

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ

*Βελτιστοποίηση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων
νεότερου ιστορικού κτιρίου με χρήση laser scanning
vibrometer και διερεύνηση ειδικών επεμβάσεων.*

*Εφαρμογή στο κτίριο της Πρώην Ιερατικής Σχολής στην Ιερά
Μονή Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων.*

_Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια / Προβιδάκη Γεωργία

_Επιβλέπουσα Καθηγήτρια / Αν. Καθηγήτρια Σταυρουλάκη Μαρία

_Εξεταστική επιτροπή / Αν. Καθηγήτρια Κωτσάκη Αμαλία

Καθηγητής Σταυρουλάκης Γεώργιος

Απρίλιος 2022



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΎΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ
ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ΄

Βελτιστοποίηση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων
νεοτέρου ιστορικού κτιρίου με χρήση laser scanning
vibrometer και διερεύνηση ειδικών επεμβάσεων

/ Εφαρμογή στο κτίριο της Πρώην Ιερατικής Σχολής στην
Ιερά Μονή Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ

_Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια / Προβιδάκη Γεωργία

_Επιβλέπουσα Καθηγήτρια / Αν. Καθηγήτρια Σταυρουλάκη Μαρία

_Εξεταστική επιτροπή / Αν. Καθηγήτρια Κωτσάκη Αμαλία

Καθηγητής Σταυρουλάκης Γεώργιος

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την επιβλέπουσά μου και Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Πολυτεχνείου Κρήτης, κυρία Σταυρουλάκη Μαρία για την πολύτιμη βοήθειά της στην σύνθεση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Σε ολόκληρη την πορεία, η κατεύθυνση και οι συμβουλές που μου παρέδιδε συνέβαλλαν στην ήπια και ομαλή ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αλλά και στην λήψη σημαντικών αποφάσεων. Ο χρόνος που διέθετε ήταν αρκετός ώστε η εργασία να διεξαχθεί έγκαιρα, χωρίς προβλήματα και με ακριβή αποτελέσματα.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω στην Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κυρία Αμαλία Κωτσάκη και στον Καθηγητή κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη που αποτελούν τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω και την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης που με επιστημονικά υπεύθυνη την Καθηγήτρια Αμαλία Κωτσάκη εκπονεί το ερευνητικό έργο με τίτλο: «Διερεύνηση δυνατοτήτων προστασίας, ανάδειξης και επανάχρησης κτηρίου πρώην Ιερατικής Σχολής, καθώς και των παρακείμενων κτισμάτων κατοικιών στην Ιερά Μονή Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων στα Χανιά Κρήτης μαζί με τον περιβάλλοντα χώρο του», για την πολύτιμη βοήθεια τους στην συλλογή χρήσιμων στοιχείων όπως είναι η αποτύπωση και η αρχιτεκτονική πρόταση αποκατάστασης του κτιρίου μελέτης.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κύριο Προβιδάκη Κωνσταντίνο για την συμβολή του στην προσέγγιση του θέματος. Παράλληλα, τον ευχαριστώ για την παραχώρηση του εργαστηρίου για της πειραματικές δοκιμές και κυρίως των πιο σύγχρονων οργάνων μη καταστροφικού ελέγχου όπως το laser vibrometer. Με τις κατάλληλες οδηγίες του στην υλοποίηση πειραματικών τεχνικών συνέβαλλε στην αρμονική διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αδερφό μου, τον φίλο μου και τις φίλες μου για την τόσο μεγάλη υποστήριξη τους ώστε να παραδίδω σήμερα αυτήν την εργασία...

Ευχαριστώ πολύ, Γεωργία

Abstract

This thesis aims to explore the optimization method of monument's simulation using finite element analysis and matching computational with experimental values. The updated model is calibrated using data exported by Laser Vibrometry system which record vibrations of constructions. The aim of the proposed methodology is the simulation of historic building using finite element analysis in order to reflect its real modal analysis depended on the recorded mechanical parameters (such as eigenfrequencies and vibration). The role of main mechanical properties in updating model is also investigated, namely Young's Modulus. The case study takes part in a historic building made of load-bearing masonry named the Former Theological School of the monastery complex of Agia Triada Tzagarolon.

The first section describes the theoretical background in which this thesis is structured. Then, the elements of the case study are also presented namely its history, the existing structural damages and general area information (climatology, topography, geology) which fulfill the documentation area.

In the second section, the study of the current situation of case study is illustrated. In the beginning, the structural analysis started with stationary and eigenfrequency analysis. Afterwards, the response spectrum and time depended on analysis are presented. The sum of analysis is accomplished using Comsol Multiphysics software [1].

The third section showed an introduction about optimization method of finite elements modeling using laser vibrometer purchased by company in Germany named Polytec [2]. The Laboratory of Applied Engineering and Materials Strength in the School of Architectural Engineering of Technical University of Crete possess this non destructive technique. In the beginning, the experiment application takes place in situ case study

following the experiment application of laboratory. Subsequently, the optimization method is described in both of experiment applications. Matching the computational with experimental values and leading to the final updated mechanical parameters, the results of each structural analysis are shown.

In the fourth section, the updated simulation is further studied according to the architectural proposals of the research team of Technical University of Crete. Then, the results are compared with the current situation of historic building.

In the end, this thesis presents the conclusions that emerged from the structural analysis, the application of laser vibrometer and the importance of optimization process in simulation using the update of mechanical parameters. The conclusions lead to some proposals for future research and above applications.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της προσομοίωσης ενός ιστορικού κτιρίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και της προσέγγισης των υπολογιστικών τιμών των ιδιοσυχνοτήτων με τις πειραματικές τιμές. Ο στόχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση των ιστορικών κατασκευών για την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να προσεγγιστεί η πραγματική δυναμική συμπεριφορά του δομικού συστήματος της κατασκευής βάσει των καταγεγραμμένων δυναμικών χαρακτηριστικών του (όπως π.χ. συχνότητες και πλάτος δόνησης). Στην προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού του δομικού συστήματος, όπως είναι το Μέτρο Ελαστικότητας, στη μεταβολή της κίνησης του. Κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης η αναθεώρηση των τιμών πραγματοποιείται βάση τις πληροφορίες που έχουν αποκτηθεί με την χρήση συστήματος προηγμένης τεχνολογίας laser (laser vibrometry) το οποίο καταγράφει μικροδονήσεις των ελεγχόμενων κατασκευών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ένα ιστορικό κτίριο από φέρουσα τοιχοποιία, την Πρώην Ιερατική Σχολή της Ιεράς Μονής Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων, στα Χανιά.

Στην πρώτη ενότητα περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο κατά το οποίο η διατριβή διαρθρώνεται. Στη συνέχεια, αναλύεται η ιστορία του κτιρίου μελέτης, οι υφιστάμενες δομικές βλάβες καθώς και περεταίρω στοιχεία της περιοχής (κλιματολογικά, τοπογραφικά, γεωλογικά και σεισμοτεκτονικά) απαραίτητα για την τεκμηρίωση της κατασκευής και εν συνεχεία για τη μελέτη του δομικού συστήματος.

Στην δεύτερη ενότητα ακολουθεί η μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου μελέτης. Στην αρχή, η μελέτη ξεκινάει με τη στατική ανάλυση και την ανάλυση των δυναμικών μηχανικών χαρακτηριστικών (ιδιομορφική ανάλυση). Έπειτα, συνεχίζει με την ανάλυση της φασματικής και της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται μέσω της μεθόδου των

πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα με τη χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics [1].

Η τρίτη ενότητα, παρουσιάζει μία εισαγωγή στην μεθοδολογία αναθεώρησης (βελτιστοποίηση) των πεπερασμένων μοντέλων με την χρήση του προηγμένου συστήματος laser vibrometry PSV-500H της εταιρείας Polytec [2], Germany που διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Αντοχής Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αρχικά παρουσιάζεται η πειραματική εφαρμογή του laser vibrometer σε συνθήκες εργαστηρίου και στην συνέχεια στο πεδίο του κτιρίου μελέτης της Πρώην Ιερατικής Σχολής. Έπειτα γίνεται περιγραφή της διαδικασίας της βελτιστοποίησης τόσο στα πλαίσια του εργαστηρίου όσο και στο πεδίο της κατασκευής. Στο τέλος της ενότητας αυτής παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του κτιρίου μελέτης μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μετά την διαδικασία βέλτιστης προσέγγισης των δεδομένων που προκύπτουν αριθμητικά από το λογισμικό σε σχέση με τα μετρούμενα δυναμικά χαρακτηριστικά.

