασκευή αναλύθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 5. Από αυτούς ο χαρακτηριστικότερος παρουσιάζεται να είναι ο $1.0E_x + 0.3E_y$. Στις εικόνες 1 και 2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διατμητικών τάσεων ενώ στις εικόνες 3-4 τα διαγράμματα των εφελκυστικών τάσεων σε Pa. Παρατηρείται ότι στα σημεία που εμφανίζονται συγκεντρώσεις τάσεων έχουν παρουσιαστεί στην πραγματικότητα ρωγμές.

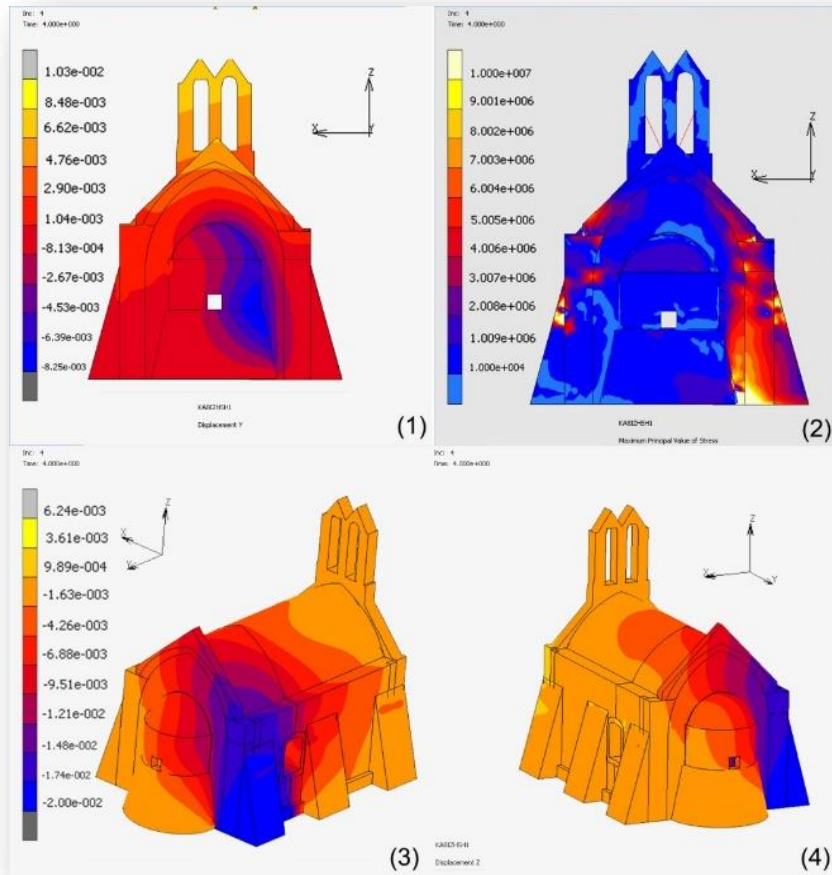
Συμπληρωματικά των δυναμικών αναλύσεων διεξήχθησαν αναλύσεις που αφορούσαν διάφορα σενάρια καθίζησης της ανατολικής όψης του ναού (βλέπε Εικόνα 9.45). Το πρώτο σενάριο αφορούσε την καθίζηση της νοτιανατολικής γωνία του ναού, το δεύτερο την νοτιανατολική γωνία του ναού και την περιοχή της κόγχης του ιερού και το τρίτο το σύνολο της ανατολικής πλευράς του ναού. Σε όλα τα σενάρια η τιμή της καθίζησης που εισήχθη στο μοντέλο ήταν 2 εκατοστά καθώς δεν παρατηρήθηκε στο πεδίο κάποια ακραία διαφορετική καθίζηση του φέροντος οργανισμού.

Στις εικόνες παρακάτω εικόνες των αποτελεσμάτων των σεναρίων παρουσιάζονται με το αριθμό 1 οι εκτός επιπέδου μετακινήσεις της κόγχης, με αριθμό 2 οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις και με αριθμό 3,4 η κατακόρυφη μετακίνηση του ναού.

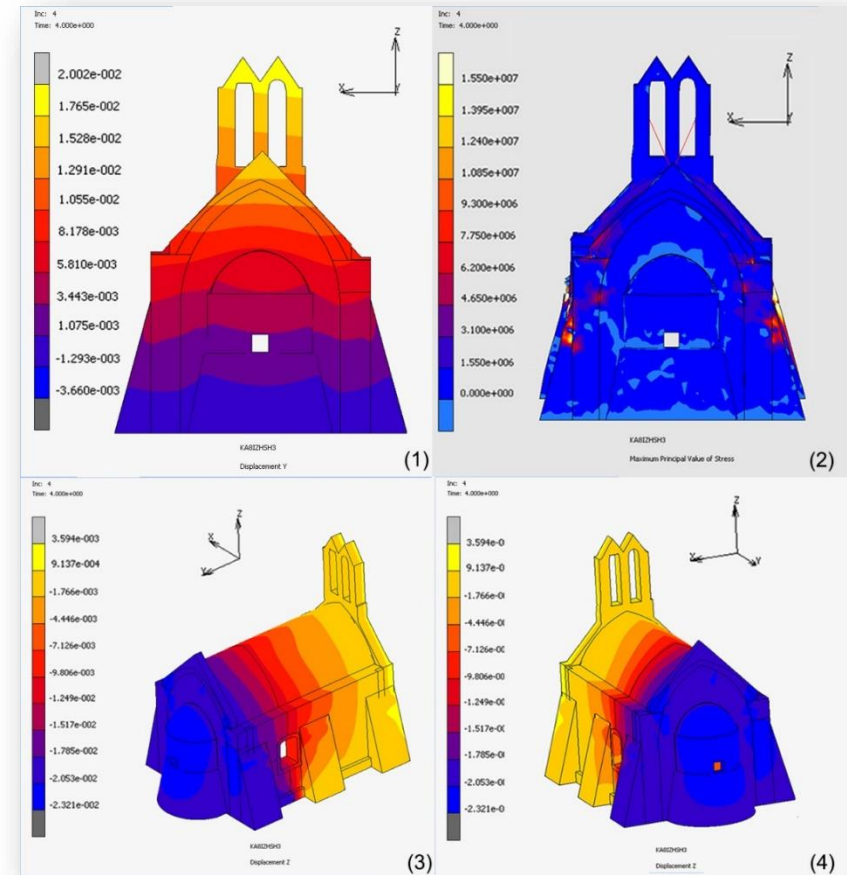
Από την σύγκριση των διαφόρων σεναρίων προκύπτει ότι το σενάριο που προσομοιάζει καλύτερα την υφιστάμενη κατάσταση των δομικών βλαβών του ναού είναι το σενάριο 2.



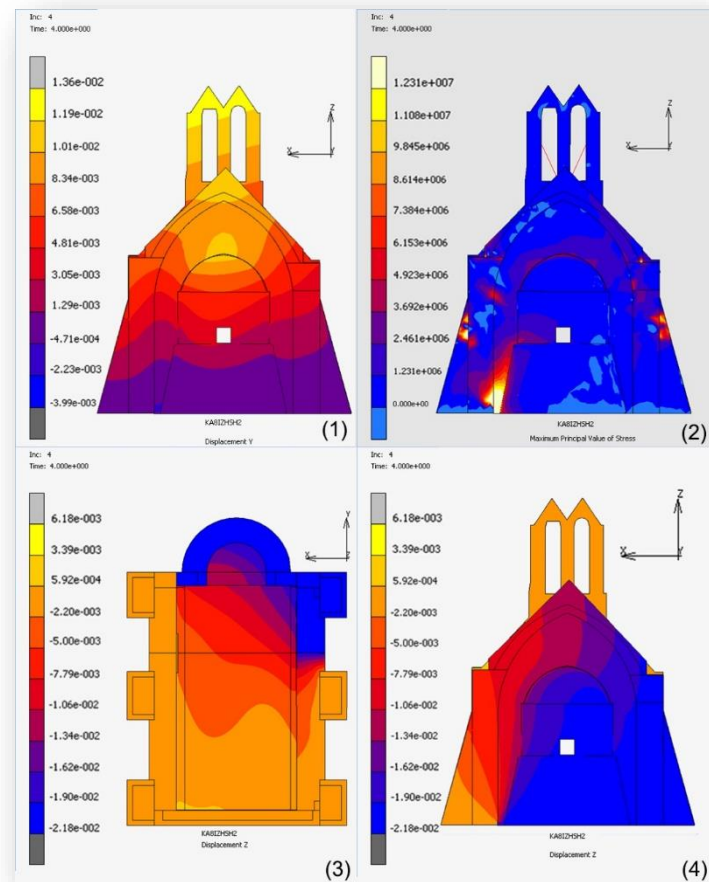
Εικόνα 9.45. Σενάρια καθίζησης



Εικόνα 9.47. Αποτελέσματα ανάλυσης για το σενάριο 1



Εικόνα 9.46. Αποτελέσματα αναλύσεων για το σενάριο 3



Εικόνα 9.48. Αποτελέσματα αναλύσεων για το σενάριο 2

9.4.8 Πρόταση αποκατάστασης

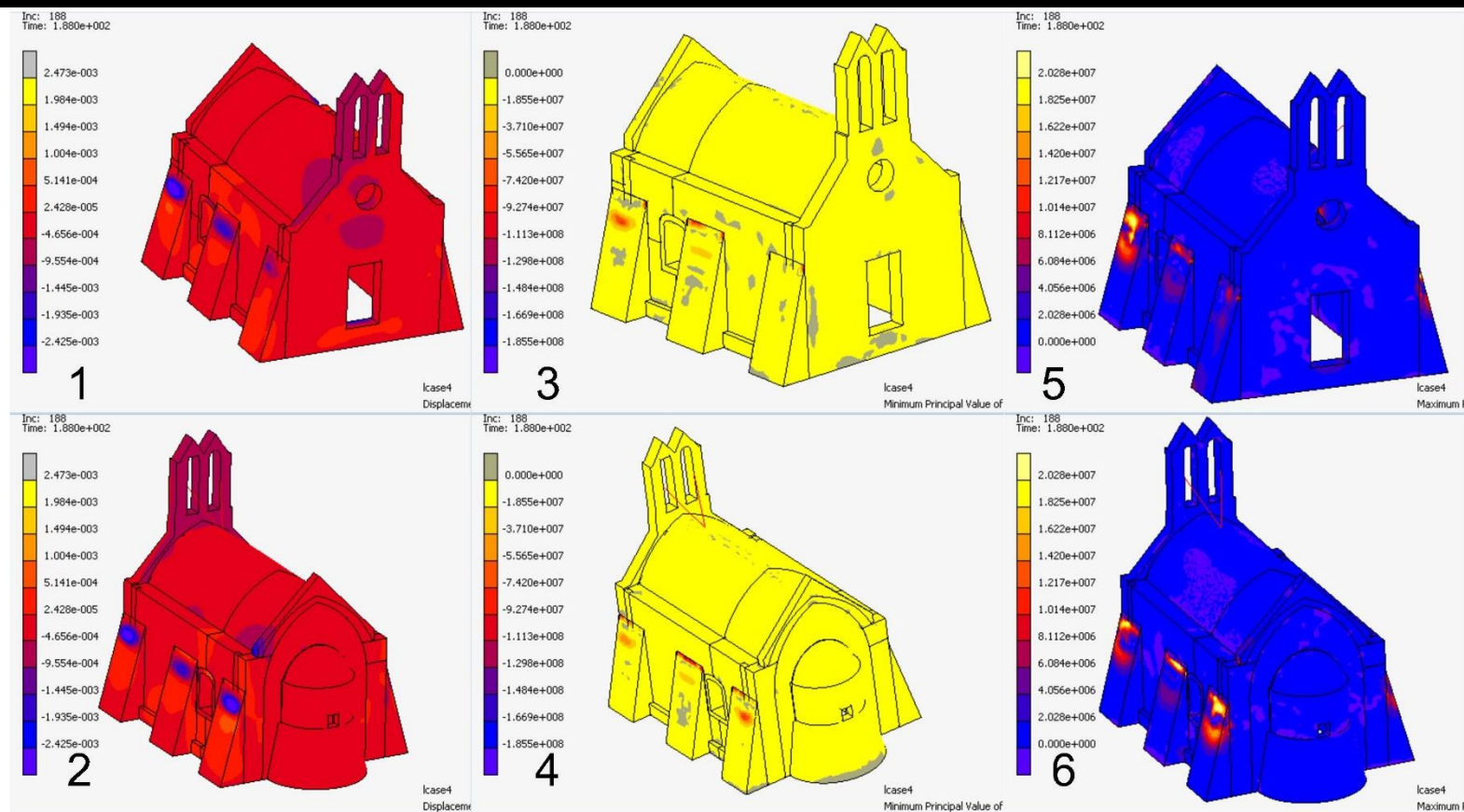
Η πρόταση αποκατάστασης όσο αφορά τις κατασκευαστικές μεθόδους που θα εφαρμοστούν θα μπορούσε να γίνει σύμφωνα με την χάρτα της βενετίας 1967

- Αρχαιολογική έρευνα και εκσκαφή για την αποκάλυψη νέων στοιχείων
- Εκσκαφή των θεμελίων για αυτοψία και θα αποφασισθεί αν απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση αν χρειάζονται πάσσαλοι ή αν χρειάζεται να γίνει εφαρμογή δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Εφαρμογή αρμολογήματος παρόμοιας σύστασης και αντοχής με τα ήδη υπάρχοντα, ασβεστόλιθοι των ίδιων διαστάσεων, σύνδεση των λίθων είτε με λιθοσυρραφή είτε με μεταλλικά ελάσματα.
- Μπάζωμα με χώμα στην περιοχή της κόγχης του ιερού για περίπου 0.5m
- Διατήρηση και αποκατάσταση των υδρορροών σύμφωνα με τα υπάρχοντα ίχνη στην τοιχοποιία
- Αποκατάσταση του καμπαναριού
- Χρωματική αποκατάσταση του εξωτερικού, με μέριμνα για την διατήρηση των ήδη υπαρχόντων χρωματισμών.

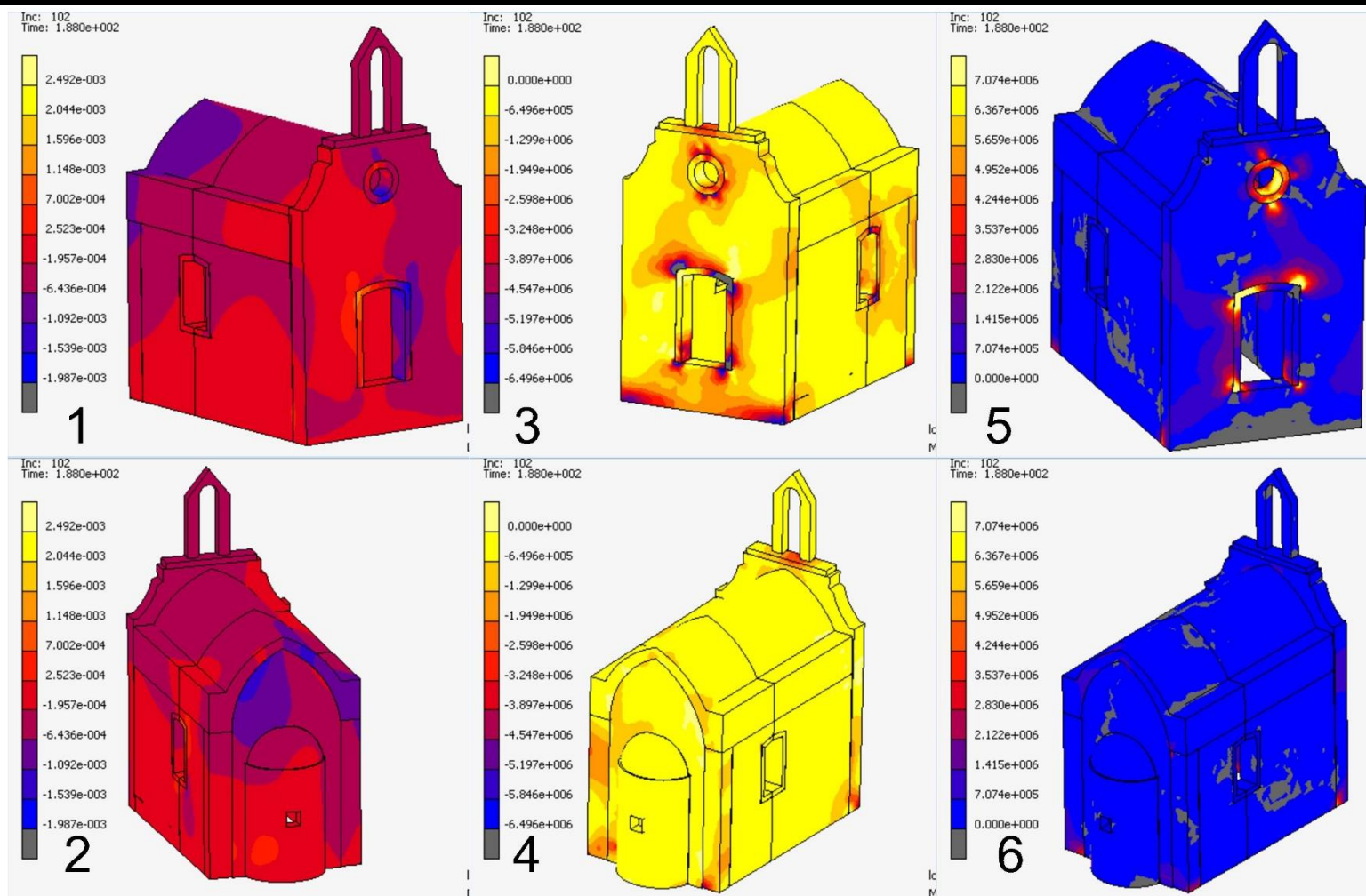
9.5 Διερεύνηση της επίδρασης των αντηρίδων στην φέρουσα ικανότητα των ναών

Ο ρόλος των αντηρίδων στην στατική λειτουργία του φέροντος οργανισμού ενός ναού αποτελεί ένα αρκετά ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης. Στην έρευνα που βρίσκεται στο παράρτημα Ε γίνεται αναφορά στην επίδραση που έχουν όσον αφορά την λειτουργία του φέροντος ναού του Αγίου Γεωργίου του Μορμόρη (Stavroulaki M.E. κ.α.,2023). Σε αυτήν την ενότητα θα παρατεθούν τα συγκρίσιμα παραδείγματα των ναών του Αγίου Γεωργίου του Μορμόρη στα νεροκούρου και του προφήτη Ηλία στις Μουρνιές. Ο μεν πρώτος έχει διαστάσεις ύψους 6,37μ., πλάτους 6.24μ. και μήκους 9.82μ. ενώ ο δε δεύτερος έχει διαστάσεις ύψους 5.82μ. πλάτους 4μ. και μήκους 7μ.