Στην τέταρτη ενότητα, το μοντέλο με τις αναθεωρημένες παραμέτρους μελετάται λαμβάνοντας υπόψη τις αρχιτεκτονικές προτάσεις της ερευνητικής ομάδας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την προσθήκη συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις, την χρήση του συστήματος laser PSV-500H (laser vibrometry) και την χρησιμότητα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης της προσομοίωσης του κτιρίου μελέτης μέσω της αναθεώρησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών ιστορικής κατασκευής. Τα συμπεράσματα καταλήγουν σε ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα και διερεύνηση του πεδίου εφαρμογών.

Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων	7
Κατάλογος πινάκων	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Εισαγωγή.	13
1.1. Αντικείμενο.....	15
1.2. Σκοπός	16
1.3. Μεθοδολογία.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο	21
2.1. Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων.....	21
2.2.Βελτιστοποίηση.....	24
2.3. Ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας (OMA).....	27
2.4. Μη καταστροφικές τεχνικές	31
2.5. Laser scanning vibrometer	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: Γενικές πληροφορίες του κτιρίου μελέτης	50
3.1. Ιστορική αναδρομή της Πρώην Ιερατικής Σχολής.....	50
3.2. Περιγραφή του κτιρίου μελέτης	56
3.3. Τοπογραφία της περιοχής μελέτης.....	68
3.4. Κλιματολογικά δεδομένα	70
3.5. Γεωλογικά δεδομένα	73
3.6. Σεισμοτεκτονικά δεδομένα.....	75
3.7.Αποτύπωση φθορών της κατασκευής	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: Διερεύνηση της υφιστάμενης κατάστασης.....	84
4.1. Μηχανικές ιδιότητες τοιχοποιίας.....	86
4.2. Υπολογιστικό μοντέλο – Φορτίσεις.....	88
4.2.1. Υπολογιστικό μοντέλο.....	88
4.2.2. Φορτίσεις.....	89
4.3. Αριθμητική ανάλυση.....	93
4.3.1. Έλεγχος στατικής επάρκειας.....	93

4.3.2. Ιδιομορφική ανάλυση.....	97
4.3.3. Δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής.....	103
4.3.4. Δυναμική Απόκριση της κατασκευής σε πραγματικό σεισμικό γεγονός	109
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: Πειραματικές εφαρμογές	112
5.1. Πειραματική εφαρμογή σε εργαστηριακές συνθήκες.....	112
5.2. Πειραματική εφαρμογή στο κτίριο μελέτης.....	117
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο: Βελτιστοποίηση.....	129
6.1. Εισαγωγή	129
6.2. Βελτιστοποίηση στις εργαστηριακές συνθήκες.....	132
6.3. Βελτιστοποίηση στο κτίριο μελέτης.....	136
6.4. Αναλύσεις με βέλτιστο μέτρο ελαστικότητας	140
6.4.1. Έλεγχος στατικής επάρκειας.....	140
6.4.2. Δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής.....	144
6.4.3. Δυναμική Απόκριση της κατασκευής σε πραγματικό σεισμικό γεγονός	148
6.4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων του μοντέλου πριν την βελτιστοποίηση με τα αποτελέσματα του μοντέλου μετά την βελτιστοποίηση.....	151
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο: Διερεύνηση ειδικών επεμβάσεων	152
7.1. Έλεγχος στατικής επάρκειας.....	157
7.2. Ιδιομορφική ανάλυση.....	161
7.3. Δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής.....	167
7.4. Δυναμική Απόκριση της κατασκευής σε πραγματικό σεισμικό γεγονός	170
7.5. Σύγκριση δυναμικής φασματικής απόκρισης του μοντέλου επεμβάσεων με το μοντέλο υφιστάμενης κατάστασης.....	173

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο: Συμπεράσματα - Προτάσεις	175
8.1. Συμπεράσματα.....	175
8.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	179
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο: Βιβλιογραφία	180
 Παράρτημα Α΄ : Νομοθετικό πλαίσιο ιστορικών κτιρίων.....	191
 Παράρτημα Β΄ : Διαχωρισμός διαδικασίας Operational Modal Analysis	194
 Παράρτημα Γ΄: Προτάσεις δομικών επεμβάσεων.....	196

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας

Εικόνα 2: Ιδιομορφική ανάλυση για το κτίριο των Ενετικών Νεωρίων στο Ενετικό λιμάνι των Χανίων[16]

Εικόνα 3: Η διακριτοποίηση του μοντέλου του κτιρίου του Φραγκοκάστελου[13]

Εικόνα 4: : Παράδειγμα διαγραμματικής απεικόνισης της βελτιστοποίησης [17]

Εικόνα 5: Σύστημα επιταχυνσιόμετρων

Εικόνα 6: Μη καταστροφικές τεχνικές [60]

Εικόνα 7: Παράδειγμα φωτογραφικής αποτύπωσης στον Καθεδρικό Ναό της πόλης Οβιέντο, Ισπανία [59]

Εικόνα 8: Χαρτογράφηση περιβαλλοντικών φθορών στην Εκκλησία του Αγίου Νικολάου στην πόλη Maisons-Laffitte (Γαλλία) [59]

Εικόνα 9: Εικόνες FOM [59]

Εικόνα 10: Εφαρμογή flat jack [59]

Εικόνα 11: Διαπερατόμετρο [59]

Εικόνα 12: Όργανο μέτρησης της υγρασίας [59]

Εικόνα 13: Παθητική θερμογραφία που εφαρμόζεται για την αναγνώριση των ρωγμών σε τοιχοποιία στην εκκλησία στην Sant Maria ad Cryptas (Ιταλία) (α) μετά τον σεισμό του 2009 (b) το 2007, (c) μετά το 2007 [59]

Εικόνα 14: Ενεργητική θερμογραφία η οποία εφαρμόζεται σε pagoda Magoksa Temple (Korea) [59]

Εικόνα 15: Σύστημα μέτρησης πλάτους κύματος για την ακουστική τομογραφία [59]

Εικόνα 16 Τρισδιάστατη τομογραφία του αγάλματος της Ελεονώρα Αρραγκόνα [59]

Εικόνα 17 Σύστημα Impact Echo [59]

Εικόνα 18 Εφαρμογή του ραντάρ στο μνημείο Monte de Pieta (Νάπολη, Ιταλία) [59]

Εικόνα 19 Οι αρχές του laser vibrometer [63]

Εικόνα 20 Πειραματική διάταξη του laser vibrometer με την διαδικασία διεξαγωγής φάσματος συχνοτήτων

Εικόνα 21 «Η πρώτη σφραγίδα του Ιεραδιδασκαλείου» [65]

Εικόνα 22 «Ο ΄ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ΄ του Ιεραδιδασκαλείου» [65]

Εικόνα 23 Φωτογραφία της Μονής Αγίας Τριάδας που φαίνεται μέρος του Ιεροδιδασκαλείου. [65]

Εικόνα 24: Γυναίκες και παιδιά στον περίβολο της Μονής , το 1897, χρήση ως νοσοκομείο επαναστατών [65]

Εικόνα 25: Ομαδική φωτογραφία μαθητών με τον διευθυντή Χρ. Τσεπετάκη μπροστά από το Ηγουμενείο. [65]

Εικόνα 26 Τρισδιάστατη απεικόνιση της Πρώην Ιερατικής Σχολής [5]

Εικόνα 27: Η κάτοψη του ισογείου [5]

Εικόνα 28: Κάτοψη ορόφου (α) βόρειο τμήμα, (β) νότιο τμήμα [5]

Εικόνα 29: Διαμήκεις τομές (α) από την δυτική πλευρά, (β) από την ανατολική πλευρά [5]

Εικόνα 30: Πρόσοψη της Πρώην Ιερατικής Σχολής

Εικόνα 31: Λειτουργίες της Πρώην Ιερατικής Σχολής [65]

Εικόνα 32: Είσοδοι του κτιρίου [65]

Εικόνα 33: Ο διάδρομος με τους πεσσούς στην δυτική πλευρά του κτιρίου

Εικόνα 34: Αίθουσα τελετών στο ισόγειο [65]

Εικόνα 35: Αίθουσα διδασκαλίας στο ισόγειο [65]

Εικόνα 36: Χώροι υγιεινής στο ισόγειο

Εικόνα 37: Κεντρικό κλιμακοστάσιο

Εικόνα 38: Κλιμακοστάσιο στους χώρους υγιεινής [65]

Εικόνα 39: Κοιτώνας στον όροφο

Εικόνα 40: Δωμάτιο του επιτηρητή στον όροφο

Εικόνα 41: Χώρος νοσοκομείο στο νότιο τμήμα

Εικόνα 42: : (α) Το αίθριο του νότιου τμήματος και (β) η σύνδεση με το δώμα της νότιας πτέρυγας

Εικόνα 43: Το λιθόκτιστο κλιμακοστάσιο για την πρόσβαση στην Πρώην Ιερατική Σχολής από τον Ναϊσκο

Εικόνα 44: Τρισδιάστατη απεικόνιση της Μονής Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων [66]

Εικόνα 45: Οι αμπελώνες στον περίβολο της Μονής

Εικόνα 46: Γεωγραφική Θέση της περιοχής μελέτης [70]

Εικόνα 47: Θερμοκρασία [71]

Εικόνα 48: Υγρασία [71]

Εικόνα 49: Υετός [71]

Εικόνα 50: Άνεμοι [71]

Εικόνα 51: Χάρτης που απεικονίζει την περιοχή μελέτης με βάση το τοπογραφικό 1:5000 Γ.Υ.Σ.

Εικόνα 52 Χάρτης μορφολογικού ανάγλυφου περιοχών της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων [70]

Εικόνα 53: Το γεωδυναμικό και τεκτονικό μοντέλο της Ελλάδας [72]

Εικόνα 54: Τα νεοτεκτονικά ρήγματα της Δυτικής Κρήτης [72]

Εικόνα 55 Τα επίκεντρα των σεισμών ενδιάμεσου βάθους [72]

Εικόνα 56: Τα επίκεντρα των επιφανειακών σεισμών στη Δυτική Κρήτη [72]

Εικόνα 57: Ρωγμή στην δυτική τοιχοποιία

Εικόνα 58: Ρωγμή σε εσωτερική τοιχοποιία

Εικόνα 59: : Ύπαρξη ριζικών συστημάτων στην τοιχοποιία

Εικόνα 60: Ύπαρξη ριζικών συστημάτων στο δάπεδο

Εικόνα 61 Αποκόλληση κονιάματος

Εικόνα 62 Κατάρρευση ξύλινων στοιχείων στον όροφο

Εικόνα 63 Κατάρρευση ξύλινων στοιχείων στο κλιμακοστάσιο

Εικόνα 64 Κατάρρευση των σανιδιών στο κλιμακοστάσιο

Εικόνα 65 Προσβολή ξυλείας

Εικόνα 66 Παραμορφώσεις στα ξύλινα στοιχεία των ανοιγμάτων

Εικόνα 67 Αποτύπωση φθορών εξωτερικά του κτιρίου [65]

Εικόνα 68 Αποτύπωση φθορών εσωτερικά του κτιρίου [65]

Εικόνα 69: Σημεία δειγματοληψιών στην κάτοψη ισογείου [74]

Εικόνα 70: (α) Προσομοίωση του κτιρίου της Πρώην Ιερατικής Σχολής, (β) δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του κτιρίου

Εικόνα 71 Ζώνες έντασης χιονόπτωσης [75]

Εικόνα 72: Ορθές τάσεις στον άξονα Χ με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 73 Ορθές τάσεις στον άξονα Χ με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 74 Ορθές τάσεις στον άξονα Υ με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 75 Ορθές τάσεις στον άξονα Υ με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 76 Ορθές τάσεις στον άξονα Ζ με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 77 Ορθές τάσεις στον άξονα Ζ με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 78: 1η ιδιομορφή στα 7,49 Hz

Εικόνα 79: 2^η ιδιομορφή στα 7,75 Hz

Εικόνα 80: 3^η ιδιομορφή στα 7,87 Hz

Εικόνα 81: 4^η ιδιομορφή στα 7,91 Hz

Εικόνα 82: 5^η ιδιομορφή στα 7,99 Hz

Εικόνα 83: 6^η ιδιομορφή στα 8,1169Hz

Εικόνα 84: 7^η ιδιομορφή στα 8,1197Hz

Εικόνα 85: 8^η ιδιομορφή στα 8,12 Hz

Εικόνα 86: 9^η ιδιομορφή στα 8,19 Hz

Εικόνα 87: 10^η ιδιομορφή στα 8,20 Hz

Εικόνα 88 Φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8

Εικόνα 89: Συνολικές μετακινήσεις για την 1^η περίπτωση συνδυασμού

Εικόνα 90: Περιοχές αστοχίας για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 91: Περιοχές αστοχίας για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό (λεπτομέρεια στον νότιο όγκο)

Εικόνα 92: Περιοχές αστοχίας για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό με το συνολικό μοντέλο της κατασκευής

Εικόνα 93: Περιοχές αστοχίας για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό(λεπτομέρεια στον νότιο όγκο)

Εικόνα 94: Χρονοϊστορίες κατά X, Y και Z, αντίστοιχα

Εικόνα 95: Κύριες ορθές τάσεις στα 20 sec

Εικόνα 96: Μετακίνηση στα 20 sec

Εικόνα 97: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb στα 30 sec

Εικόνα 98: Πείραμα στο δοκίμιο

Εικόνα 99: Τοποθέτηση ταινίας ανακλαστικότητας

Εικόνα 100: Κεφαλή laser vibrometry

Εικόνα 101: Πειραματική εφαρμογή

Εικόνα 102: Αποτελέσματα από το λογισμικό επεξεργασίας μετρήσεων του laser vibrometer: (α) τριγωνικό πλέγμα και χρονοϊστορία ταχύτητας και (β) φάσμα συχνοτήτων μεταβολής ταχύτητας και επιτάχυνσης

Εικόνα 103: Φάσμα συχνοτήτων στο λογισμικό Comsol Multiphysics

Εικόνα 104: Πειραματική εφαρμογή στην Πρώην Ιερατική Σχολή

Εικόνα 105: Αισθητήρες επιτάχυνσης MS

Εικόνα 106: Αριστερά η συσκευής καταγραφικού MR, δεξιά συσκευής συντονισμού «NCC light»

Εικόνα 107: Συνδεσμολογία συστήματος επιταχυνσιομέτρων

Εικόνα 108: Τοποθέτηση συσκευής επιταχυνσιομέτρων στην Πρώην Ιερατική Σχολή

Εικόνα 109: Τοποθέτηση αισθητήρα επιτάχυνσης στην Πρώην Ιερατική Σχολή

Εικόνα 110: Κανάλια 1-3 για το σημείο 1 - για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 111: Κανάλια 4-6 για το σημείο 2 -για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 112: Κανάλια 7-9 για το σημείο 3-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 113: Κανάλια 10-12 για το σημείο 4-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 114: Κανάλια 1-3 για το σημείο 1-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 115: Κανάλια 4-6 για το σημείο 2-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 116: Κανάλια 7-9 για το σημείο 3-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 117: Κανάλια 10-12 για το σημείο 4-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 118: Κανάλια 1-3 για το σημείο 1-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 119: Κανάλια 4-6 για το σημείο 2-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 120: Κανάλια 7-9 για το σημείο 3-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 121: Κανάλια 10-12 για το σημείο 4-για X, Y και Z αντίστοιχα

Εικόνα 122: Κανονικοποιημένο φάσμα πυκνότητας

Εικόνα 123: Τοποθέτηση του laser vibrometry εσωτερικά του κτιρίου

Εικόνα 124: Χρωματικός χάρτης στην περιοχή των πεσσών στην δυτική όψη του κτιρίου

Εικόνα 125: Χρωματικός χάρτης σε ρηγματωμένη περιοχή

Εικόνα 126: Χρωματικό χάρτης σε αποσαθρωμένη περιοχή εσωτερικά του κτιρίου

Εικόνα 127: Διαγραμματική απεικόνιση της βελτιστοποίησης

Εικόνα 128: Ταλάντωση δοκιμίου στο πείραμα εφαρμογής στο εργαστήριο

Εικόνα 129: Φάσμα συχνοτήτων μεταβολής ταχύτητας από το πείραμα εφαρμογής στο δοκίμιο