Στην Εικόνα 9.49 και στην Εικόνα 9.50 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις κατά τον άξονα Z, τα διαγράμματα θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων των δύο ναών. Στην περίπτωση του προφήτη Ηλία, παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων τόσο θλιπτικών όσο και εφελκυστικών σε θέσεις που έχουν εμφανιστεί βλάβες στο ναό στην πραγματικότητα. Το ίδιο συμβαίνει και στο διάγραμμα μετακινήσεων ως προς τον άξονα Z. Σε αντίθεση με αυτά έρχεται η εικόνα των μετακινήσεων και της κατανομής των τάσεων στο ναό του Αγίου Γεωργίου του Μορμόρη. Οι συγκεντρώσεις των τάσεων παρουσιάζονται να βρίσκονται στις αντηρίδες «ανακουφίζοντας» έτσι την υπόλοιπη κατασκευή. Με βάση αυτά συμπεραίνεται ότι η ύπαρξη των αντηρίδων βελτιώνει την πλευρική ευστάθεια των διαμήκων τοίχων του ναού, αυξάνοντας έτσι την αντοχή του έναντι εντατικών μεγεθών εκτός επιπέδου κάμψης.



Εικόνα 9.49. Αποτελέσματα ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρονιοιστορία βάσης, για το σεισμό της Ζακύνθου 2018, και ειδικότερα για ναό του Αγίου γεωργίου του μορμόρη. Με αριθμούς 1,2 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στο κατακόρυφο άξονα Z (m), με 3,4 τα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων (Pa) και με 5,6 τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων (Pa).



Εικόνα 9.50. Αποτελέσματα ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρονιοιστορία βάσης, για το σεισμό της Ζακύνθου 2018, και ειδικότερα για ναό του Προφήτη Ηλία. Με αριθμούς 1,2 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στο κατακόρυφο άξονα Z (m), με 3,4 τα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων (Pa) και με 5,6 τα διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων (Pa).

10. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, κατά την μελέτη αποκατάστασης ενός μονόχωρου ναού και γενικότερα ενός υφιστάμενου κτιρίου συνίσταται να ακολουθήσει μια σειρά εργασιών. Σαν πρώτη ενέργεια θα πρέπει να αναζητείται το ιστορικό του κτιρίου μέσα από τα αρχεία που υπάρχουν διαθέσιμα σε δημόσιες υπηρεσίες (π.χ. αρχαιολογία, πολεοδομία, βιβλιοθήκες κ.α.). Εν συνεχεία, αν υπάρχει διαθέσιμη αποτύπωση θα πρέπει να διαπιστωθεί η ορθότητα της, διαφορετικά θα πρέπει να συνταχθούν αναλυτικά σχέδια (κατόψεις, τομές όψεις). Σε επόμενο στάδιο, γίνεται αυτοψία στο υπό μελέτη κτίριο όπου διαπιστώνεται η τυχόν δυσκολία συλλογής των πρωτόγεννων δεδομένων. Σε αυτό το στάδιο της έρευνας φωτογραφίζεται λεπτομερώς τόσο το εσωτερικό όσο και το εξωτερικό του κτιρίου και γίνεται η καταγραφή των υφιστάμενων δομικών βλαβών. Κατόπιν, γίνεται διερεύνηση του τρόπου δόμησης και των κατασκευαστικών φάσεων του κτιρίου. Στο συγκεκριμένο βήμα πιθανόν να απαιτηθεί να αφαιρεθεί μέρος των επιχρισμάτων σε χαρακτηριστικά μέρη της κατασκευής. Όσο αφορά την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της φέρουσας τοιχοποιίας μπορεί να γίνει εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων και σε περίπτωση που είναι δυνατό να γίνει λήψη καρótων για την διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών. Αφού, γίνει η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων σειρά έχει η διεξαγωγή διερευνητικών αναλύσεων με σκοπό την ταυτοποίηση των δομικών βλαβών και αιτιών που προκάλεσαν τις δομικές βλάβες στο υπό μελέτη κτίριο. Τέλος, γίνεται η επίλυση του κτιρίου βάση του ισχύοντος κανονισμού με τελικό αποτέλεσμα τη σύνταξη της μελέτης αποκατάστασης.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εκτενώς στις προηγούμενες ενότητες γίνεται αντιληπτό ότι, στους μονόχωρους καμαροσκέπαστους ναούς, τα κύρια εντατικά μεγέθη που προκαλούν αστοχία είναι ο εφελκυσμός και η διάτμηση που αναπτύσσεται λόγω κάμψης εκτός επιπέδου. Βέβαια τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ναού επηρεάζουν τόσο θετικά όσο και αρνητικά την τελική αντοχή του. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι το έδαφος θεμελίωσης οι λίθοι που απαρτίζουν την τοιχοποιία, ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας και οι συνδέσεις μεταξύ διαμικών και εγκάρσιων τοίχων. Ως «ιδανικό» έδαφος θεμελίωσης είναι το βραχώδες ενώ ο ιδανικότερος τρόπος δόμησης είναι εκείνος με χρήση λαξευτών λίθων.

Οι δράσεις του περιβάλλοντος μπορούν να επιταχύνουν την εμφάνιση των διαφόρων δομικών αστοχιών της κατασκευής. Ναοί για παράδειγμα που βρίσκονται σε παράκτιο περιβάλλον, δηλαδή σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, παρουσιάζουν ταχεία απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, με τις δομικές βλάβες να παρουσιάζονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Επιπλέον η παρουσία των δυναμικών δράσεων όπως είναι οι καθιζήσεις και οι δυναμικές φορτίσεις λόγω σεισμού δύναται να προκαλέσουν αστοχία στην κατασκευή. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αντιληπτό πως σε μία κατασκευή η οποία υφίσταται αρκετούς αιώνες, στην πλειονότητα των περιπτώσεων ο συνδυασμός όλων των φαινομένων την οδηγούν τελικώς να αστοχήσει, ενώ συγχρόνως μπορεί ανά τα έτη να έχουν γίνει πολλαπλοί κύκλοι επιδιορθώσεων και ενισχύσεων της κατασκευής.

Τα κυρία μέρη των μονόχωρων καμαροσκέπαστων ναών που δύναται υπό συνθήκες να εμφανίσουν δομικές βλάβες είναι πολλά και θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή τόσο στην αποκατάσταση των παλαιών ναών, όσο και στην κατασκευή νεότερων. Σε αυτά συγκαταλέγονται, γενικώς, οι περιοχές γύρω από τα ανοίγματα, δηλαδή θύρες, παράθυρα και φεγγίτες, λόγω των συγκεντρώσεων τάσεων που δημιουργούνται γύρω από αυτά. Ακόμα, οι περιοχές συνδέσεως, μεταξύ των εγκάρσιων και διαμηκών τοίχων των ναών, αν δεν είναι ισχυρές, δηλαδή αν δεν έχει γίνει χρήση λαξευτών λίθων και λιθοσυρραφή, κύρια αιτία αστοχίας αυτού του τμήματος των ναών προκύπτει να είναι τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από τις δυναμικές φορτίσεις λόγω των σεισμικών δράσεων ή των διαφορικών καθιζήσεων. Επιπλέον, άλλος τύπος βλάβης που παρατηρήθηκε ήταν η ρηγμάτωση του θόλου, με την ρηγμάτωση να γίνεται εμφανής περίπου στο μέσον του. Η παρουσία της συγκεκριμένης δομικής βλάβης είναι ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο το οποίο το οποίο χρήζει περαιτέρω μελέτης. Μία άλλη περιοχή των ναών που παρουσιάζει βλάβες είναι εκείνη της κόγχης. Αυτού του είδους η βλάβη προκύπτει λόγω της διαφορετικής και συγκεντρωμένης δυσκαμψίας, σε μία περιοχή του ναού. Η συγκεκριμένη βλάβη παρουσιάζεται με ρηγματώσεις τόσο στο τεταρτοσφαίριο όσο και στο τμήμα της κόγχης που είναι σε επαφή με την τοιχοποιία του ναού. Τέλος, τα καμπαναριά αποτελούν ένα αρκετά ευάλωτο στοιχείο των ναών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων έχουν ανακατασκευαστεί. Το συγκεκριμένο στοιχείο όντας λεπτότοιχο και υψίκορμο παρουσιάζεται να είναι αρκετά ευάλωτο σε ανατροπή.

Από τους ναούς που μελετήθηκαν προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για το ρόλο των δομικών τους στοιχείων και της αποτελεσματικότητας των ενισχύσεων που εφαρμόσθηκαν μεταγενέστερα σε αυτούς. Αναλυτικότερα, μελετήθηκε η επίδραση της ύπαρξης ή μη των αντηρίδων αλλά και των ελκυστήρων, στα συγκρίσιμα παραδείγματα των ναών, του προφήτη Ηλία στις Μουρνιές και του Αγίου Γεωργίου στα Νεροκούρου. Η ύπαρξη των αντηρίδων με σκοπό την ενίσχυση των διαμηκών τοίχων του ναού του Αγίου Γεωργίου στα Νεροκούρου βελτιώνει ευμενώς την συμπεριφορά τους έναντι μεγεθών κάμψης εκτός επιπέδου. Αντιθέτως, στο ναό του Προφήτη Ηλία στις Μουρνιές παρουσιάζονται σημαντικές εκτός επιπέδου μετακινήσεις των διαμηκών τοίχων με την παρουσία ρηγματώσεων άνω των ανωφλιών των παραθύρων, υποδηλώνοντας έτσι ότι έχει γίνει έναρξη του φαινομένου της ανατροπής της τοιχοποιίας. Στον ίδιο ναό έχει γίνει προσθήκη διάταξης ελκυστήρων στο εσωτερικό του, με τις πλάκες αγκύρωσης να ακυρώνονται στις γωνίες του ναού. Στην πραγματικότητα προέκυψε ότι πρόσφεραν ενίσχυση των γωνιών του ναού αλλά δεν βελτίωναν την συμπεριφορά του ναού σε κάποιο άλλο δομικό του μέρος του.

Στην περίπτωση της Παναγίας της Κεράς στην Αγία Ρουμέλη, παρατηρήθηκε το φαινόμενο της διαφορικής καθίζησης στην περιοχή της κόγχης. Το φαινόμενο αυτό έλαβε χώρα σε σημείο το οποίο παρουσιάζει ανισοσταθμία η θεμελίωση. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ότι λόγω του μεγάλου βάρους της κόγχης του ναού (μεγάλο πάχος και ύψος τοιχοποιίας) οι συνθήκες έγιναν ευνοϊκές για την εμφάνιση του φαινομένου αυτού. Σε συνδυασμό, των δράσεων πολλαπλών κύκλων φόρτισης λόγω των φορτίων του σεισμού, έγινε εντονότερη η παραπάνω βλάβη. Απ' την άλλη η αρκετά μεγάλη κόγχη του ναού αποδείχθηκε να μην επηρεάζει αρνητικά την στατική λειτουργία του υπόλοιπου ναού.

Σε συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να συνταχθεί συμπληρωματική μελέτη μεγαλύτερου αριθμού ναών με παραπλήσιες αναλογίες διαστάσεων. Κύριο χαρακτηριστικό των υπό μελέτη ναών θα πρέπει να είναι η παρουσία εκτεταμένων δομικών βλαβών. Για την διευκόλυνση και την εύρεση χαρακτηριστικών περιπτώσεων συνίσταται η διεύρυνση των γεωγραφικών ορίων στο σύνολο του νησιού της Κρήτης. Σαν αποτέλεσμα της μελέτης θα προκύψει συσχέτιση μεταξύ δομικών βλαβών και αναλογία διαστάσεων των ναών. Επιπλέον αυτής της έρευνας θα μπορούσε να γίνει εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα σε αποκατεστημένους ναούς με σκοπό την παρατήρηση των δομικών βλαβών που έχουν εμφανιστεί ανά τα έτη.

11. Βιβλιογραφία

- Filipe Manuel Rodrigues Leite de Magalhaes, "Operational Modal Analysis for testing and Monitoring of bridges and special structures", Universidade do Porto Faculdade de Engenharia. Διαθέσιμο στην διεύθυνση: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59924/1/000143271.pdf> Πρόσβαση στις 15/7/2023
- Geotech,(2023), «Uniaxial compressive strength (UCS) test» Zagreb, Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://www.geotech.hr/en/uniaxial-compressive-strength-ucs-test/> Πρόσβαση στις 05/06/2023
- Gerola G., (1905-1932) «Monumenti Veneti nell' isola di Creta. Ricerche e descrizione fatte dal dottor Giuseppe Gerola per incarico del R. Istituto», Βενετία, κεφ. 2, σελ.181-82, εικ. 118, 119.
- Kerakoll, (2021) « Σχεδιασμός επεμβάσεων ομογενοποίησης, δομικής ενίσχυσης και αντισεισμικής προστασίας με νέες, πράσινες τεχνολογίες. Οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιίες, φέρουσα τοιχοποιία και λιθοδομή», Τεχνικό εγχειρίδιο, Ελλάδα
- Stavroulaki, M., Liofagos, I., Darmarakis, P., Structural behaviour and strength evaluation of a venetian church through finite element analysis, 3rd International Conference TMM-CH Transdisciplinary Multispectral Modelling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage, 20-23 March 2023.
- Tomazevic M., Καραντώνη Φυλλίτσα, (2004), «Αντισεισμικός σχεδιασμός Κτηρίων από Τοιχοποιία», Κλειδάριθμος, Αθήνα
- Zahid F., Chao O., (2020), « A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification», Brazil, Διαθέσιμο στην διεύθυνση: https://www.researchgate.net/publication/342749983_A_review_of_operational_modal_analysis_techniques_for_in-service_modal_identification Πρόσβαση στις 9/7/2023
- Uzun E. T., Gucu I., Arslan T., Kalkan S. O.,(2018), « Retrofitting of Mansonry Structures Considering the Architectural Perspective: A Case Study in Foca, Izmir». Turkey Διαθέσιμο στην διεύθυνση: https://www.researchgate.net/publication/331304149_Retrofitting_of_Masonry_Structures_Considering_the_Architectural_Perspective_A_Case_Study_in_Foca_Izmir Πρόσβαση στις 5/9/2023
- Sertcelik I., Kurtulus C., Sertcelik F., Peksen E., Asci M., (2018), « Investigation into relations between physical and electrical properties of rocks and concretes», Διαθέσιμο στην διεύθυνση: <https://academic.oup.com/jge/article/15/1/142/5112898> Πρόσβαση στις 5/6/2023

-
- Ανδριανάκης Μ., (1998), Αρχαιολογική έκθεση, 13^η εφορία βυζαντινών αρχαιοτήτων Κρήτης, Χανιά
 - Ανδριανάκης Μ., Γιαπιτζογλου, Κ., (2012), « Χριστιανικά μνημεία Κρήτης», Οικουμενικό πατριαρχείο ιερά επαρχιακή σύνοδος της εκκλησίας της Κρήτης, Ηράκλειο
 - Ανδριανάκης Μ.,(2008), « Το φαράγγι της Σαμαριάς-καταφύγιο ζωής ορμητήριο ελευθερίας», Φορέας Διαχείρισης Εθνικού Δρυμού Σαμαριάς Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χανίων, Χανιά
 - Αρχείο εφορείας βυζαντινών αρχαιοτήτων Χανίων
 - Αυγερου Ν., Βαλιανάτος Κ., Βιδάλης Ο.,Δαρμαράκης Παναγιώτης, Λιοφαγος Γιαννος, Ράπτη Κ., Στεφάνου Τ.,(2021), Ακαδημαϊκό μάθημα με τίτλο: « Θεματικό εργαστήριο», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Χανιά
 - Γκρατζίου Ο.,(2009),» Η ΚΡΗΤΗ ΣΤΗΝ ΥΣΤΕΡΗ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗ ΕΠΟΧΗ, Η μαρτυρία της εκκλησιαστικής αρχιτεκτονικής», Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο
 - Δαλιδακης Γ.Κ.,(2008), « Αναζητώντας τις εκατό εκκλησίες της Χώρας Σφακίων» Διαθέσιμο στην διεύθυνση: <http://www.dalidakis.com/articles/book-download/> Πρόσβαση στις 5/6/2023
 - Δρούζος Θ.,(2014), « Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές», εκδόσεις Liberal Books,Αθήνα
 - Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης,(2006), «ΕΛΟΤ EN1926:2006- Δοκιμές σε φυσικούς λίθους- Προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής δοκιμίων», Αθήνα
 - Ερμόπουλος Ι. Χ., (2005), « Ευρωκώδικας 1: Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών, ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής», Εκδόσεις Κλειδάριθμος
 - Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 21 Απριλίου 1982, ΦΕΚ, αριθ. Β1/Φ38/15663/348
 - Ινστιτούτο τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ),(2018), « Σεισμός Ζακύνθου 2018-10-26 Mw6.8», Θεσσαλονίκη, Διαθέσιμο στην σελίδα: <http://www.itsak.gr/main>
 - Καραντώνη Φ.,(2012), «Κατασκευές από τοιχοποιία σχεδιασμός & επισκευές», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
-

-
- Κνιθάκης Β., (2011), « Η Ρετόντα της Κρήτης ένα γιατί τέσσάρων αιώνων», Αρχαιολογία & τέχνες,, Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://www.archaiologia.gr/wp-content/uploads/2011/07/111-12.pdf> Πρόσβαση στις 21/3/2023
 - Μακριδάκης Α.,(1965), « Τοιχογραφημένες και μη βυζαντινές εκκλησίες του νομού Χανίων, Ιερά Μητρόπολη Κισάμου & Σελίνου, Χανιά
 - Μαραβελάκη Ν. (2020), « Ανάλυση κονιαμάτων για την Παναγία Αγίας Ρουμελής», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
 - Μεσαριτάκη Α.,(2020), « Διερεύνηση μηχανισμού αστοχίας οξυκόρυφου μονόχωρου ναού και της επίδρασης μεταγενέστερων επεμβάσεων», Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
 - Μπούρας Χ.,(2001) «Βυζαντινή & Μεταβυζαντινή αρχιτεκτονική στην Ελλάδα», Εκδοτικός οίκος Μέλισσα, Αθήνα
 - Ξανθουδίδης Σ.,(1903), «Χριστιανικές επιγραφές Κρήτης» ,Τυπογραφείο Σακελαρείου, Αθήνα
 - Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας ,ΟΑΣΠ (2022), «Κανονισμός για αποτίμηση και δομητικές επεμβάσεις τοιχοποιίας- ΚΑΔΕΤ», Αθήνα
 - Παπαλέξη Χ.,(2017), «Ο οικισμός της Αγίας Ρουμελής, μία ιστορική και αναλυτική προσέγγιση», Ερευνητική εργασία, Χανιά
 - Πατεδάκης Μ., Γιαπιτσόγλου Κ., (2016), « Μαργαρίται μελέτες στην μνήμη του Μανώλη Μπορμπουδάκη», Κοινωφελές ίδρυμα « Παναγία η Ακρωτηριανή» Ιεράς Μητροπόλεως Ιεραπότνης και Σητείας, Σητεία
 - Σκουτέλης Ν. , Κλήμης Α.,,(2020), «Έρευνα και ανάπτυξη δικτύων επίσκεψης και ανάδειξης του πολιτισμικού τοπίου στον δήμο Σφακίων », Εργαστήριο Τεκμηρίωσης και Αποκατάστασης Ιστορικών Κτηρίων και Συνόλων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
 - Σπυράκος Κ., (2019), «ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ & ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ», ΕΡΓΟΝΟΜΟΣ ΙΚΕ, Αθήνα
 - Σπυράκος Κ.,(2015). «Σεισμική Συμπεριφορά Ιερών Ναών», Σχολή πολιτικών μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://techbooks.gr/seismiki-symperifora-ieron-naon/> Πρόσβαση στις 19/2/2023
 - ΥΑ ΥΠΠΟ/ΑΡΧ/Α1/Φ25/26735/1146/5-7-1994ΦΕΚ 555/Β/18-71994

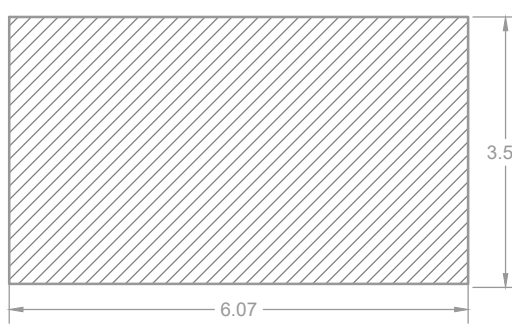
- Φραγκιουδάκης Θ.,(2021), « Ενετική εκκλησιαστική Απογραφή του 1637 στον νομό Χανίων», Ροδαμανθός
- Χέλιντον Σ., (2018), « Μοντελοποίηση και Δυναμική ανάλυση γονάτου ανάρτηση ρυμουλκούμενης πλατφόρμας βαρέως τύπου», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτική Μακεδονίας
- Τριανταφύλλου Α., (2013), « Δομικά υλικά»,10^η έκδοση, Πάτρα, Gotsis

Παράρτημα Α

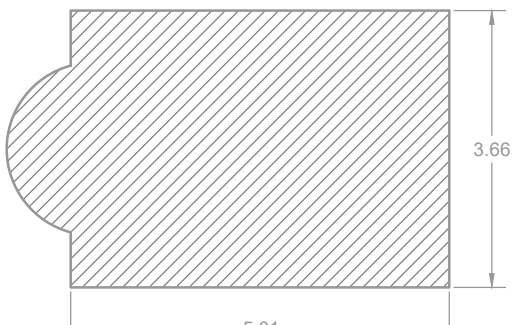
A/A	ΟΝΟΜΑ ΝΑΟΥ	ΜΗΚΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ
1	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΙΘΑΡΙ	6.07	3.53	1.72
2	ΠΑΝΑΓΙΑ ΔΥΟ ΒΡΑΧΩΝ ΦΡΕΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	5.01	3.66	1.37
3	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	6.16	3.93	1.57
4	ΝΑΟΣ ΚΟΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΟΤΟΚΟΥ ΚΑΤΩΜΕΡΙ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	6.91	4.13	1.67
5	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΑΡΩΔΙΑ ΠΕΡΙΒΟΛΙΑ ΧΑΝΙΩΝ	8	4	2.00
6	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΟΡΜΟΡΗ ΝΕΡΟΚΟΥΡΟΥ ΧΑΝΙΩΝ	9.82	6.24	1.57
7	ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΗΛΙΑΣ ΜΟΥΡΝΙΕΣ ΧΑΝΙΩΝ	7	4	1.75
8	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΕΟ ΧΩΡΙΟ ΒΟΥΚΟΛΙΕΣ	5.67	3.75	1.51
9	ΑΓΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΝΕΜΠΡΟΣ ΒΟΥΚΟΛΙΕΣ	7	3.3	2.12
10	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΔΡΑΚΙΑΝΑ	5.39	3.58	1.51
11	ΑΓΙΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΚΟΥΦΟΣ	5.82	3.75	1.55
12	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΥΠΑΡΙΣΣΟΣ	13.34	6.22	2.14
13	ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΞΗΡΟΚΑΜΠΙ	7.3	4.4	1.66
14	ΝΑΟΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΩΤΗΡΟΣ ΚΑΛΥΒΕΣ	7.95	4.93	1.61
15	ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΡΜΕΝΟΙ	13.94	5.24	2.66
16	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΡΥΣΣΕΣ	10.15	5.78	1.76
17	ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΑΜΠΑΘΑ	6.37	4.16	1.53
18	ΚΟΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΟΤΟΚΟΥ ΑΛΙΚΑΜΠΟΣ	6.07	3.8	1.60
19	ΝΑΟΣ ΑΓΙΑΣ ΜΑΡΙΝΑΣ ΡΑΒΔΟΥΧΑ	6.86	2.89	2.37
20	ΠΑΝΑΓΙΑ ΤΗΣ ΣΠΗΛΙΑΣ (ΣΠΗΛΙΑ ΚΙΣΣΑΜΟΥ)	6.07	3.82	1.59
21	ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ Ο ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΔΕΛΙΑΝΑ	13.97	5.4	2.59
22	ΠΑΝΑΓΙΑ ΦΕΣΑ	7.93	4.68	1.69
23	ΑΓΙΑ ΦΩΤΕΙΝΗ ΝΕΡΟΚΟΥΡΟΥ	8.08	4.82	1.68
24	ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΡΕΑΣ ΜΑΛΛΕΑ	5.5	3.95	1.39
25	ΑΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ ΚΑΤΣΙΦΑΡΙΑΝΑ	4.52	3.77	1.20

Πίνακας Α-1 Πίνακας με τις αναλογίες των διαστάσεων των ναών που πραγματοποιήθηκε αυτοψία (ιδία επεξεργασία)

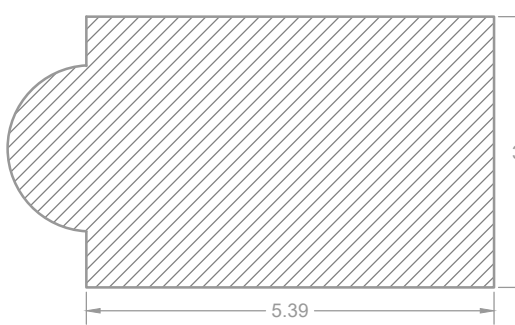
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



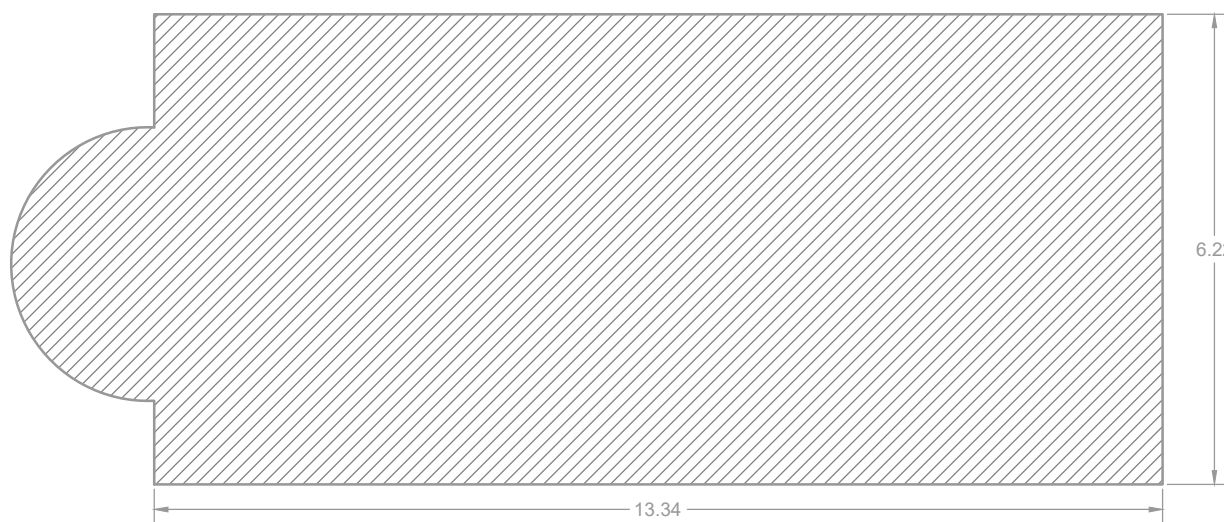
ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΙΘΑΡΙ



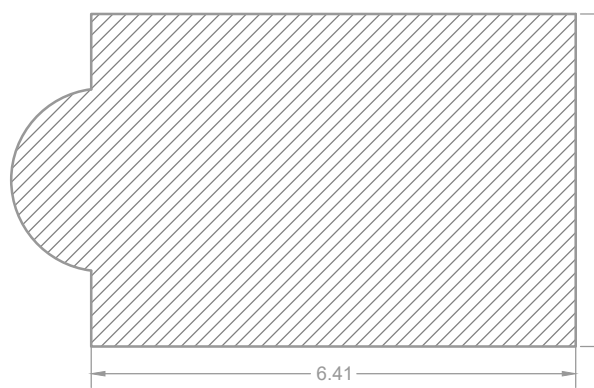
ΠΑΝΑΓΙΑ ΔΥΟ ΒΡΑΧΩΝ ΦΡΕ



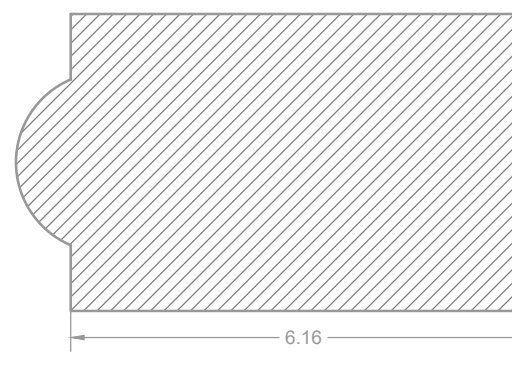
ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΔΡΑΚΙΑΝΑ



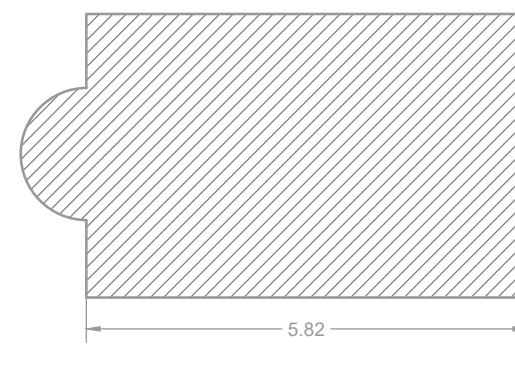
ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΥΠΑΡΙΣΣΟΣ



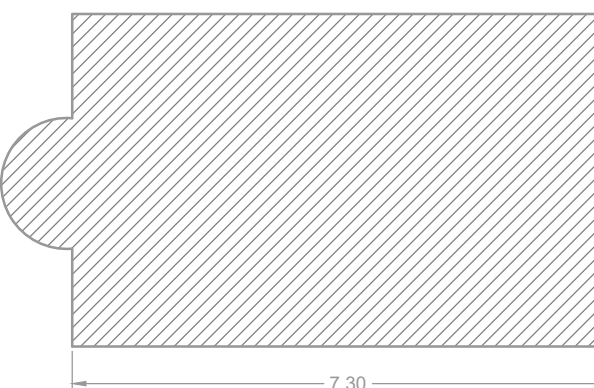
ΕΚΚΛΗΣΙΑ ΣΤΟ ΦΡΕ



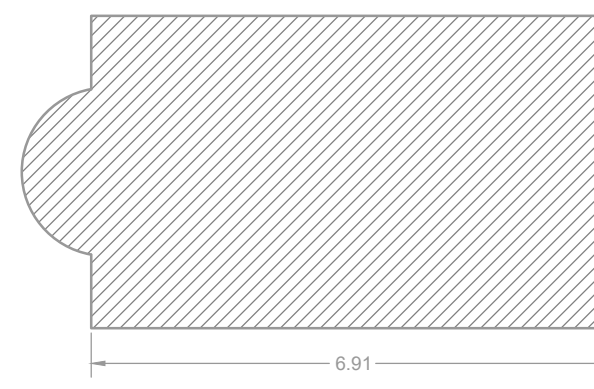
ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΟΝΟΥ



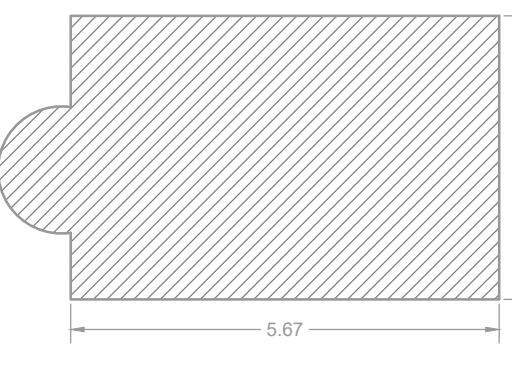
ΑΓΙΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΚΟΥΦΟΣ



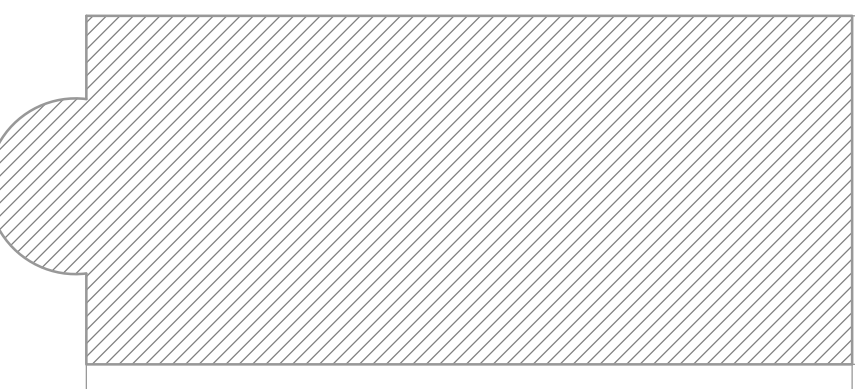
ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΞΗΡΟΚΑΜΠΙ



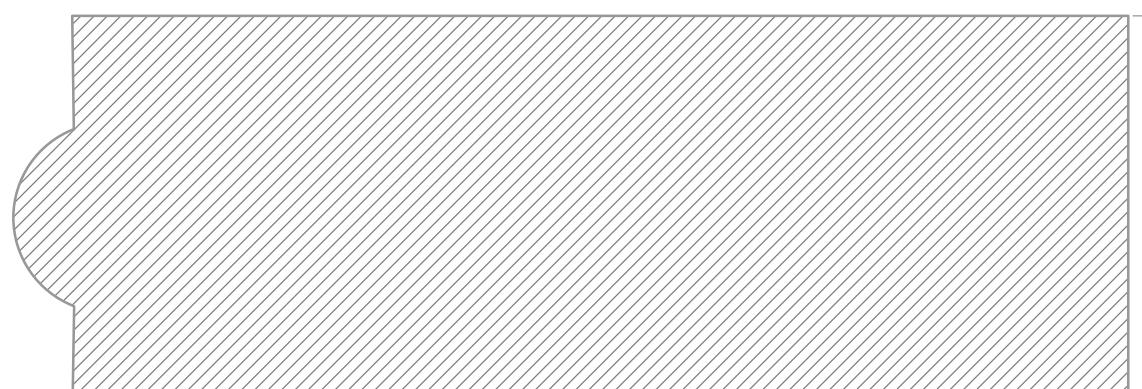
ΝΑΟΣ ΚΟΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΟΤΟΚΟΥ



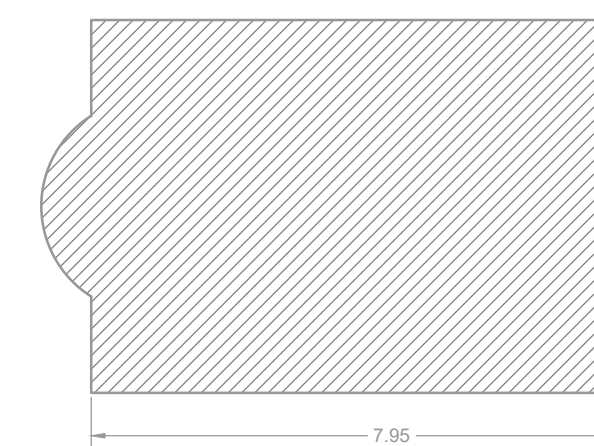
ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΕΟ ΧΩΡΙΟ (ΒΟΥΚΟΛΙΕΣ)



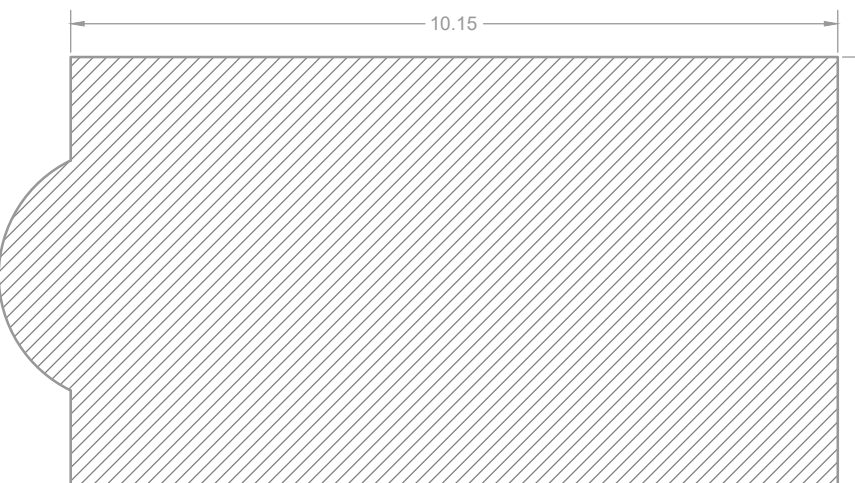
ΜΟΑΙ



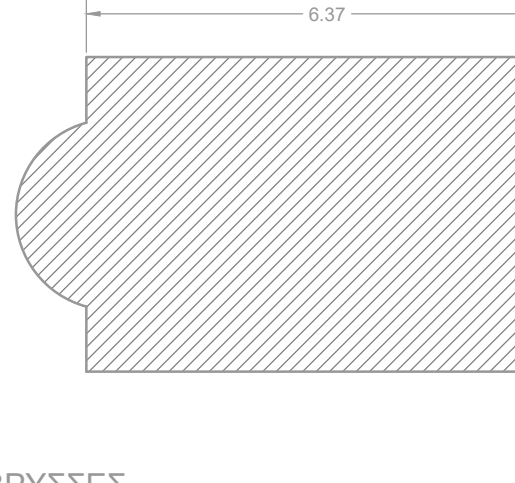
Αγιος Ιωάννης ο Πρόδρομος Δελιάνα



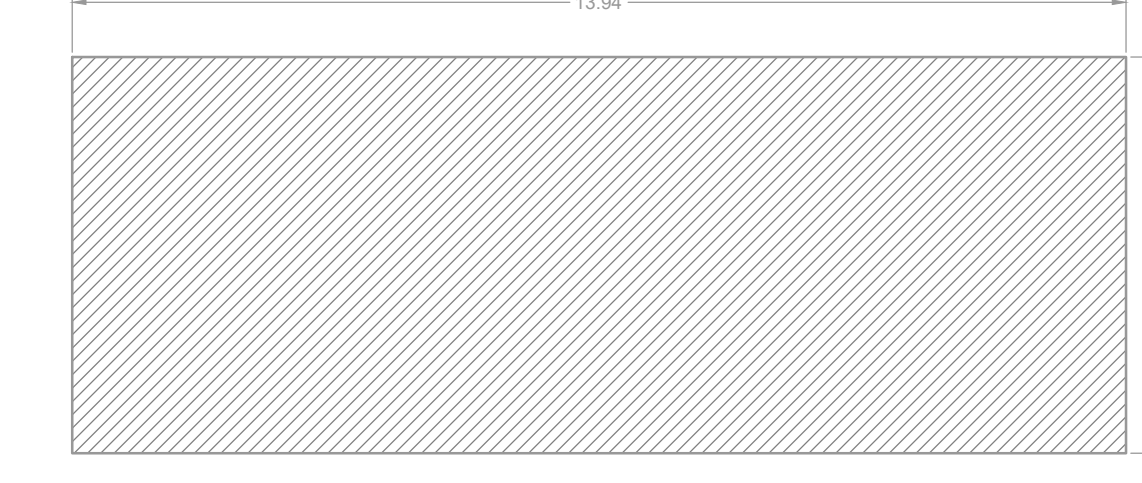
ΝΑΟΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΩΤΗΡΟΣ ΚΑΛΥΒΕΑΣ



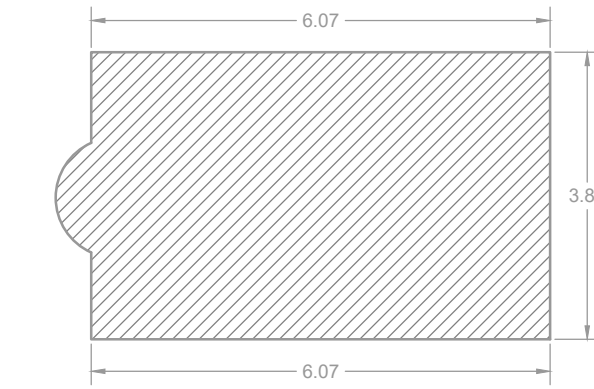
ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΡΥΣΣΕΣ



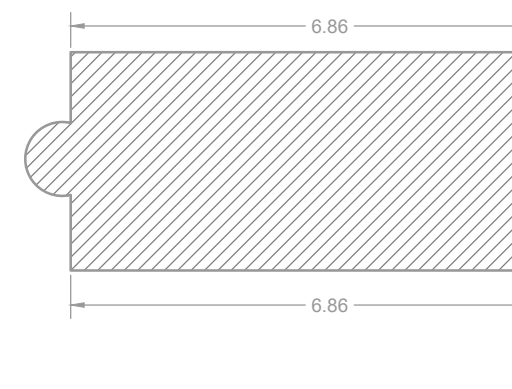
ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΑΜΠΑΛΑ



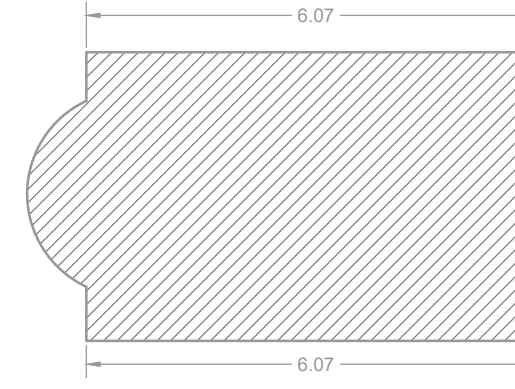
ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΡΜΕΝΟΙ



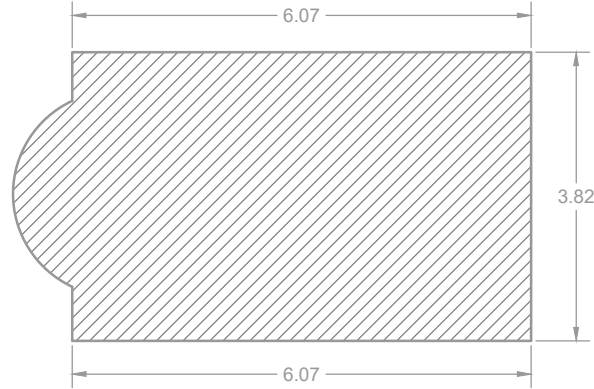
ΚΟΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΟΤΟΚΟΥ ΑΛΙΚΑΜΠΙΟΣ