Εικόνα 130: Η διακριτοποίηση του δοκιμίου μετά την προσομοίωση της πειραματικής εφαρμογής

Εικόνα 131: Τελικό Μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου

Εικόνα 132: Οι ιδιοσυχνότητες που βρέθηκαν με το λογισμικό ARTeMIS

Εικόνα 133: Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (1.9672Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (2.188Hz)

Εικόνα 134: Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (3.635Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (3.313 Hz)

Εικόνα 135: Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (4.119Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (4.188 Hz)

Εικόνα 136: Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (8.152Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (8.188 Hz)

Εικόνα 137: Ορθές τάσεις στον άξονα X με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 138 Ορθές τάσεις στον άξονα X με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 139 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 140 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 141 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 142 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 143: Φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8

Εικόνα 144: Συνολικές μετακινήσεις για τον 1ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 145 Περιοχές αστοχίας για τον 1ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 146 Περιοχές αστοχίας για τον 1ο σεισμικό συνδυασμό
(λεπτομέρεια στον νότιο όγκο)

Εικόνα 147 Περιοχές αστοχίας για τον 5ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 148: Χρονοϊστορίες κατά (α) X , (β) Y και (γ) Z, αντίστοιχα

Εικόνα 149 Κύριες ορθές τάσεις στα 20 sec

Εικόνα 150 Μετακίνηση στα 20 sec

Εικόνα 151: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb

Εικόνα 152: Σύγκριση αποτελεσμάτων (α) μετά την βελτιστοποίηση, (β)
πριν την βελτιστοποίηση

Εικόνα 153: Διαμήκης τομές κατά μήκος της στοάς [5]

Εικόνα 154: Διαμήκης τομή κατά μήκος των δωματίων του ισογείου [5]

Εικόνα 155: Εγκάρσια τομή [5]

Εικόνα 156: (α) Προσομοίωση της Πρώην Ιερατικής Σχολής και (β) δίκτυο
πεπερασμένων στοιχείων μετά τις αρχιτεκτονικές προτάσεις

Εικόνα 157: Ορθές τάσεις στον άξονα X με ελάχιστη την εφελκυστική
αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 158 Ορθές τάσεις στον άξονα X με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της
τοιχοποιίας

Εικόνα 159 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με ελάχιστη την εφελκυστική
αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 160 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της
τοιχοποιίας

Εικόνα 161 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με ελάχιστη την εφελκυστική
αντοχή της τοιχοποιίας

Εικόνα 162 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της
τοιχοποιίας

Εικόνα 163: 1η ιδιομορφή στα 8,5153 Hz

Εικόνα 164: 2η ιδιομορφή στα 8,5155 Hz

Εικόνα 165: 3η ιδιομορφή στα 8,9 Hz

Εικόνα 166: 4η ιδιομορφή στα 9,0076 Hz

Εικόνα 167: 5η ιδιομορφή στα 9,4967 Hz

Εικόνα 168: 6η ιδιομορφή στα 10,007 Hz

Εικόνα 169: 7η ιδιομορφή στα 10,5 Hz

Εικόνα 170: 8η ιδιομορφή στα 10,187 Hz

Εικόνα 171: 9η ιδιομορφή στα 10,723 Hz

Εικόνα 172: 10η ιδιομορφή στα 11,023 Hz

Εικόνα 173: Οι συνολικές μετακινήσεις για τον 1ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 174: Περιοχές αστοχίας για τον 1ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 175 Περιοχές αστοχίας για τον 5ο σεισμικό συνδυασμό

Εικόνα 176 Κύριες ορθές τάσεις στα 20sec

Εικόνα 177 Μετακινήσεις στα 20 sec

Εικόνα 178: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb

Εικόνα 179: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb (με λεπτομέρεια στον βόρειο όγκο)

Εικόνα 180: Δυναμική φασματική απόκριση στο μοντέλο επεμβάσεων

Εικόνα 181: Δυναμική φασματική απόκριση στην υφιστάμενη κατάσταση

Εικόνα 182: Διάγραμμα της FDD [25]

Εικόνα 183: Διάγραμμα της SSI Data [21]

Εικόνα 184: Κάτοψη ισογείου [5]

Εικόνα 185: Κάτοψη ορόφου [5]

Εικόνα 186: Κάτοψη υπογείου [5]

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Θερμοκρασία [71]

Πίνακας 2: Υγρασία [71]

Πίνακας 3: Υετός [71]

Πίνακας 4: Άνεμοι [71]

Πίνακας 5: Τιμές του C_e [75]

Πίνακας 6: Δράσεις κινητών φορτίων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα
EN1991-1-1 [75]

Πίνακας 7 Δεδομένα δημιουργίας φάσματος σχεδιασμού από Ευρωκώδικα 8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

Η προστασία των μνημείων αποτελεί πεδίο επιστημονικής έρευνας και αλληπάλληλο θέμα συζητήσεων καθώς και αντικείμενο εισαγωγής και επεξεργασίας κανονισμών (*Παράρτημα Α'*) για όλες τις ευρωπαϊκές χώρες από τον δέκατο ένατο αιώνα. Τα έργα αποκατάστασης του αρχιτέκτονα Eugène-Emanuel Viollet-le-Duc και οι απόψεις του John Ruskin τον 19^ο αιώνα πρόσφεραν το εναρκτήριο έναυσμα για τις βασικές αρχές της διατήρησης των ιστορικών κατασκευών [3]. Κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, το ενδιαφέρον για τα μνημεία και τις τοπικές παραδόσεις, για την εμφάνιση των ιστορικών πόλεων και των πολιτιστικών αρχών και για την ανάπτυξη και προστασία των αστικών περιοχών από τη μοντέρνα αρχιτεκτονική, ολοένα και αυξανόταν.

Οι ιστορικές κατασκευές αποτελούν σημεία αναφοράς της πολιτιστικής ταυτότητας ενός τόπου. Συμβάλλουν στην αναγνώριση του χαρακτήρα, της ιστορίας και του περιεχομένου μίας παράδοσης, μίας κουλτούρας, μίας αρχιτεκτονικής που είναι αλληλένδετες με τα τοπικά χαρακτηριστικά του τόπου. Αποτελούν την «μνήμη» και τη σύνδεση με το παρελθόν μας, δίνοντας ενδείξεις και πληροφορίες για τις αλλαγές των τοποθεσιών κατά την πάροδο του χρόνου. Είναι μια μοναδική και ιδιαίτερη σφραγίδα στον χρόνο και παράλληλη προοπτική στο μέλλον.

Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητη η διατήρηση, η συντήρηση και η αναπαλαίωση ιστορικών κτιρίων. Σύμφωνα με τους Χάρτες της Βενετίας, εξαιτίας της ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής τους και σημασίας τους, η οποιαδήποτε παρέμβαση και διαχείριση πρέπει να γίνεται με πολύ προσοχή ώστε να είναι αναστρέψιμη, συμβατή με την τοιχοποιία, ανθεκτική, διακριτή και να συνδέεται αρμονικά με το περιβάλλον. [4]

Ως προς την ανθεκτικότητα των μνημείων, τα περισσότερα μνημεία είναι κατασκευασμένα από λίθους και αποτελούνται από φέρουσες τοιχοποιίες. Οι λιθόκτιστες κατασκευές, ειδικότερα αυτές που διαθέτουν και ιστορική

αξία, αποτελούν παγκοσμίως αρχιτεκτονικούς «θησαυρούς» που δεν πρέπει να αλλοιώνονται στον χρόνο ακόμα και αν μεταβληθεί η λειτουργία τους. Ο λίθος έχει αναδειχτεί ως ανθεκτικό υλικό και οι κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία σχεδιάζονται αποκλειστικά για να δέχονται κατακόρυφα φορτία. Η πολυπλοκότητα της ανάλυσης οδήγησε στην ανάγκη χρήσης υπολογιστικών προγραμμάτων και μοντελοποιήσεων.

Παρόλ' αυτά εξαιτίας της μεγάλης σπουδαιότητας των μνημειακών κατασκευών, επισημαίνεται ότι οι μελέτες των ιστορικών κατασκευών πρέπει να προβλέπουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις πιθανές αστοχίες που μπορεί να προκληθούν στο μέλλον. Το γεγονός αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί επιλέγοντας βέλτιστους παραμέτρους για την μοντελοποίηση των κατασκευών στο στάδιο μελέτης τους με υπολογιστικές μεθόδους.