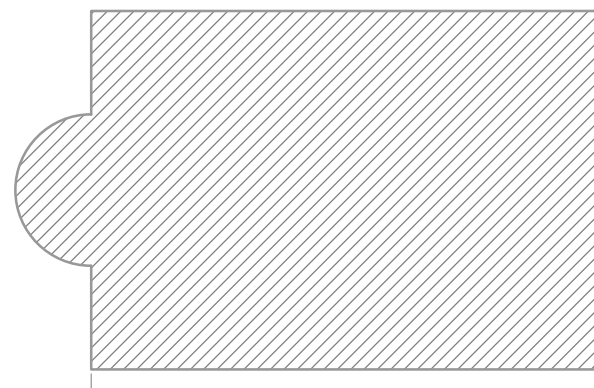
ΝΑΟΣ ΑΓΙΑΣ ΜΑΡΙΝΑΣ ΡΟΔΟΠΟΥ



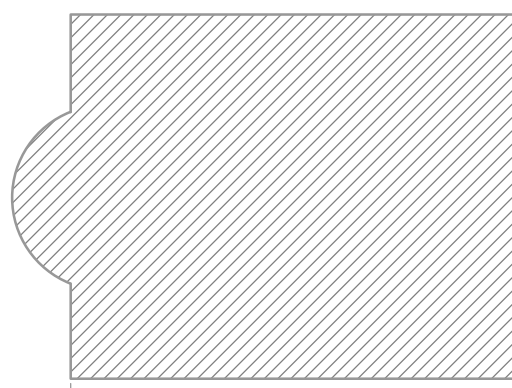
ΝΑΟΣ ΠΑΝΑΓΙΑ ΣΦΗΛΙΑ ΚΙΣΣΑΜΟΥ



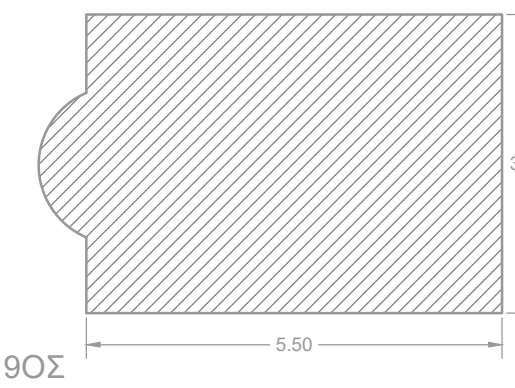
ΝΑΟΣ ΠΑΝΑΓΙΑ ΣΦΗΛΙΑ ΚΙΣΣΑΜΟΥ



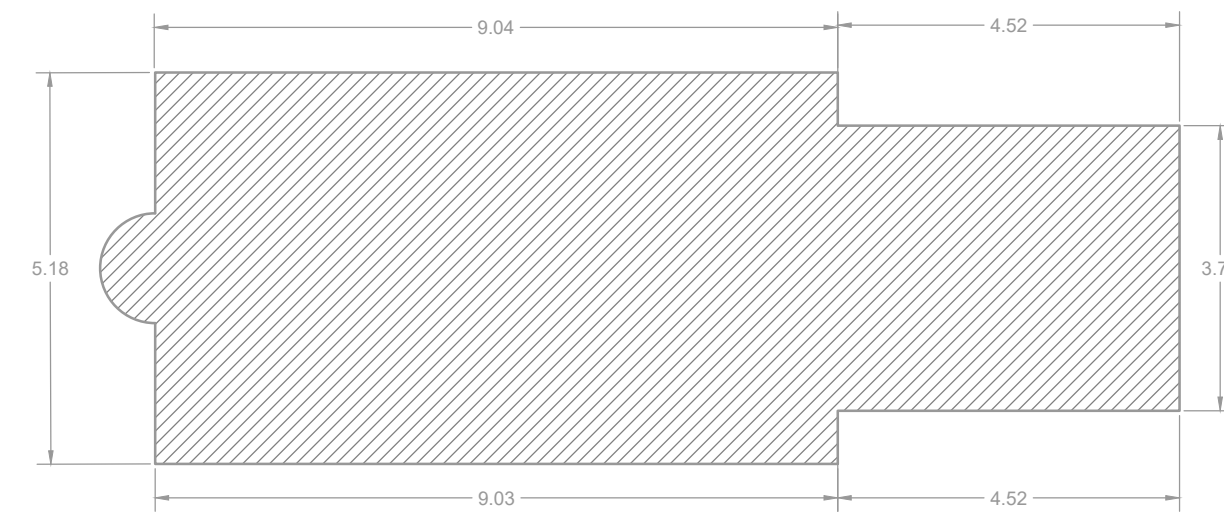
ΠΑΝΑΓΙΑ ΦΕΣΑ 190Σ



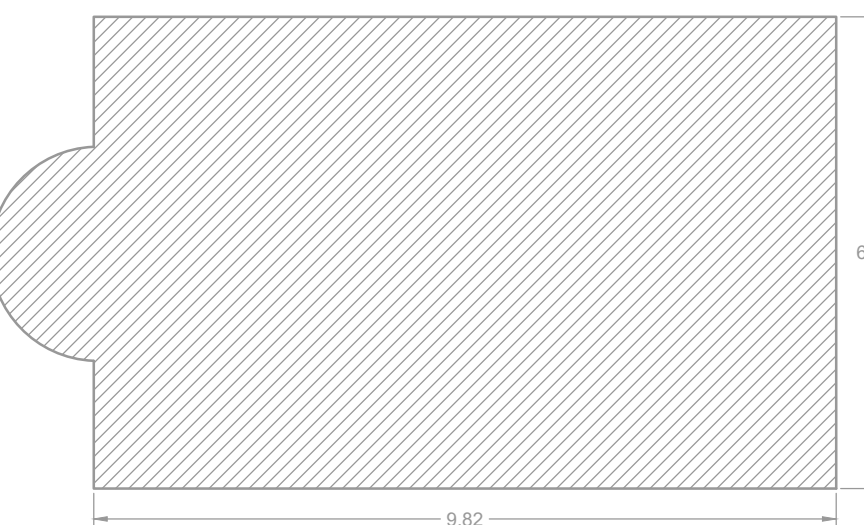
ΑΓΙΑ ΦΩΤΕΙΝΗ ΝΕΡΟΚΟΥΡΟΥ 190Σ



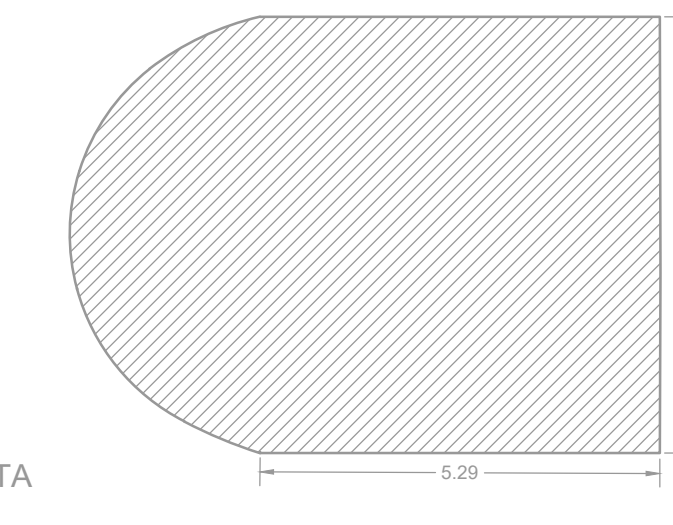
ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΕΡΕΑΣ ΜΑΛΑΣΑ (?)



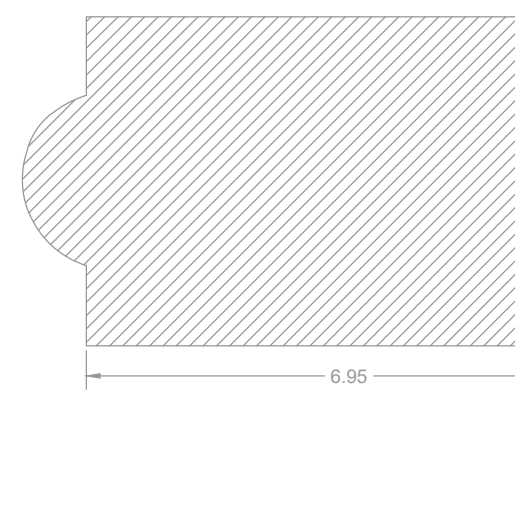
ΑΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ ΚΑΤΣΙΦΑΡΙΑΝΑ 130Σ



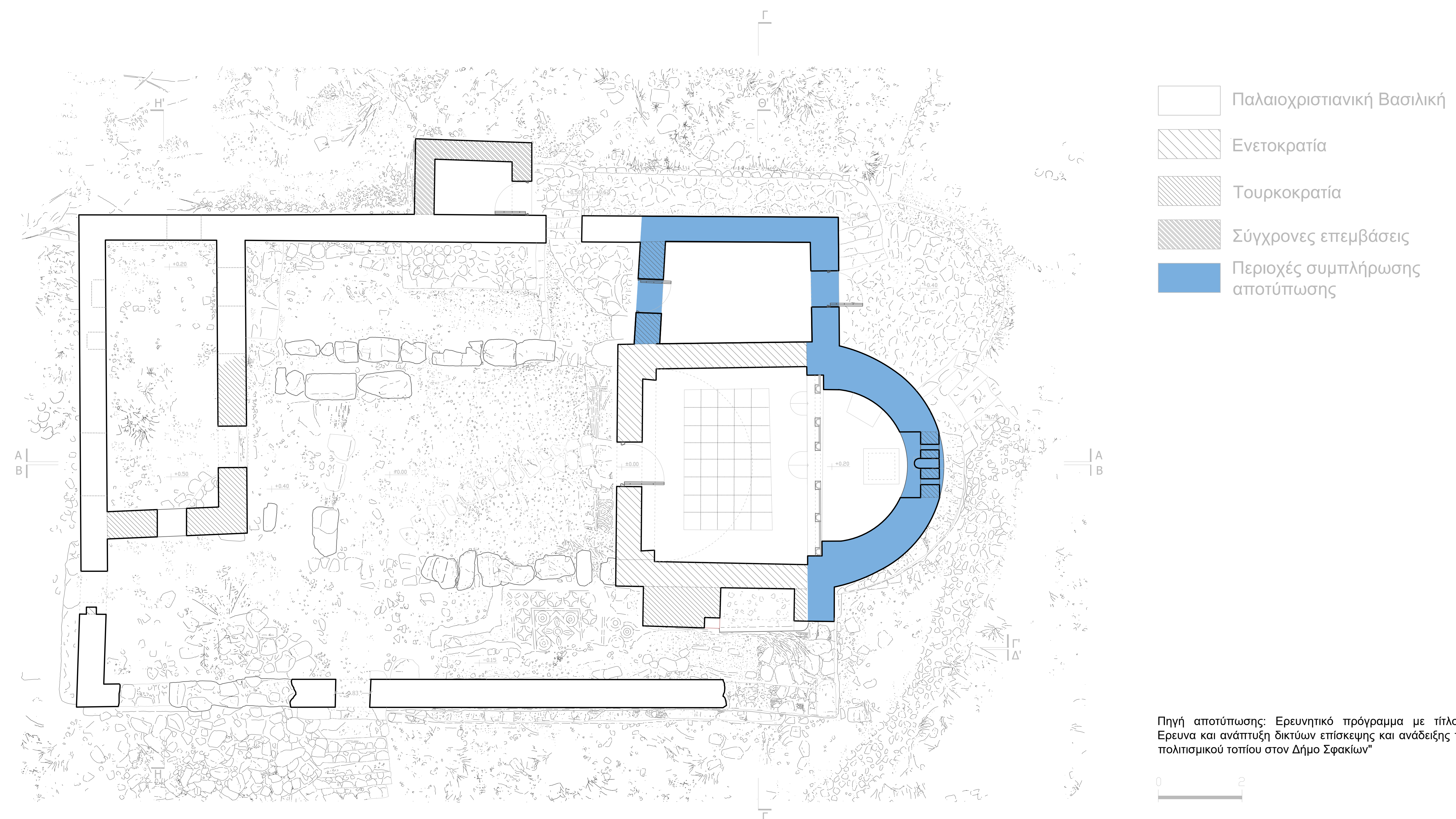
ΑΓΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑ ΝΕΡΟΚΟΥΡΟΥ



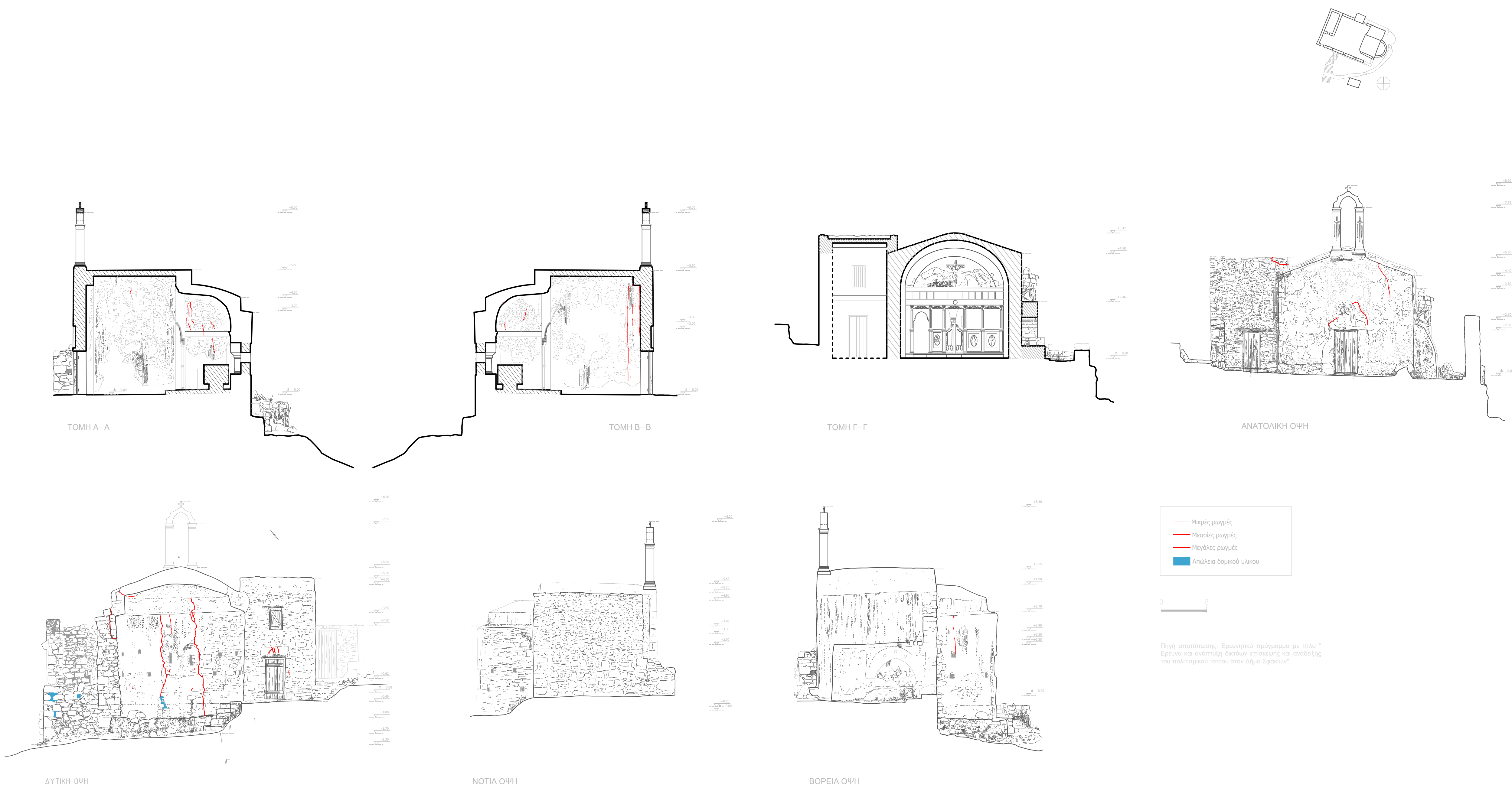
ΠΑΝΑΓΙΑ ΚΕΡΑ ΣΤΗΝ ΑΓΙΑ ΡΟΥΜΕΛΗ



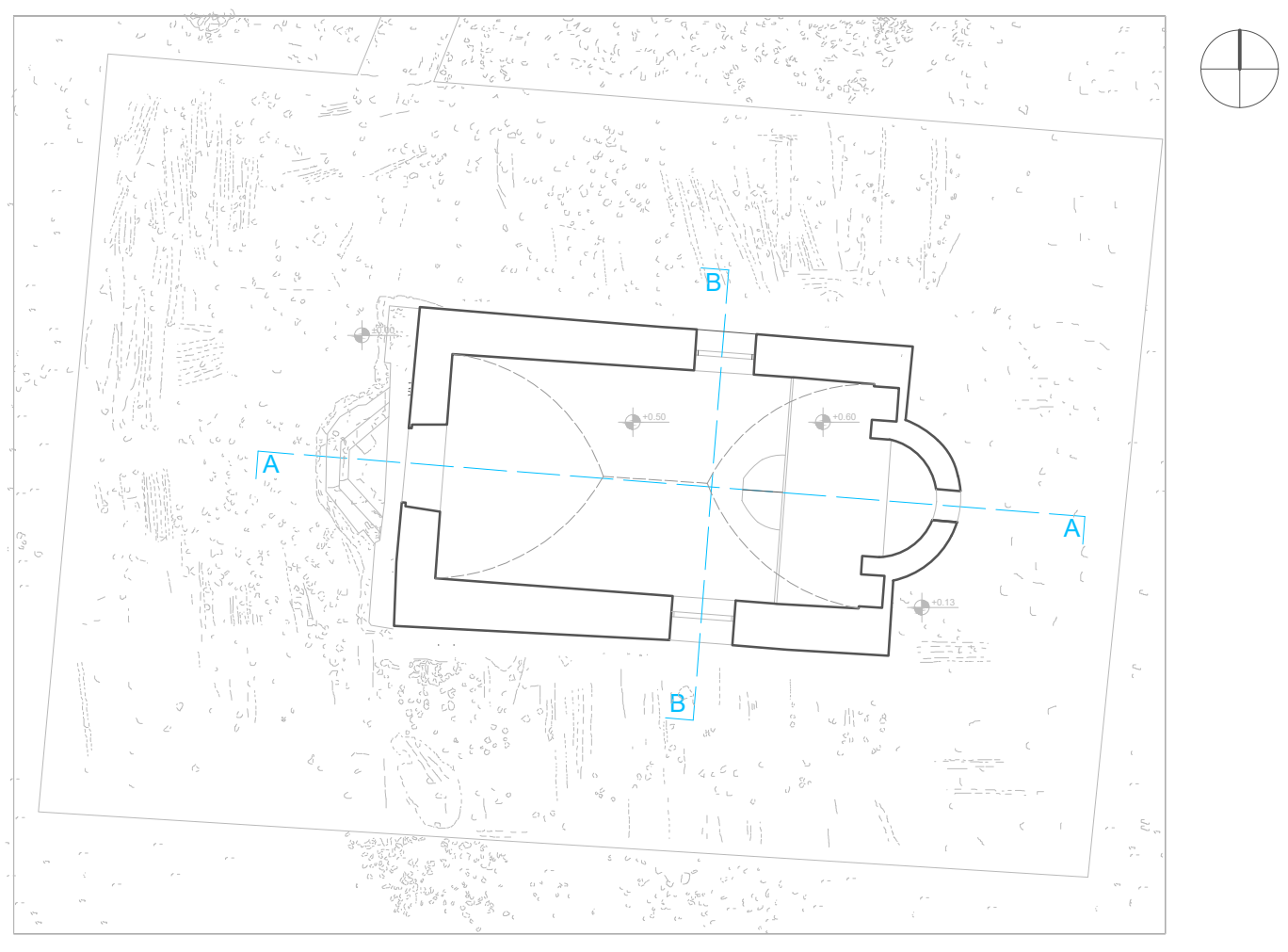
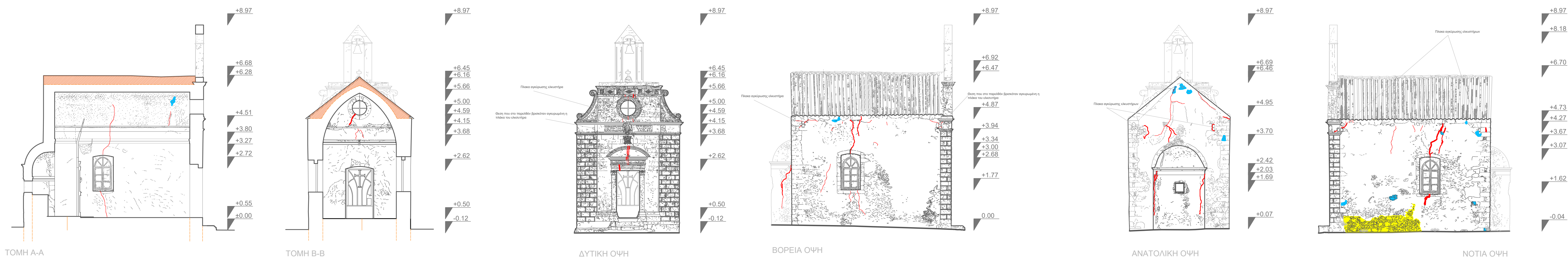
ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΗΛΙΑΣ ΜΟΥΡΝΙΕΣ



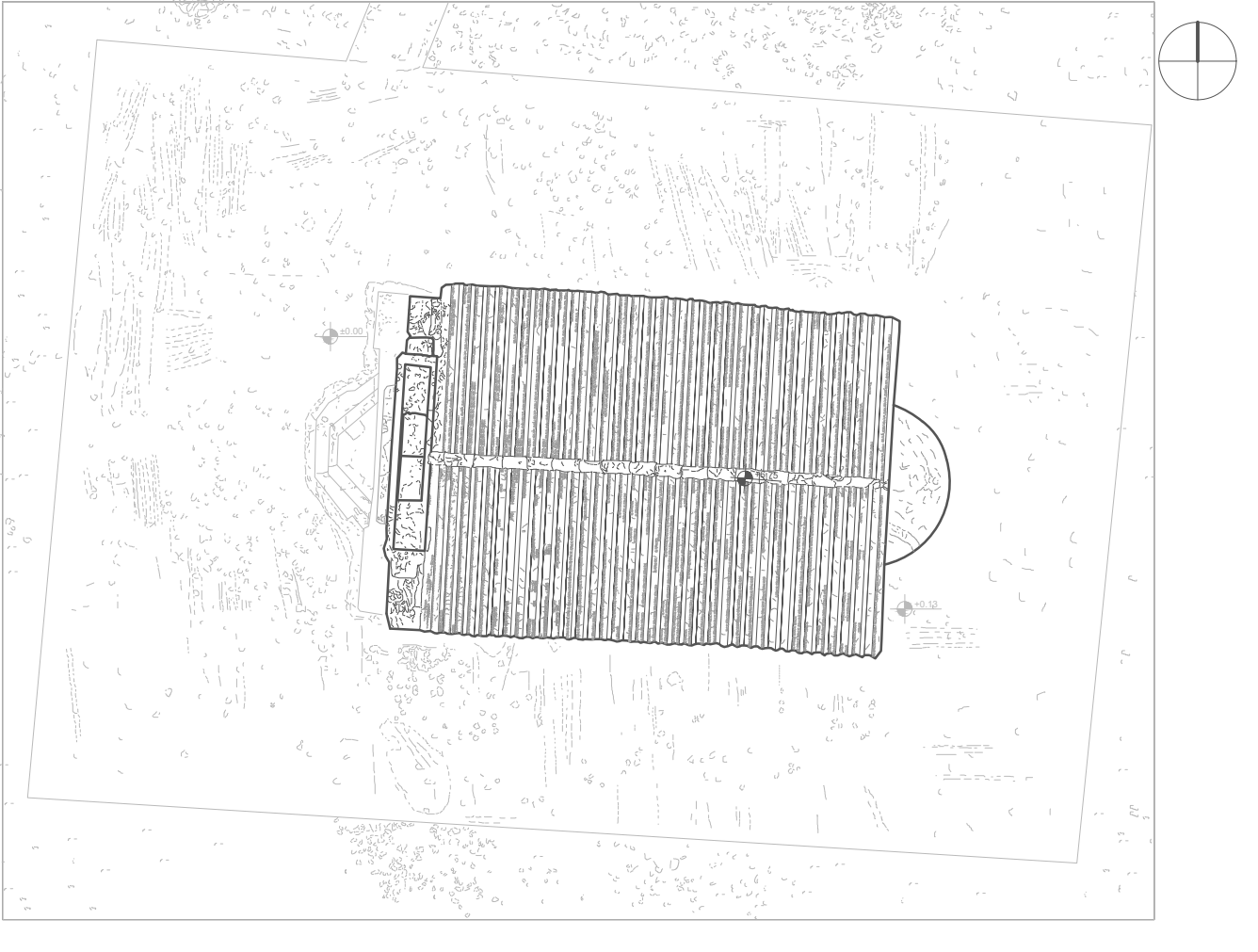
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β- ΣΧΕΔΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ



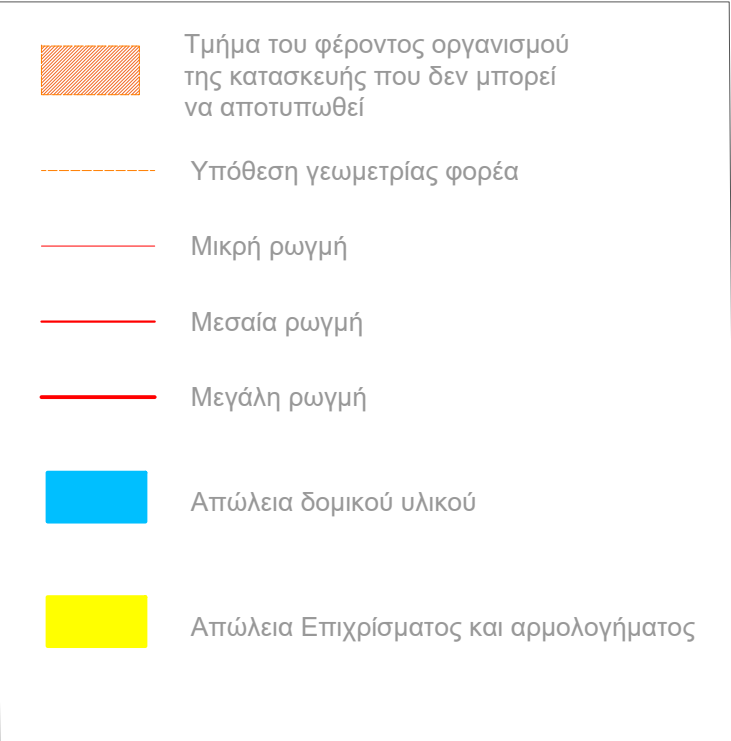
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ- ΣΧΕΔΙΟ ΔΟΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ



Κάτοψη

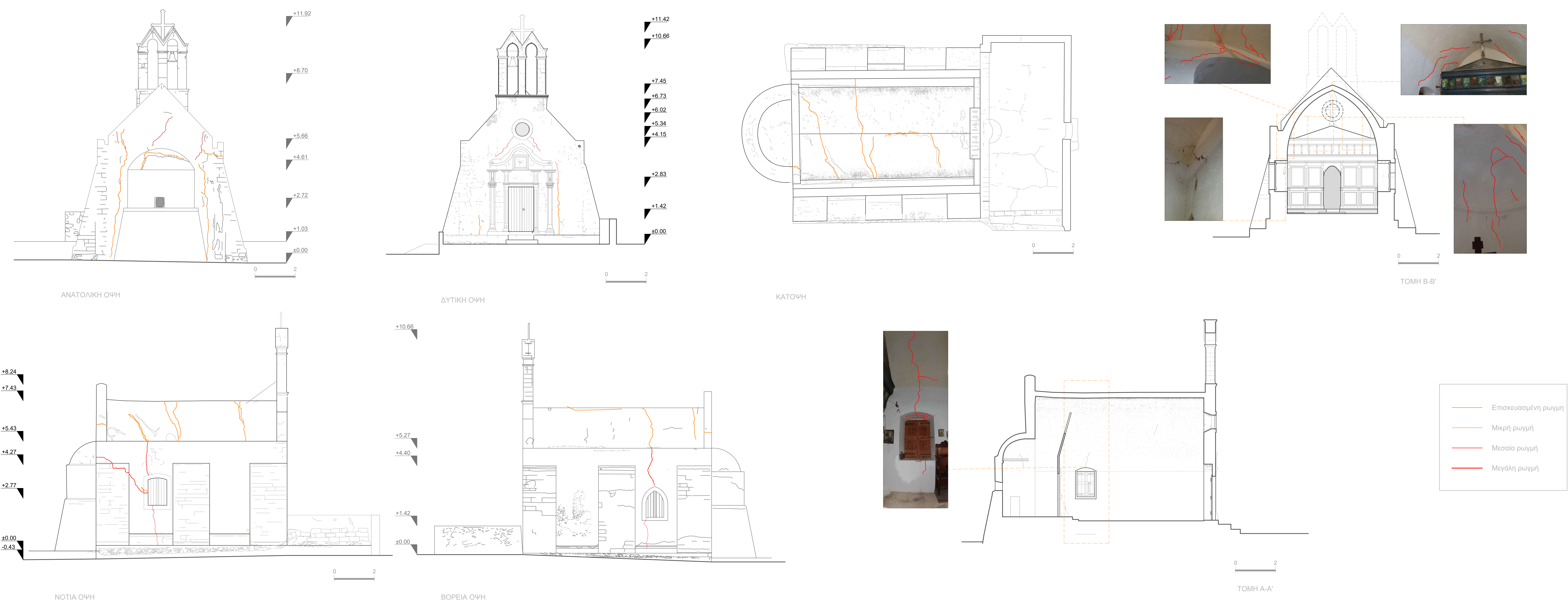


Κάτοψη στέγης



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β- ΣΧΕΔΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

ΣΧΕΔΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ 1:100



Παράρτημα Ε

Το περιεχόμενο του παραρτήματος Ε αποτελεί έρευνα που δημοσιεύθηκε στο συνέδριο με τίτλο « 3rd International Conference TMM-CH Transdisciplinary Multispectral Modelling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage», που διεξήχθη τις ημερομηνίες 20-23 Μαρτίου 2023, στην Αθήνα. Η ερευνητική ομάδα αποτελούνταν από την Σταυρουλάκη Μαρία, τον Λιόφαγο Γιάννο και τον Δαρμαράκη Παναγιώτη.

Structural behaviour and strength evaluation of a venetian church through finite element analysis

Maria E. Stavroulaki^[0000-0003-0882-5763], Ioannis (Yannos) Liofagos^[0000-0001-8770-0293], Panagiotis Darmarakis^[0000-0001-5343-6244]

¹ Technical University of Crete, School of Architectural Engineering, Chania, Greece.
mstavroulaki@tuc.gr

Abstract. Evaluation of structural behaviour of a masonry Venetian Church with vault, is presented here. Using a detailed model and the finite element method the influence of specific structural parts of the structure like masonry struts and wall connections to the structural behaviour are examined. The response spectrum analysis, the static analysis for subsidence of some parts and the transient analysis of a specific seismic excitation are used to evaluation of the church strength. Comparison of model analysis results with the structural pathology is helpful to this research

Keywords: Modal analysis, finite element, spectrum response, architectural survey, venetian temple.

1 Introduction

The Mormori's Saint George ecclesiastical glebe - metochi - is in the Chania's valley at the northern boundary of Nerokouros settlement. The Venetian Church of Saint George is placed at the centre of a quadrangle courtyard of a building complex. The venetian census [1] of the orthodox churches in Crete at 1637, refers this church and the "Hemanuel Mormoris" as its owner.

In this study, research, and analysis of the main mechanisms of structural damage of the church with the finite element method are presented. The current scientific announcement is based on a prior study that has been carried out in the frame of the academic transdisciplinary courses of postgraduate degree studies in the School of Architecture in Technical University of Crete.

The anti-seismic adequacy of the Venetian churches was reduced because the existence of the vaulted structures and indeed with a pointed form, as was common in the Cretan architecture of the time, does not ensure some form of diaphragmatic function for the cooperation of all the vertical elements, while the construction method does not allow taking tensile stresses. Essentially, the horizontal components of the earthquake were assumed by the stiffness of the vertical walls, the front ones in the transverse direction and the end ones in the longitudinal direction. It is evident that the seismic action imposed the thrusts of the domes on the end walls. For this reason, large dimensions are often presented in the thickness of the longitudinal walls or the construction of buttresses. The eastern wall that carried the semi-circle nook was a

particularly sensitive construction from a static point of view since it is an intersection of a double curved surface with a flat support in which the deformations are not everywhere compatible. But the existence of the semi-circle nook was essentially a support for strengthening the rear frontal wall, which is why the sanctuary is still preserved in many damaged churches.

2 Historical and architectural evidences

The temple of Saint George is categorised as a small single room church with a pointed vault roof cover. The external measurement of the plan is 9.40m by 6.30m long. The walls have been constructed with ashlar limestones and uncut stones. The main entrance is placed on the west facade and a semi-circle nook is directed to the east (see Fig. 1).

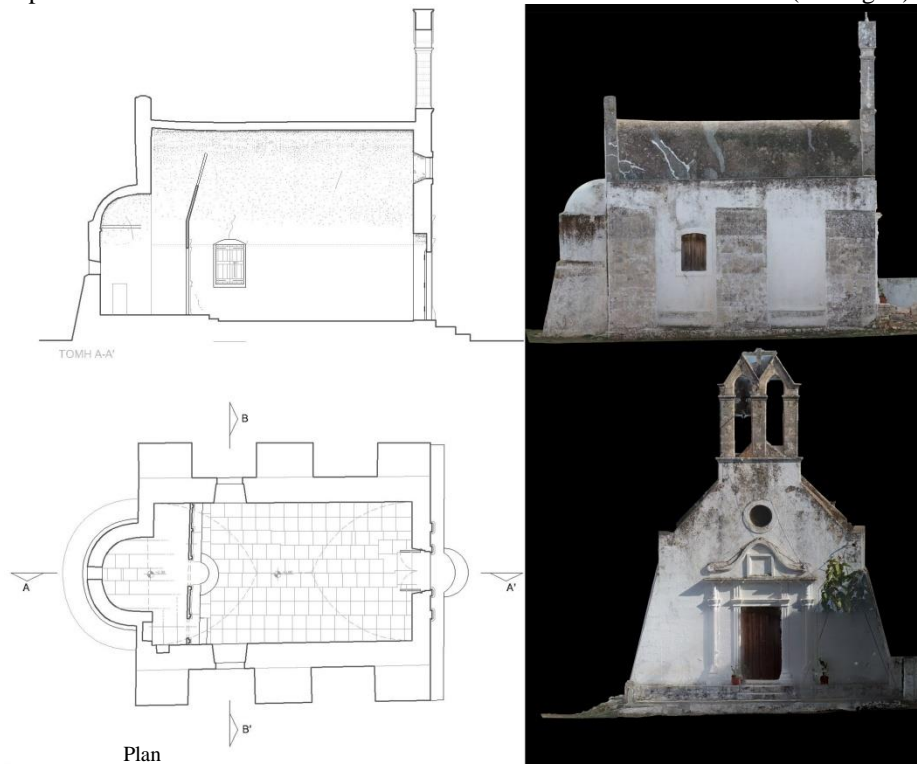


Fig.1.Section A-A, north facade (orthophoto), plan & west facade (orthophoto).

The portal to the temple is decorated, above with simplified baroque revival elements like double inverted relief wave, a lintel with cymatium and a pair of pilasters on either side. On the top of the pediment there is a double arch belfry with metal braces. Higher on the wall, between the pediment and the portal is placed a circular opening called

“occulus”. The relief architectural features of the entrance together with the buttresses, are assumed to be a newer construction probably from the 19th century, where stonemasons used to reproduce earlier morphological elements of the 17th and 18th centuries.

Six equal-sized buttresses receive the horizontal thrusts of the dome, with their foundations visible on the eastern side possibly due to the loss of the outdoor stone paving. The buttresses at the highest points relate to the side walls by "C"- shaped key stone. The western face was probably reconstructed in the middle of the 19th century. Its thickness (0.58m) makes it thinner than the rest of the masonry. We know from the codex of the Gouvernetou monastery that maintenance work and reconstructions took place in the ecclesiastical glebe, in 1848[2], 1906, 1934 and in 1980 according to the citizens testimony, simultaneously with the nearby archaeological excavation. In 1982 the monastery was characterized as a protected monument by law [3]. The nook of the temple is composed of three-parts externally. The lower part being thicker forming a conical buttress, a main body with a small opening and higher the quarter spherical dome. In the lateral masonry and on either side of the altarpiece, there are two openings with stone arched lintels. The southern opening is pointed and the northern arched, thus strengthening the view of the existence of more than one building phase. In the sanctuary is existed the recess of the “prothesis”, which has a relief while on the side there is a built-in washbasin. A relief ring runs through the genesis of the dome of the dome.

Comparing the temple (katholikon) with similar ones in the plain south of Chania, we generally observe the following differences and similarities:

- Firstly, buttresses do not often exist in this type of temple in that region. In only to two other churches, Agios Ioannis Chrysostomos in Katsifariana and Agia Paraskevi in Perivolia, buttresses exist but not in symmetry. It should be noted that both temples were built in the Venetian period (source) and expansion phases and other interventions have taken place. This difference probably occurs because the temple of Agios Georgios Mormoris has apparently undergone extensive operations.
- Secondly, by studying the external proportions of the floor plans of single-room churches in the area, it was found that the proportions in length to width were 3 to 2 (1.47/1), which is also found in the bibliography [4].