Είναι επίσης απαραίτητο ακόμα και για την εκτίμηση της δομικής επάρκειας των να χρησιμοποιούνται όργανα καταγραφής που δεν παρεμβαίνουν, δεν καταστρέφουν την αντοχή αλλά και την μορφή των τοιχοποιιών ενός ιστορικού κτιρίου. Πρόκειται για κατασκευές ανεκτίμητης αξίας που θα παραμείνουν στην μνήμη των πολιτών μίας χώρας και για αυτό τον λόγο τα περισσότερα δομικά στοιχεία τους πρέπει να παραμένουν αναλλοίωτα μέσα στον χρόνο ώστε οι αξίες και η ιστορικότητά των κατασκευών να μεταδίδονται από γενιά σε γενιά.

1.1. Αντικείμενο

Το κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης διατριβής είναι η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας διερεύνησης της δομικής συμπεριφοράς ιστορικού κτιρίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με την βέλτιστη προσέγγιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του κτιρίου με τις πραγματικές τους τιμές. Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιείται μέσω της συνεχούς αναθεώρησης της σχετικής πληροφορίας που εξάγεται με χρήση μετρητικών συστημάτων ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών αυτών στο πεδίο.

Αναλυτικότερα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που αποτελεί κύριο τμήμα της διπλωματικής εργασίας, θεωρείται ο πλέον αποδεκτός και πιο ακριβής τρόπος προσομοίωσης της λιθόκτιστης κατασκευής με μνημειακό χαρακτήρα. Παρόλ' αυτά η επιλογή των μηχανικών χαρακτηριστικών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι έγκυρης εξαγωγής αποτελεσμάτων της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Συνεπώς η διαδικασία βελτιστοποίησης και ο συνδυασμός πειραματικών μεθόδων με υπολογιστικά μοντέλα είναι σημαντικός έως απαραίτητος για την ακριβή εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών μίας κατασκευής.

Σχετικά με τις πειραματικές μεθόδους, το προηγμένο σύστημα laser για την μέτρηση των μικροδονήσεων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα εργαλεία καταγραφής της ταχύτητας ταλάντωσης του δομικού φορέα ενώ παράλληλα αποτελεί και μη-επεμβατική μέθοδο. Οι μετρήσεις αυτής της πειραματικής εφαρμογής χρησιμοποιούνται στην διαδικασία της βέλτιστης προσομοίωσης του φορέα οδηγώντας σε έγκυρα και ρεαλιστικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά της κατασκευής. Τα συμπεράσματα από όλες τις διαδικασίες αυτές, θα οδηγήσουν στην επιλογή κατάλληλων επεμβάσεων που θα ενισχύσουν την κατασκευή με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

1.2. Στόχος

Η σημασία της ανθεκτικότητας των κτιρίων με ιστορικό χαρακτήρα από φέρουσα τοιχοποιία στην πάροδο των χρόνων και η ανάγκη διατήρησης και αποκατάστασης τους ώστε να συνεχίσουν να αποτελούν την πολιτιστική κληρονομιά μιας χώρας οδηγούν στην απαίτηση η μελέτη τους να γίνεται με τις πιο σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης. Συνεπώς είναι απαραίτητη η όσο τον δυνατόν ρεαλιστικότερη προσομοίωση τους για την μελέτη δομικής αποκατάστασης τους.

Η ρεαλιστικότερη προσομοίωση των κατασκευών αυτών επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής κατάλληλων παραμέτρων. Στην παρούσα διπλωματική, τα κατάλληλα και ακριβή μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών του κτιρίου μελέτης υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης, από την άλλη υλοποιείται με την βοήθεια πειραματικών μεθόδων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα όργανα πειραματικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα επιταχυνσιόμετρα και το σύστημα laser PSV-500H (laser vibrometry) το οποίο καταγράφει την ταχύτητα ταλάντωσης του φορέα. Μέσω της χρήσης του laser vibrometer, επιτυγχάνεται η εμβάθυνση στη διερεύνηση και στη προώθηση προηγμένων τεχνολογιών και εφαρμογών στη διαδικασία μελέτης των ιστορικών κατασκευών. Παράλληλα, πραγματοποιείται προώθηση της χρήσης μη καταστροφικών μεθόδων και ιδιαίτερα της μέτρησης μικροδονήσεων με laser (laser vibrometer) ως μέσο διάγνωσης των δυναμικών χαρακτηριστικών και των φθορών των τοιχοποιιών μίας κατασκευής. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι συμβάλλουν στην έγκυρη προσομοίωση της κατασκευής αποφεύγοντας τη δειγματοληψία και αναδεικνύοντας τον σεβασμό στην αξία του μνημείου.

Συνεπώς, ο τελικός στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών στην εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής και η βελτιστοποίηση της προσομοίωσης του κτιρίου μελέτης με τα πεπερασμένα στοιχεία, μέσω της προσέγγισης των τιμών που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση και τις πραγματικές μετρούμενες

τιμές. Με τη χρήση πειραματικών μεθόδων σε συνδυασμό με την διαδικασία της βελτιστοποίησης πραγματοποιείται γεφύρωση δύο διαφορετικών θεμάτων που αφορούν την υπολογιστική μηχανική και την πειραματική επιστήμη. Συνεπώς, μέσω της μεθοδολογίας που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, δίνεται έναυσμα για μία πιθανή μελλοντική διερεύνηση, εξέλιξη και συνεχή έρευνα πάνω σε μνημειακές κατασκευές, στην ενόργανη παρακολούθησή τους και στην ένταξή τους σε ολοκληρωμένα λογισμικά βελτιστοποιημένης προσομοίωσή τους.

1.3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την διαδικασία εξέλιξης της μεταπτυχιακής διατριβής περιγράφεται παρακάτω. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και αντίστοιχη είναι η διάρθρωση και συγγραφή της παρούσας διατριβής.

ΦΑΣΗ 1^η :Συλλογή στοιχείων

1. Θεωρητικό υπόβαθρο: Στην αρχή της διπλωματικής, γίνεται διερεύνηση βιβλιογραφίας και θεωρητική επισκόπηση σχετικά με τα ερευνητικά πεδία που αφορούν το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Αυτό το βήμα αποτελεί ένα από ένα από τα πιο απαραίτητα βήματα καθώς πραγματοποιείται η κατανόηση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης, των πειραματικών διαδικασιών και των οργάνων που έχουν χρησιμοποιηθεί.

2. Συλλογή απαραίτητων στοιχείων για την τεκμηρίωση της κατασκευής: Αρχικά, παρουσιάζονται τα ιστορικά στοιχεία του κτιρίου, η γενική περιγραφή του, τα κλιματολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Έπειτα υλοποιείται η παρουσίαση και αποτύπωση των φθορών και βλαβών της Πρώην Ιερατικής Σχολής με φωτογραφίες και σχέδια.

ΦΑΣΗ 2^η: Προσομοίωμα της Πρώην Ιερατικής Σχολής

Δημιουργία μοντέλου σε λογισμικό που λειτουργεί με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Comsol Multiphysics [1]): Πραγματοποιείται προσομοίωση της ιστορικής κατασκευής στο λογισμικό COMSOL Multiphysics [1]. Το μοντέλο διαμορφώνεται με βάση ολοκληρωμένα αρχιτεκτονικά σχέδια που έχουν δημιουργηθεί από την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης με επιστημονική υπεύθυνο την Καθηγήτρια Αμαλία Κωτσάκη [5]. Έπειτα, με βάση τις κατάλληλες οριακές συνθήκες και μηχανικές ιδιότητες υλοποιείται στατική και ιδιομορφική ανάλυση, η δυναμική φασματική ανάλυση και η εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής.