3 Survey

3.1 Geometry

The survey of the geometry of the temple was a complementary study (more precisely) and a correction of the already existing one, which had been created during the laboratory exercise of the postgraduate program of the Department of Architecture of the Technical University of Crete during the academic year 2021-2022. This more precisely study was needed because the existing structure had to be identified in terms of its fundamental characteristics (Natural frequencies, modulus of elasticity, masonry

strength), in the computer simulated model. As the geometry of the temple was particularly demanding a combination of methods were used:

1. Usual surveying with tape measure and digital range finder. The rangefinders used were Laser Leica Disto D2 and Bosch GLM 150.
2. A digital theodolite (Total Station) was used through the application of an open traverse in an independent coordinate system. The equipment used was the HTS 420R total station.
3. A photogrammetry method was used using a drone and a camera to produce orthophotos and the 3D model of the temple.
4. Finally, an impression was made using a Laser scanner.

The processing of the primary data of the measurements was done using the programs Agisoft Metashape Pro 1.7.4, AUTOCAD 2022 and RHINOCHEROS 7

3.2 In situ measurements

The operational modal analysis (OMA) is a method of determining the dynamic characteristics of a structure based on the data collected from micro-vibrations that the structure experiences under its operating conditions. The present method is applicable to constructions that are particularly bulky, and practically it is difficult to cause a dynamic load by a device. In the OMA method, the unknown ambient periodic waves are used to count the characteristics of the structure. Subsequently, the raw data is processed by various algorithms to fully reproduce the dynamic characteristics of the structure. In this work, the Peak picking (PP) method was used, and for this reason, its basic principles will be briefly analysed. In this method, the natural frequencies are determined based on the maximums presented in the frequency spectrum diagram. This method has proven to be quite reliable and accurate. In case that the maximum frequencies are presented at a very close distance from each other, the results may still be incorrect. So, on a case-by-case basis, the researcher should evaluate the results which are examined.

The application of OMA to civil structures generally spans from dynamic identification to continuous dynamic monitoring. This method has been used for the dynamic identification of monuments like the research on the seismic response of a prestigious masonry palace and the exhibited damage pattern which retrofitted after the 2009 earthquake in L'Aquila [5]. Also the resolution of the identified modal parameters in relation to the instrumentation strategy (dense or not dense sensor distribution) and the building's history is discussed to another research on the medieval church of Sant'Agata del Mugello, a Cultural Heritage building with a rich and complex constructive history and many repair operations [6].

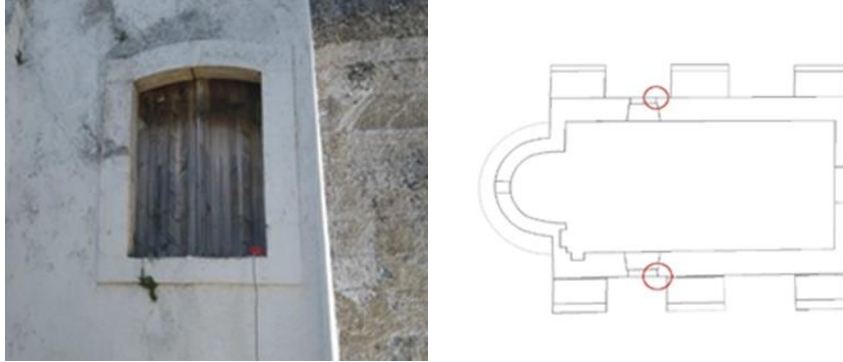


Fig. 2. The position that the sensors were placed.

The equipment used was the SYSCOM company's acceleration measurement system of Applied Mechanic Laboratory at Technical University of Crete. In the present study, two recording units and two sensors were used to carry out the measurements. The location where the acceleration sensors were placed is shown in figure 2, next to the two windows on the south and north sides of the church. The sensors were synchronized to start recording at the same time, and the duration of field recording was 10 minutes.

Primary data were imported into Artemis Testor and Artemis Extractor programs. As a result of the above procedure, the first 14 natural frequencies are presented for the frequency values 7.63Hz, 9.95Hz, 11.57Hz, 11.98Hz, 12.33Hz, 16.15Hz, 16.41, 21.35, 21.89, 22.31, 25.99, 26.41, 28.62, 29.48 Hz (see table 1 below). These values in combination with the structural damage that the temple presents were used to identify the finite element model of analysis.

3.3 Structural material

To evaluate the physical and mechanical characteristics of the temple's masonry, some correlations and assumptions were made in parallel with in experimental measurements. Initially, it was assumed that stone and mortar samples taken from the neighboring buildings of the monastery have a similar chemical composition (resulted from the transdisciplinary academic courses and research that took place in the laboratory of the department of school of Architecture, Technical University of Crete). The limestones, from which the temple is built, have a consistency of 2.38gr/ml. In addition, the grouting used in the neighboring constructions turns out to be lime mortar with little hydraulics. Also, the aggregate of the grouting is composed of pyroclastic or quartz sand. The consistency of the grout is estimated at 1.39 g/mL. In addition to the chemical analysis that has been carried out on the temple, non-destructive methods have been applied to assess its mechanical properties. The methods applied were that of impact measurement and ultrasound. In addition, for the final assessment of the mechanical characteristics of the masonry, a correlation was made with that presented in the appendix of Chapter 3 of the KADET regulation [7]. The final values as obtained are presented in Table 1.

Table 1. Estimation of the characteristics of masonry

Strength of masonry made of carved stones	
Compressible strength of masonry (Mpa)	4.98
Modulus of Elasticity (Gpa)	4.2
ν (Poisson)	0.30
Strength of rubble masonry	
Compressible strength of masonry (Mpa)	2.53
Modulus of Elasticity (Gpa)	1.40
ν (Poisson)	0.30

From the in-situ observations, two main ways of structuring the stone masonry of the temple were found (see Figure 3). The pseudo-isodome ashlar limestone masonry, measuring approximately 50x25x20 cm each part, and random rubble masonry. The masonry has a maximum thickness of 80 cm, the domes about 26 cm thick and the west face is 58 cm.

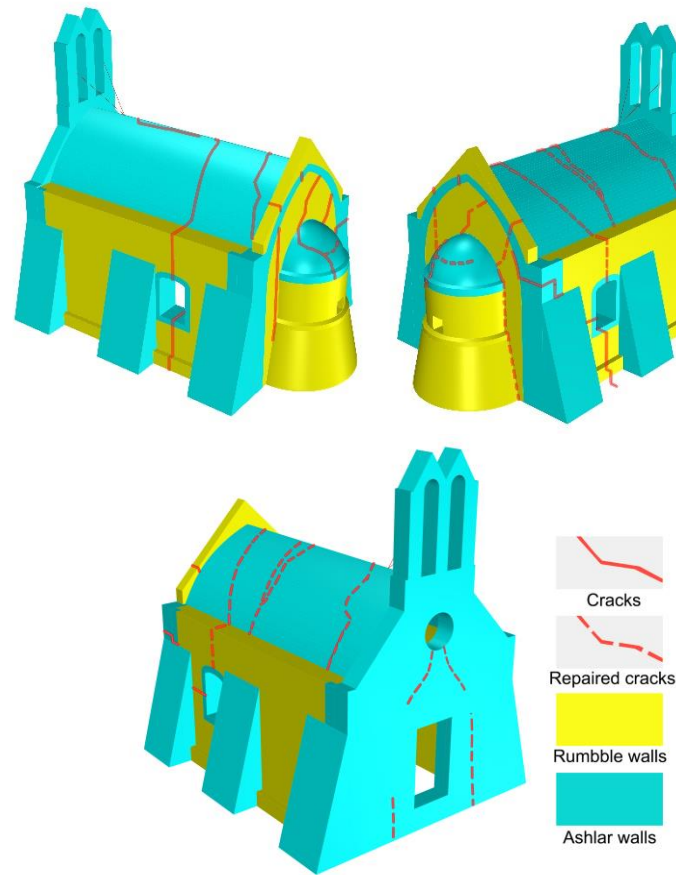


Fig. 3. Perspective diagram of materials and damages

As we discerned under the colouring, the outer face of the western face with the belfry, possibly the outer faces of the six buttresses, the arched frames of the openings and the dome of nook, were built with carved limestones. The domes, parts of the thickness of the openings, are indirectly found to be made of carved limestones, due to the type of cracks, the constructions located in the area or methods of structure that were common during the same time. The limestone structure material was established by sampling and laboratory FTIR testing to Laboratory of Materials for Cultural Heritage & Modern Building.

The walls in the longitudinal direction, the inner side of the western face, the base and the body of the nook are made of uncut stones with grouting. This was assumed from the material which has been revealed through the cracks and from older pathology photographic material, as no archaeological research or extensive conservation work has taken place.

3.4 Damage and cracking

The regular colorings and previous piecemeal repairs of the temple surfaces make it difficult to understand the failure mechanisms on the stone masonry precisely. The ageing of the construction and weather conditions aggravated the deterioration of the joint mortars. The orthophoto of the top view of the dome shows us cracks that are also corresponding to the interior. In summary:

- The north-east corner along with the buttress is almost detached with a range of cracks from top to foundation. The mechanism which is active seems to be a combination of ground subsidence and seismic excitation with a simultaneous overturning tendency. In addition, the failure of the mortar of the gutters causes the accelerated corrosion of the masonry since the water flows into the joints and the local cracks.
- A tendency also to cut off the eastern half of the temple in a direction towards the north-east corner is indicated through continuous cracks
- Cracks and curvature of eastern masonry indicate that the failure mechanism in the present case is also combinatorial. The seismic loads in the masonry during the time and the east-facing dome which finds an obstacle in the nook. The result is the vertical faulting of the eastern face with the simultaneous action of subsidence in the north-eastern buttress corner (Figure 4).



Fig. 4. External (photo from 28th Ephorate of Antiquities of Chania, 2007) and internal damage on the east side of temple (2022).

4 Analyses

4.1 Static and dynamic loadings

The design spectrum for structural analysis was based on the technical guidelines of the KADET 2022 regulation (Figure 5) [7]. The soil category was assumed to be A, meaning that the structure was founded on rock soil. In addition, the significance class of the building was chosen to be IV as the building has a monumental character [7].

About the static loading the combination of $1G+0.3Q$, where G is the self-weight of the structure and $Q=1 \text{ kn/m}^2$ the moving loads on the structure was considered [8-9]. For response spectrum analysis four dynamic load combinations were imposed, considering the vertical component of the earthquake negligible. The results which are given below were produced by linear analysis.

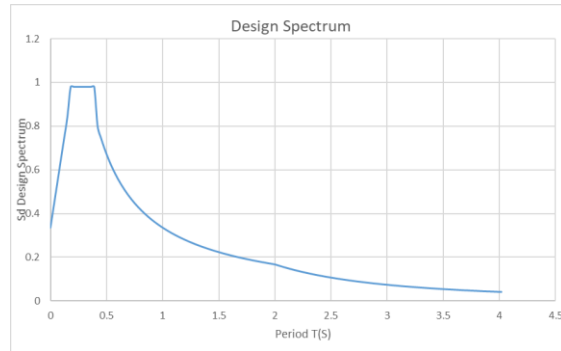


Fig. 5. Design spectrum, Horizontal axis Time(s) and Vertical axis design spectrum

In addition to the dynamic analysis, research was carried out to correlate the pathology of the structure with the possible existence of differential subsidence on the east side of the church.

4.2 Modelling

The finite element method is used to model the structure [10-11]. The chosen mesh was done after several tests and analyses of preliminary models to achieve the desired accuracy of the results. The type of finite elements was tetrahedral with four nodes and 3 degrees of freedom per node. All the analyses and results described below were calculated digitally in the MSC Marc Mentat program.

4.3 Modal analysis

As a result of the modal analysis, the most characteristic eigenfrequencies and eigenmodes of the temple were calculated. Especially, the 1st eigenfrequency (7.82Hz), the 2nd (9.82Hz), the 11th (22.69Hz) and the 14th (28.44Hz) were also

recorded by in situ measurements with little deviation. Table 2 summarizes the data from the experimental data and those calculated from the finite element model.

Table 2. Summary table of natural frequencies from in situ measurements and modal analyses

Modal response	Natural frequencies of finite element model	Percentage of the mass activate			Natural frequencies from in situ measurements
		X	Y	Z	
1	7.87	0.071	3.98	0.04	7,63
2	9.82	75.74	3.99	0.04	9,95
3	13.74	75.92	4.3	0.09	11.57
4	14.27	75.93	4.46	0.09	11.98
5	14.68	75.93	87.65	0.15	12.33
6	17.19	76.75	87.65	0.16	16.15
7	20.37	76.93	89.83	0.25	16.41
8	20.51	79.23	90,01	0.26	21.35
9	21.00	79.23	90.26	0.27	21.89
10	21.71	82.21	90.26	0.27	22.31
11	22.69	92.19	90.27	0.28	25.99
12	25.18	92.19	91.13	0.33	26.41
13	27.31	92.43	91.15	0.34	28.62
14	28.,44	93.31	91.15	0.37	29.48
15	28.79	93.43	91.19	0.17	

4.4 Response spectrum analysis

The response spectrum analysis was calculated by importing the design spectrum into the finite element model and taking in each combination a different percentage of action of the seismic component. Four dynamic load combinations: $(1.0*Ex+0.3*Ey)$, $(-1.0*Ex-0.3*Ey)$, $(0.3*Ex+1.0*Ey)$ and $(-0.3*Ex-1.0*Ey)$ were used. The results of first combination $(1.0*Ex+0.3*Ey)$ correlate with the pathology of the structure. Indicative results of the analysis are presented in Figure 6.

Stress concentrations are presented at points where the structure has been cracked. Most stresses on the dome as we can see in Figure 6, are tensile stresses. The west facade of the dome is stressed in tension and shear also. The stresses are concentrated at the points where the facade has been cracked. Finally, on the east elevation shear

stresses are concentrated at the corners of the masonry as well as at the bottom of the pediment.

4.5 Sedimentation

Three different cases of subsidence were studied: a) subsidence only on the northeast side of the temple (scenario 1), b) subsidence on both corners of the east side of the temple (scenario 2) and c) a total subsidence on the entire east side of the temple (corners and dome, scenario 3) (see Fig 7). In all scenarios the subsidence was set equal to 2cm.

Indicative results of the examined scenarios are presented in Figures 8-10. In each figure in 1 the out-of-plane movements of the dome are presented (in m), in 2 the distribution of maximum principal tensile stresses on the eastern face of the temple (in Pa) and in 3, 4 the vertical movements of the temple (in m).