ΦΑΣΗ 3^η : Πειραματική εφαρμογή σε συνθήκες εργαστηρίου και στο κτίριο μελέτης

1. Πειραματική εφαρμογή σε συνθήκες εργαστηρίου με το σύστημα laser PSV-500H (laser vibrometry): Για την αποτελεσματικότητα και την εγκυρότητα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης αρχικά επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με το σύστημα laser PSV-500H (laser vibrometry) σε ασβεστολιθικό δοκίμιο στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Αντοχής Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

2. Πειραματική εφαρμογή με το σύστημα laser PSV-500H (laser vibrometry) στο κτίριο μελέτης: Στο κτίριο μελέτης εφαρμόζεται αυτή η πρωτότυπη μέθοδος ανέπαφης και μη καταστρεπτικής πειραματικής αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των ιστορικών κατασκευών. Η χρήση του laser vibrometer επιλέγεται έναντι μεθόδων δειγματοληψίας λαμβάνοντας υπόψη τον σεβασμό στο μνημείο. Έπειτα τα δεδομένα μεταφέρονται σε ειδικό λογισμικό που ονομάζεται ARTeMIS Modal [6] στο οποίο οι μετρήσεις επεξεργάζονται και εξάγονται οι πραγματικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.

Φάση 4^η :Βελτιστοποίηση

1. Βελτιστοποίηση του μοντέλου του δοκιμίου που μελετήθηκε σε συνθήκες εργαστηρίου: Το φάσμα συχνοτήτων που λαμβάνεται από τις μετρήσεις εισάγεται στο λογισμικό COMSOL Multiphysics [1]. το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του δοκιμίου. Έπειτα, με την ενσωματωμένη διαδικασία της βελτιστοποίησης (Optimization) που υπάρχει στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1] και με συγκεκριμένες εξισώσεις, λαμβάνεται μία κοντινή τιμή του μέτρου ελαστικότητας με αυτή που είχε μετρηθεί πειραματικά.

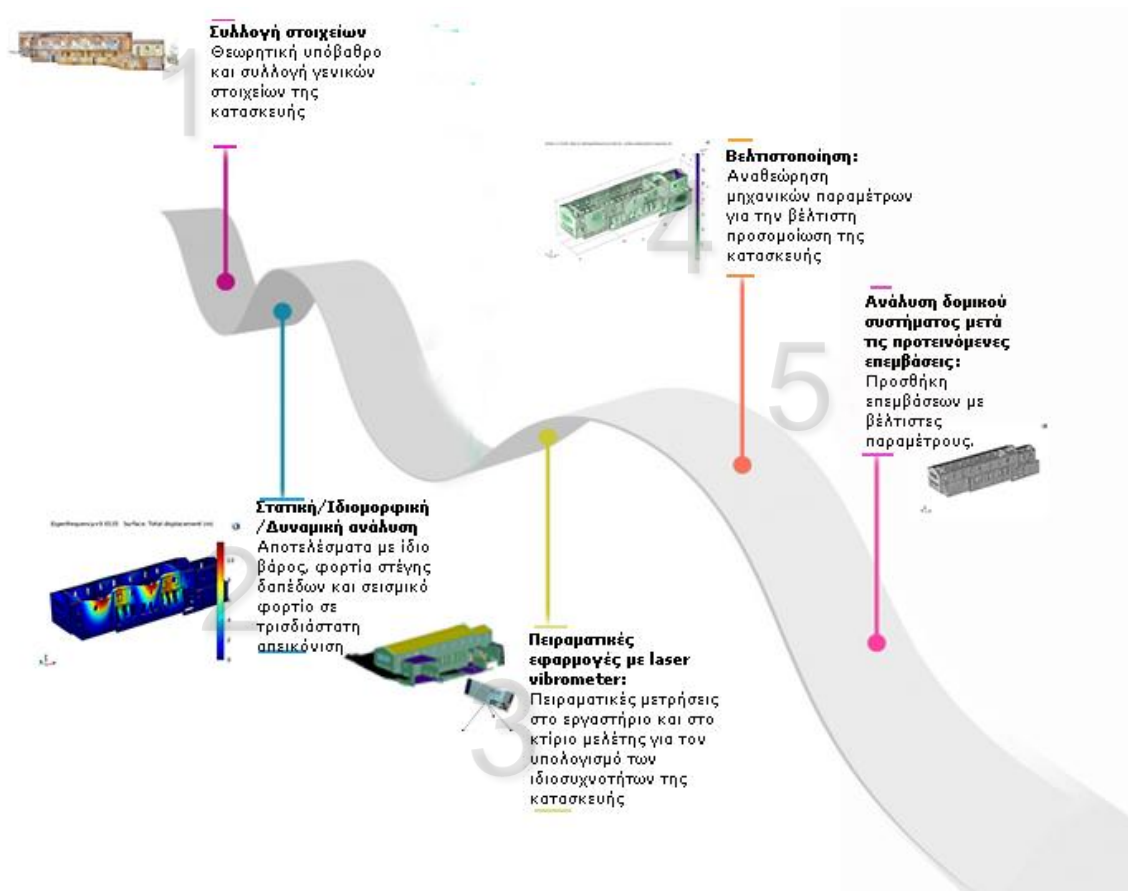
2. Βελτιστοποίηση του μοντέλου του κτιρίου μελέτης στα πεπερασμένα στοιχεία: Πραγματοποιείται αναθεώρηση και προσέγγιση των ιδιοσυχνοτήτων που εξάγονται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με τις ιδιοσυχνότητες που βρέθηκαν από τις μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή

υλοποιηθεί με την βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένων εξισώσεων έπειτα από βιβλιογραφία που οδηγούν στο βέλτιστο μέτρο ελαστικότητας.

3. Επίλυση με τις αναθεωρημένες παραμέτρους από την διαδικασία της βελτιστοποίησης: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με το αναθεωρημένο μοντέλο της κατασκευής. Ακόμη υλοποιείται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων πριν και μετά την βελτιστοποίηση.

ΦΑΣΗ 5^η Επεμβάσεις

Προσθήκη δομικών επεμβάσεων και διερεύνηση της απόκρισης της κατασκευής στην νέα κατάσταση: Η προσομοίωση των επεμβάσεων γίνεται στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1]. Πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αποτελέσματα στην υφιστάμενη κατάσταση. Το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται είναι αυτό που προκύπτει από την διαδικασία της βελτιστοποίησης.



Εικόνα 1: Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας

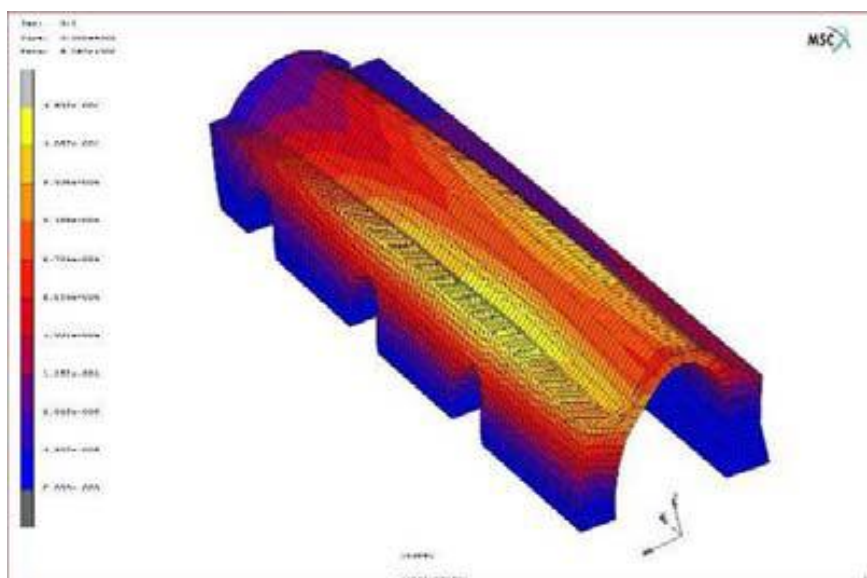
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Θεωρητικό υπόβαθρο