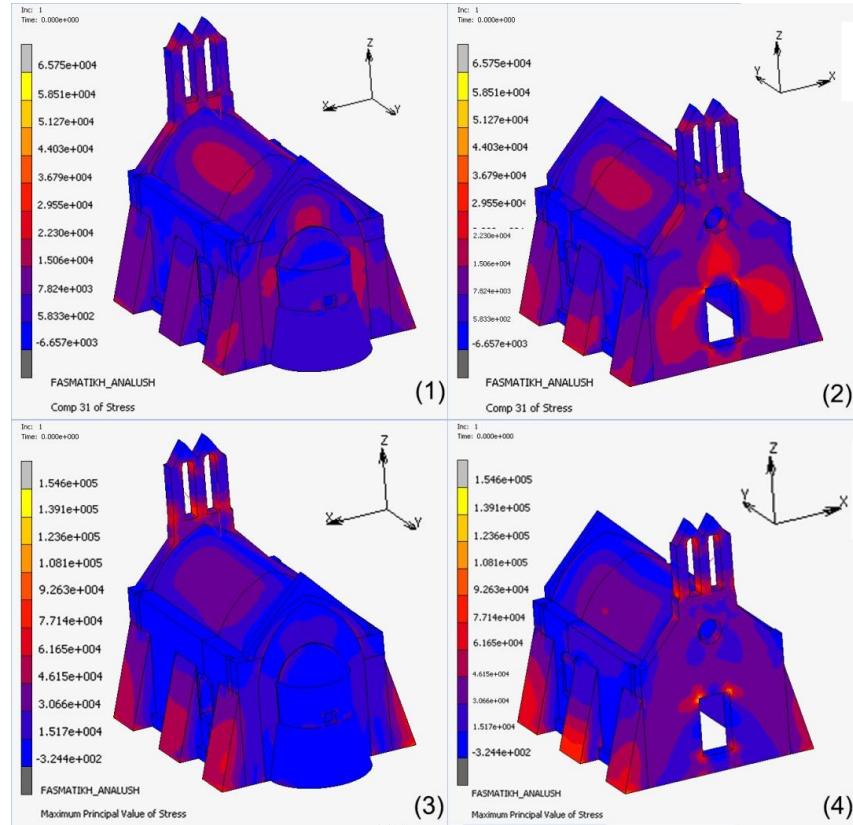


Fig. 6. Response spectrum analysis results (Case $1.0 \cdot E_x + 0.3 \cdot E_y$) the shear stress S_{xz} (1-2), and the maximum principal tensile stress (3-4) (in Pa)

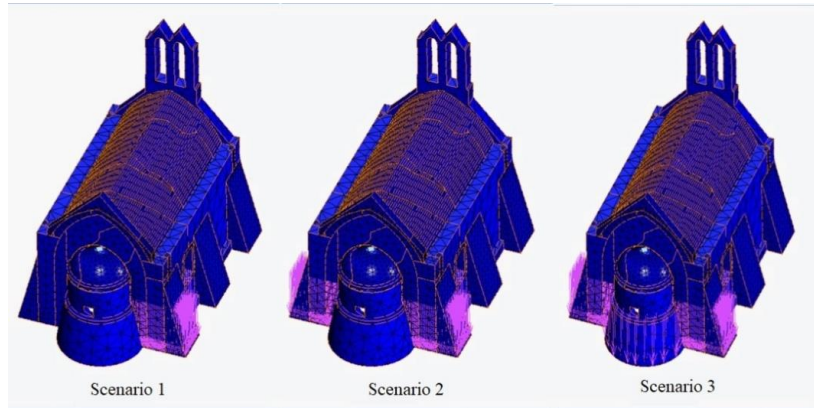


Fig.7. Scenarios of Sedimentation

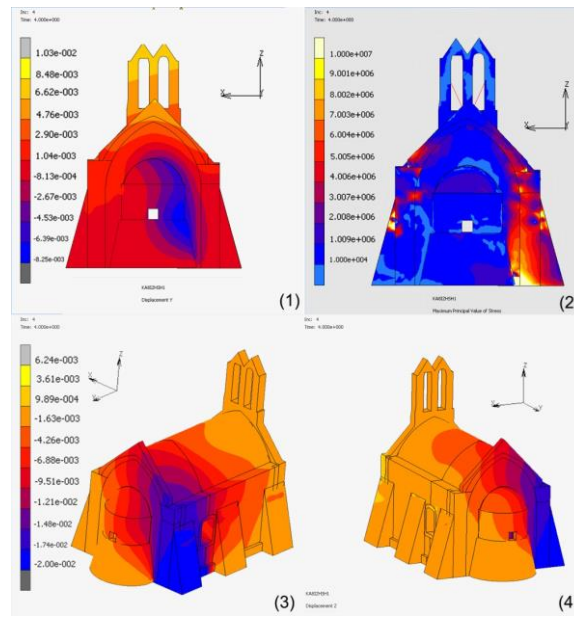


Fig. 8. Analysis results for loading scenario 1.

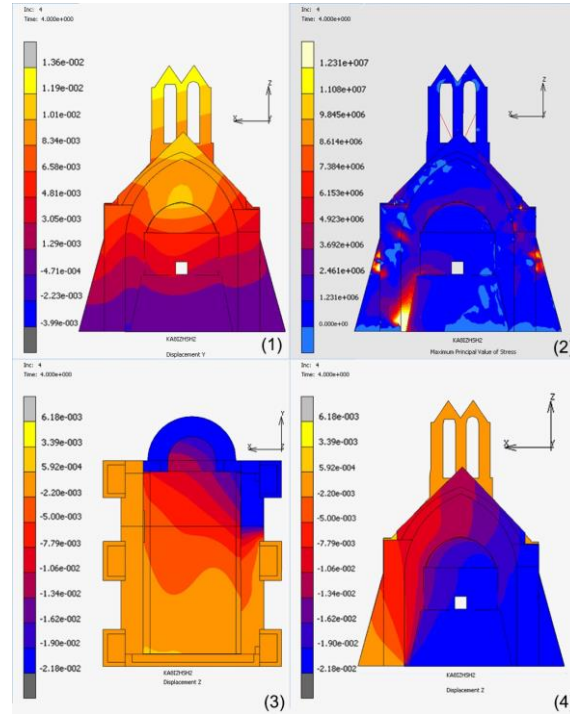


Fig. 9. Analysis results for loading scenario 2.

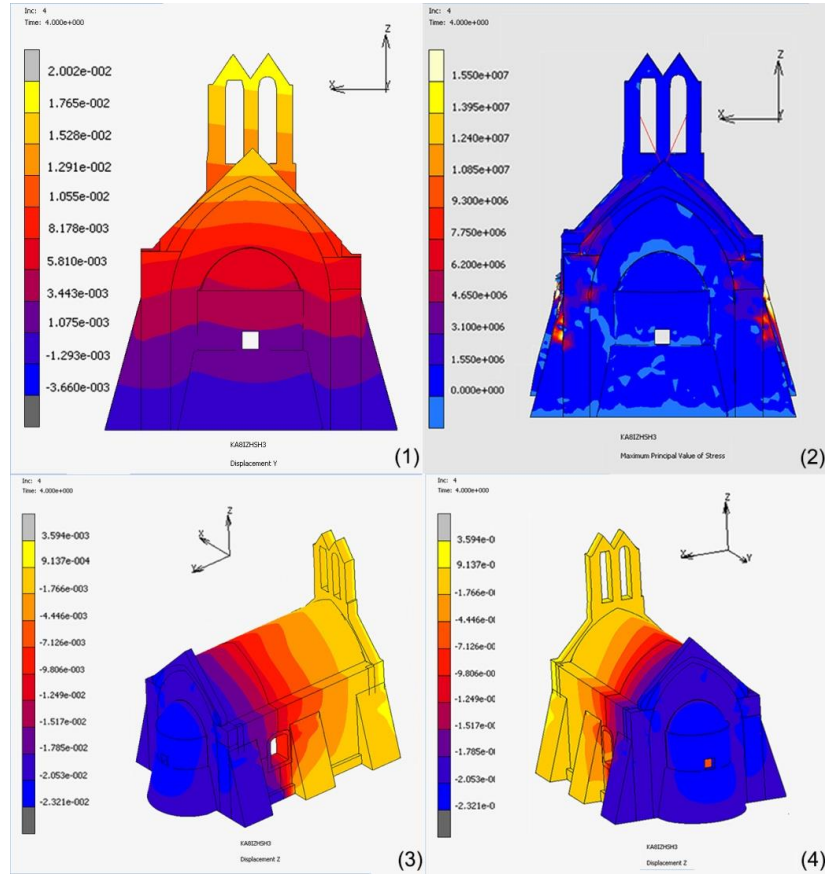


Fig. 10. Analysis results for loading scenario 3.

From a comparison of all the scenarios analysed, the most likely scenario to have taken place is scenario 2. This scenario presents such a deformation profile which indicates the concentration of stresses at points close enough to where damage has occurred in the temple.

4.6 Seismic excitation

For the evaluation of the structural behaviour under seismic excitations, the accelerograms of two seismic events were selected and applied to the models, in the transient dynamic analysis.

First the Arkalochori Earthquake, On 27 September 2021 which was a strong earthquake with Moment magnitude, M_w 6.0, associated with normal faulting ruptured the central part of the island of Crete, Greece, at about 20 km to the south of Heraklion.

Second the earthquake on January 17, 1995, a major earthquake struck near the city of Kobe, Japan, with had a moment magnitude of 6.9.

To study the influence of the masonry buttresses to the dynamic behaviour of the structure two models were analyzed. From the contour plots of maximum principal stress, the reduction of tension because of the buttresses is shown in figures 11-12 for both earthquakes. In addition, the stress concentration relates with some of the existing cracks special to the eastern wall (fig. 3).

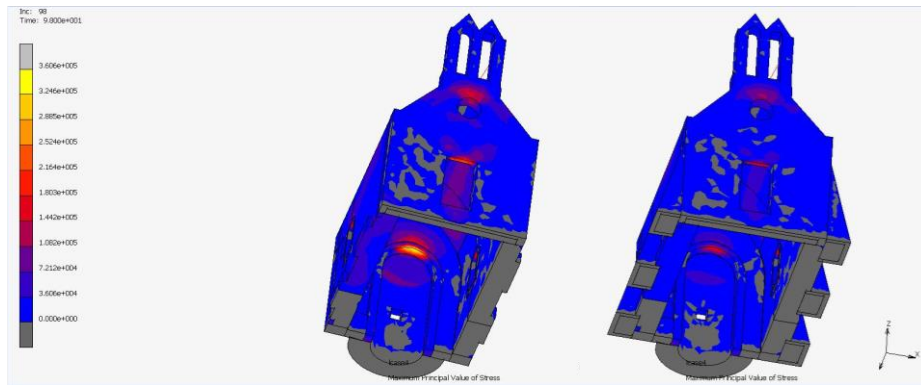


Fig. 11. Maximum principal tensile stress for Arkalochori earthquake transient analysis (in Pa) (left without and right with buttresses)

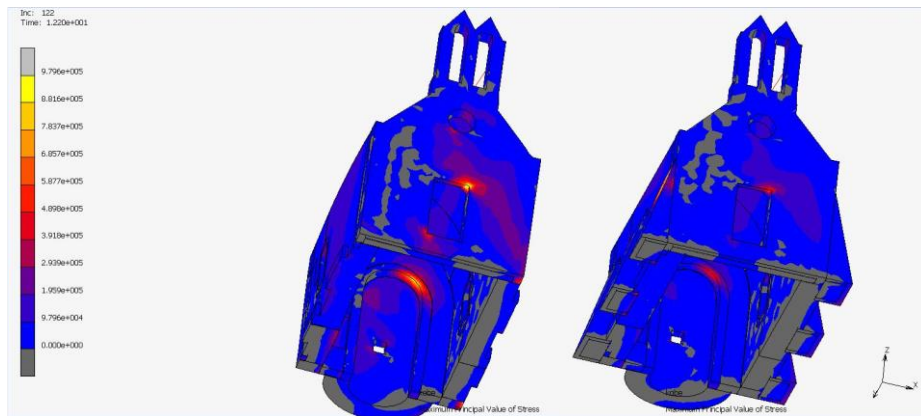


Fig. 12. Maximum principal tensile stress for Kobe earthquake transient analysis (in Pa) (left without and right with buttresses)

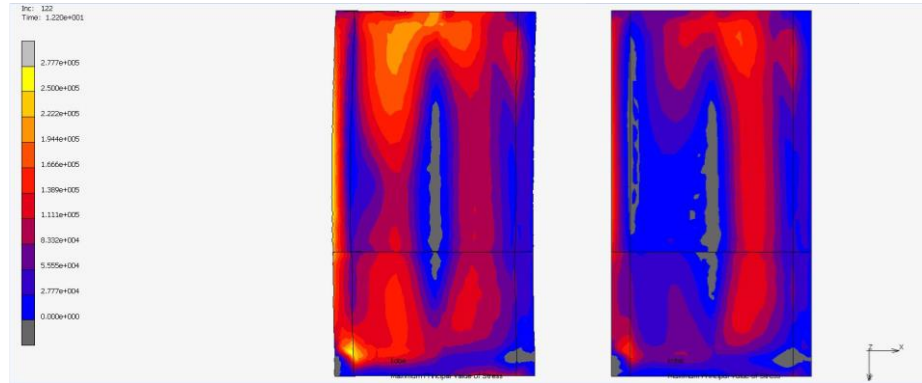


Fig. 13. Maximum principal tensile stress for Kobe earthquake transient analysis (in Pa) (vault top view) (left without and right with buttresses)

Future work will focus to the study of activation mechanism of the existing cracks with the modelling of existing cracks with unilateral contact-friction interfaces [12-13]

5. Conclusions

To evaluate the structural behaviour of a masonry Venetian Church with vault a detailed finite element model was used. Reasonable assumptions regarding the characteristics of the temple were assumed, like the way the structure was founded, the exact mechanical characteristics of the masonry, the exact determination of the way the masonry of the temple was built in some places and the history of the structural damages. In addition, the corrosion, and its influence on the final strength of the masonry in an unknown parameter.

The influence of specific structural parts of the structure like masonry struts and wall connections to the structural behaviour were examined through the response spectrum analysis, the static analysis for subsidence of some parts and the transient analysis of two specific seismic excitation. Comparison of model analysis results with the structural pathology led to the identification of the causes of the damage to the church since the concentrations of stresses due to dynamic loading and subsidence are almost identical to the areas of damage.

Considering all these damages in a time series, a classification could be as follow:

1. Initially the main cause of weakening of the support is the erosion of the masonry due to weathering.
2. Possibly some dynamic loadings which had an acceleration of that of the design dynamic load or even greater caused the first cracks.
3. The gradual removal of the soil around the east side of the temple due to rainwater runoff probably caused minor subsidence in the structure causing the corresponding damage-cracks.

Compliant way of restoration in terms of building methods and materials could suggested as defined by the Venice Charter 1967.

1. Archaeological research and excavation to uncover new evidence.
2. Excavation of the foundation for autopsy and then deciding how to strengthen it either by using piles or by adding reinforced concrete beams.
3. Use of joint mortars of the same composition after existing ones, limestones of the same dimensions, stone jointing (with stones and metal plates).
4. Soil filling in the nook area which is approximately 0.5m.
5. Maintain and recover old gutters according to the trace on the wall.
6. Restoration of belfry.
7. Color restoration on the exterior, with priority on preserving mainly the existing color traces - witnesses.

Acknowledgements

The authors would like to give thanks to the follow people of the Technical University of Crete for their critical contribution to completion this study:

- Professors Costas Providakis director of the Applied Mechanics Laboratory and Panagiotis Partsinevelos of the Laboratory of Geodesy and Computing and Soil Mechanics to provide us the equipment for the field measurements.
- Professor Pagona-Noni Maravelaki Director & Founder Lab of Materials for Cultural Heritage and Modern Building (MaCHMoB) for the grouting analysis.
- Professors Nikos Skoutelis and Klimis Aslanidis from School of Architecture, for their support to design the plans for the temple.
- Post graduate students Augerou Nefeli, Ballianatos Konstantinos, Bidalis Orestis, Rapti Kalliopi and Stefanou Tonia for the work in the context of the transdisciplinary academic courses of the postgraduate program of the Technical University of Crete.

References

1. Fragioudakis T.: The venetian ecclesiastical census of 1637 in Chania region. 1st edn. Radamanthys, Chania (2021), (in Greek).
2. Tomadakis N.: Church of Crete A, Gouvernetou Codex - Sigilion, supplemental news of the Turkish era, in the Neohellenic Archive.pp 76. Efedrikos Agonas, Chania (1934) (in Greek).
3. Government Newspaper of Hellenic Democracy, FEK180/B1/Φ38/15663/348/21.04.1982, (1982), (in Greek).
4. Gratziou O.: Crete in the greatest mediaeval era. The testimony of ecclesiastical architecture. University Publications of Crete, Heraklion, 1st edn., 97-98. (2010) (in Greek).
5. Aloisio A., Pasquale A., Alaggio R., Fragiacommo M.: Assessment of Seismic Retrofitting Interventions of a Masonry Palace Using Operational Modal Analysis, in International Journal of Architectural Heritage, 16(5), 692–704 (2022)
6. Montabert A., Mercerat E.D., Clément J., Langlaude P., Lyon-Caen H., Lancieri M.: High resolution operational modal analysis of Sant'Agata del Mugello in light of its building history, Engineering Structures 254(1), 113767 (2022)
7. "Regulation for Valuation and Structural Masonry Interventions, KADET Draft - Athens (2022) (in Greek).

8. Ermopoulos I.: Eurocode 1 basic principles and actions on constructions. interpretive comments and application examples. 2edn, Athens (2005) (in Greek).
9. CEN: EN 1998-1 Design of structures for earthquake resistance -Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings (1998)
10. Leftheris B, Stavroulaki M, Sapounaki A, Stavroulakis G.: Computational Mechanics for heritage structures, WIT Press (2006)
11. Stavroulaki, M.E. and Tsinarakis, T.: Finite element analysis of masonry barrel vaults, in Proceedings of the 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 30 June - 2 July (2011)
12. Stavroulaki, M.E, Anousakis A., Mesaritaki A.: Finite element analysis of aggregated elongated vaulted structures, in 9th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 4-6 June (2018)
13. Stavroulaki M.E., Drosopoulos G., Tavlopoulou E., Skoutelis N., Stavroulakis G.: Investigation of the structural behaviour of a masonry castle by considering the actual damage, International Journal Research and Innovation, 3(1), (2018)