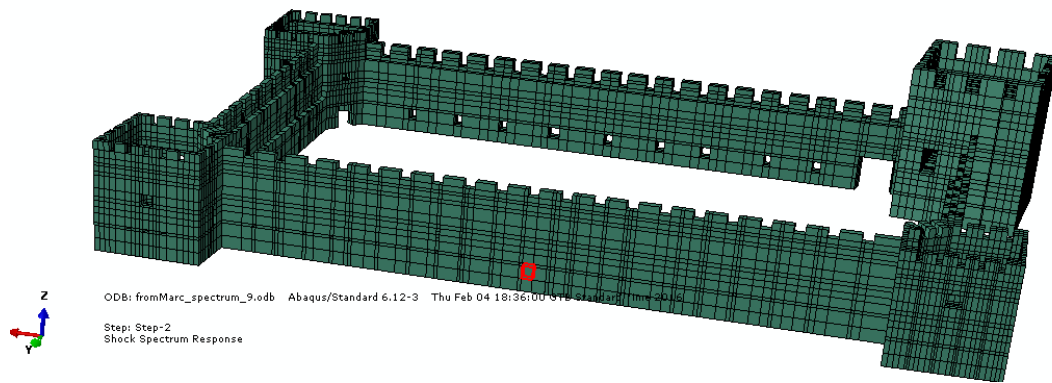
2.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει σημειωθεί ότι τα ιστορικά κτήρια, λόγω της αξίας τους, πρέπει να υφίστανται αποκατάσταση και αναπαλαίωση. Συνεπώς, η συμπεριφορά τους πρέπει να αξιολογηθεί με ακριβείς μηχανικές αναλύσεις των λιθόκτιστων κατασκευών. Έτσι για τον εύρεση των αιτιών δομικών βλαβών [7-10] και για την διεξαγωγή έγκυρων μελετών αποκατάστασης είναι απαραίτητες οι στατικές και δυναμικές αναλύσεις μέσω υπολογιστικών μοντέλων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει την έγκυρη μοντελοποίηση κατασκευών μνημειακού χαρακτήρα εφόσον έχουν σχεδιαστεί με ιδιαίτερη γεωμετρία, δυσκαμψία και μηχανική συμπεριφορά [11-15]. Στις εικόνες 2-3 απεικονίζονται παραδείγματα προσομοίωσης ιστορικών κατασκευών με περίπλοκες γεωμετρίες. Στις προσομοιώσεις αυτές έχει χρησιμοποιηθεί λογισμικό το οποίο λειτουργεί με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 2: Ιδιομορφική ανάλυση για το κτίριο των Ενετικών Νεωρίων στο Ενετικό λιμάνι των Χανίων [16]



Εικόνα 3: Η διακριτοποίηση του μοντέλου του κτιρίου του Φραγκοκάστελου[13]

Πιο αναλυτικά, στην σημερινή εποχή, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FE) έχει γίνει σημαντικό και πρακτικό εργαλείο υπολογιστικής ανάλυσης. Με το εργαλείο αυτό ασχολούνται σχεδόν όλοι οι τομείς που σχετίζονται με τη μηχανική. [17]

Η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) αποτελεί μία υπολογιστική προσέγγιση της συμπεριφοράς των κατασκευών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία. Η προσομοίωση των κτιρίων μπορεί να αναλύεται υπό διαφορετικές καταπονήσεις όπως στατικά και δυναμικά φορτία π.χ. φάσμα σχεδιασμού τους ή σεισμική διέγερση. Ακόμη, δίνει την δυνατότητα για τον λεπτομερειακό σχεδιασμό της κατασκευής ο οποίος είναι σημαντικό προτέρημα για την απεικόνιση μνημείων ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής (πχ. τόξα, θόλοι). [18]

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην θεωρία ότι η κατασκευή υποδιαιρείται σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (finite elements). Το κάθε στοιχείο μπορεί να προσομοιώνεται με διαφορετικό υλικό ενώ οι κοινοί κόμβοι (nodes) που δημιουργούνται αυτόματα είναι οι συνδετικοί κρίκοι τους. Η προσομοίωση της κατασκευής μπορεί να γίνει με γραμμικούς, επιφανειακούς, χωρικούς φορείς ή και συνδυαστικά, για οποιαδήποτε φόρτιση, γεωμετρία και συνοριακή συνθήκη. Αποτελεί ένα ενιαίο εργαλείο στατικής και δυναμικής, γραμμικής και μη γραμμικής μελέτης της κατασκευής. [19,20]

Το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η ταλάντωση ενός φορέα αποτελείται από έναν καθορισμένο αριθμό παραμέτρων ταλάντωσης, που αντιστοιχούν σε βαθμούς ελευθερίας κινήσεων των κόμβων δημιουργώντας την ελαστική διακριτοποίηση. Οι παράμετροι που επιλέγονται πρέπει να αποδίδουν όσο το δυνατόν καλύτερο την πραγματική συμπεριφορά του φορέα της κατασκευής. [20]

Η παραμόρφωση ενός φορέα εξαρτάται από την αδράνεια (μάζα), το μέτρο ελαστικότητάς του, την απόσβεση, τις συνοριακές συνθήκες και τα εξωτερικά φορτία ή αίτια που ασκούνται για την περιοδική ή μη περιοδική ταλάντωση του φορέα. [20]

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία, σύμφωνα με τους Leftheris B.P. et al [12] οι κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία προσομοιώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια με δισδιάστατα ή τρισδιάστατα μοντέλα σε σύγκριση με πλαισιακά μοντέλα και απλοποιητικές παραδοχές διαφραγματικής λειτουργίας πλακών. Παρόλα αυτά, αν και η μέθοδος των πεπερασμένων συμβάλει στην ακριβή εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας, διαχειρίζεται με δυσκολία την ανάλυση πραγματικών και μεγάλης κλίμακας κατασκευών λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους που απαιτείται.[18] .

2.2. Βελτιστοποίηση

Η προσομοίωση μιας κατασκευής με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων συνήθως υλοποιείται με υπολογιστικές προσεγγίσεις και μοντέλα που μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν ρεαλιστικά την δομή με όλες τις λεπτομέρειες της και συνεπώς να εμφανίζονται διαφορές από το πραγματικό αποτέλεσμα. Αυτές οι διαφορές προέρχονται από τις προσεγγίσεις και τις απλοποιήσεις στην δομική γεωμετρία, στην ποικιλία των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών καθώς και σε ανακριβείς οριακές συνθήκες. Συχνά, λοιπόν, είναι απαραίτητη η αναθεώρηση των αβέβαιων παραμέτρων της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία οδηγώντας σε καλύτερα αποτελέσματα [17].

Η προσέγγιση υπολογιστικών αποτελεσμάτων με πραγματικές μετρήσεις στο πεδίο είναι μια διαδικασία που εάν οι παράμετροι αβεβαιότητας διαμορφωθούν στο αρχικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα τότε είναι ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο [17].

Τα τρία βήματα της βελτιστοποίησης, λοιπόν, είναι η εισαγωγή μίας σχέσης (objective function) σε οποιοδήποτε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που θα πραγματοποιεί τον συσχετισμό πειραματικών με υπολογιστικών αποτελεσμάτων επιλέγοντας παραμέτρους ανάλογα με την κρίση του χρήστη όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας των υλικών. Με την βοήθεια ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται ένα μοντέλο που ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα. [17]

Η βελτιστοποίηση ή αλλιώς optimization ξεκίνησε την δεκαετία του 1980 να παίζει σημαντικό ρόλο ιδιαίτερα στο επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού, στον σχεδιασμό, στην ανάλυση και στην διατήρηση κατασκευών. [22] Μπορεί κανείς εύκολα να αναγνωρίσει την εφαρμογή της σε υφιστάμενες κατασκευές όταν είναι αναγκαία η εκτίμηση της συμπεριφοράς του κτιρίου υπό σεισμική καταπόνηση και η αναγνώριση βλαβών λόγω της μείωσης της ακαμψίας της κατασκευής. Ακόμη αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για την διαχείριση, την εξέλιξη και την αξιολόγηση της κατάστασης της κατασκευής.[17] Σύμφωνα με τους Girardi

et al [22] πρόσφατα η εφαρμογή της διαδικασίας έχει επεκταθεί και στα ιστορικά μνημεία εφόσον κατά την ιδιομορφική ανάλυση λαμβάνεται η υπόθεση ότι τα υλικά συμπεριφέρονται ελαστικά γραμμικά παρά το γεγονός ότι ο λίθος αποτελεί το υλικό του φέροντα οργανισμού των περισσότερων ιστορικών κατασκευών. Συνεπώς υπάρχουν αρκετές εφαρμογές της διαδικασίας όπως στο καμπαναριό του Lucca στην Ιταλία. [22]

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εκτελείται με μεθόδους δοκιμής και λάθους (trial-and-error) δηλαδή αντίστροφο πρόβλημα μέχρι να προσεγγιστούν ή να διορθωθούν οι παράμετροι ευαισθησίας που έχουν τεθεί από τον χρήστη. Οι μέθοδοι ή οι αλγόριθμοι διακρίνονται σε απευθείας και επαναληπτικοί. Οι απευθείας μέθοδοι όπως αναφέρεται και από τους Ribeiro et al [23] *«αναθεωρούν τα υλικά της ευκαμψίας και της μάζας με ένα βήμα»*. Αντίστοιχα, οι επαναληπτικές μέθοδοι συνδέονται με αντικειμενικές συναρτήσεις (objective functions) που βελτιώνονται βήμα βήμα μέχρι να φτάσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα προσέγγισης των πειραματικών με των υπολογιστικών παραμέτρων [23]. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πιο ευέλικτη καθώς αντιπροσωπεύει τις φυσικές ιδιότητες του ρεαλιστικού μοντέλου κατασκευής.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η διαδικασία της βελτιστοποίησης επιλύθηκε με την μέθοδο Monte Carlo [24]. Σύμφωνα με τους Luengo et al [24] η συγκεκριμένη μέθοδος *«αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό τεχνικών στοχαστικής προσομοίωσης που προχωρούν με αρκετές δυννητικές επιθυμητές παραμέτρους αντικαθιστώντας και ενοποιώντας δείγματα μέσου όρου»*. Η διαδικασία που ακολουθείται για την επιλογή των τιμών είναι πραγματοποιείται είτε με την φυσική αντιγραφή του *«επιθυμητού πειράματος»* είτε *«πιθανολογικά»* δημιουργώντας ένα σύνολο τυχαίων τιμών. [24]

Συμπερασματικά, στην εξίσωση που χρησιμοποιείται για το κτίριο μελέτης λαμβάνονται υπόψη μόνο τα σφάλματα των ιδιοσυχνοτήτων και η εξίσωση είναι η εξής: [21]

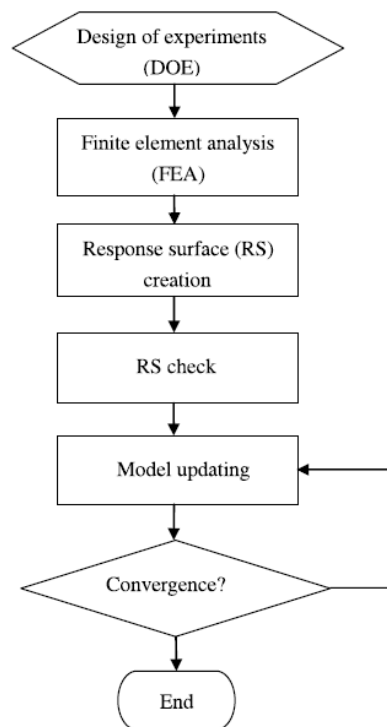
$$H_{(k)} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{f_{i,n} - f_{i,e}}{f_{i,e}} \right)^2 \quad \text{σχ. 1}$$

k = αριθμός των ιδιοσυχνοτήτων

f_{in} =υπολογιστική ιδιοσυχνότητα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

f_{ie} = πειραματική ιδιοσυχνότητα

Ένα διάγραμμα βελτιστοποίησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4).



Εικόνα 4: Παράδειγμα διαγραμματικής απεικόνισης της βελτιστοποίησης [17]

2.3. Ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας (Operational Modal Analysis)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την ακριβέστερη εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής και ακολούθως την βέλτιστη μοντελοποίηση της κατασκευής επιλέχθηκε η πειραματική ιδιομορφική ανάλυση (EMA). Σύμφωνα με τους Anguilar et al [25], η επί τόπου μέτρηση της συμπεριφοράς των κτιρίων έχει ως στόχο την εύρεση των δυναμικών μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Αυτά τα μηχανικά χαρακτηριστικά θα χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για την έγκυρη επεξεργασία υπολογιστικών μοντέλων με πεπερασμένα στοιχεία οδηγώντας τόσο στον καλύτερο έλεγχο και στην κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής όσο και στην επαρκή αναγνώριση των υφιστάμενων ή επερχόμενων δομικών βλαβών. [25]

Οι Farror and Worden [26] αναφέρουν ότι η πειραματική ιδιομορφική ταυτότητα των κατασκευών ξεκίνησε στην αρχές της δεκαετίας του 1980. Οι μηχανικοί αποφάσισαν να αναγνωρίσουν πειραματικά τις σχετικές μηχανικές ιδιότητες των κατασκευών λόγω της αυξανόμενης συνθετότητας των κατασκευών. [27] Σύμφωνα με τους Anguilar et al [25] οι πειραματικές μελέτες ξεκίνησαν από μεγάλα εύκαμπτα κτίρια όπως γέφυρες και ψηλά κτίρια.

Εξαιτίας της αποτελεσματικότητας της πειραματικής διαδικασίας, οι εφαρμογές εξαπλώθηκαν και στον τομέα των αποκαταστάσεων ιστορικών κτιρίων κυρίως λιθόκτιστων ή από οπτόπλινθο όπως *«εκκλησίες και συναγωγές [28-31] , κάστρα [32-35], τοξωτές γέφυρες [36] και μιναρέδες [37]. [25]*

Σύμφωνα με τους Anguilar et al [25] η πειραματική ιδιομορφική ανάλυση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: στην Input – Output Modal Analysis (FRF) και Output- Only Modal Analysis (OMA). Η FRF εκτελείται (input) σε συγκεκριμένη συχνότητα (output) χρησιμοποιώντας εργαλεία διέγερσης όπως το σφυράκι και εφαρμόζεται σε μικρές κατασκευές, απαιτείται ακριβός εξοπλισμός και έμπειρο προσωπικό. [21]

Η Operational Modal Analysis (OMA) ή αλλιώς Ιδιομορφική Ανάλυση σε κατάσταση Λειτουργίας βασίζεται μόνο στα περιβαλλοντικά ατμοσφαιρικά αίτια (πχ. άνεμος, κύματα θάλασσας, διέλευση αεροπλάνου) και οι κατασκευές διεγείρονται στις συχνότητες αυτών των αιτιών. [26] Τα πλεονεκτήματα της OMA είναι ότι αποτελεί μία οικονομική και γρήγορη διαδικασία εφόσον δεν χρειάζεται διεγέρτης όπως στην περίπτωση της FRF ή συνοριακές συνθήκες για την προσομοίωση [27]. Ακόμη μπορεί να ανταποκριθεί και σε περίπλοκες κατασκευές. Τέλος, η μέθοδος αυτή καταλήγει σε ιδιομορφές οι οποίες μπορούν να προσεγγιστούν με τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης που εξάγονται από τη μοντελοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία και να αναγνωριστούν ακριβώς οι θέσεις των δομικών βλαβών [27]..

Παρόλα τα πλεονεκτήματα όμως, η διαδικασία της OMA εμφανίζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, η κατασκευή μπορεί να βρίσκεται σε πολύ επιβαρυμένα περιβάλλοντα με αρκετές πηγές - θορύβους. Σε τέτοια περιβάλλοντα υπάρχει ανάγκη για ακρίβεια και έλεγχο των δεδομένων των μετρήσεων αλλά και των αλγορίθμων διεξαγωγής αποτελεσμάτων. Ακόμη, κατά την διαδικασία της OMA δύσκολα αναγνωρίζονται ιδιομορφές σε πολύ κοντινά χωρικά περιβάλλοντα. [38]

Συνεπώς οι απαιτούμενες συνθήκες για την OMA είναι ότι οι μετρήσεις πρέπει να είναι χρονικά αμετάβλητες με μικρή απόσβεση. Επίσης, πρέπει εύκολα να διαχωρίζονται οι ιδιοσυχνότητες μεταξύ τους και οι πηγές θορύβου να είναι στατικές [39]

Σύμφωνα με τους Lacanna et al [21] η συνηθέστερη διαδικασία που έχουν ακολουθήσει αρκετές βιβλιογραφίες με την βοήθεια της OMA ξεκινάει με την διέγερση της κατασκευής από ατμοσφαιρικούς παράγοντες, την ταυτοποίηση των ιδιομορφών και το φάσμα σχεδιασμού της κατασκευής, την μοντελοποίηση της κατασκευής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και τέλος την αναγνώριση των αβέβαιων παραμέτρων.

Σύμφωνα με τις εφαρμογές της OMA από βιβλιογραφίες μέχρι και των τελευταίων χρόνων, μπορεί κανείς εύκολα να αντιληφθεί ότι είναι μία διαδικασία σημαντικά χρήσιμη: [21]

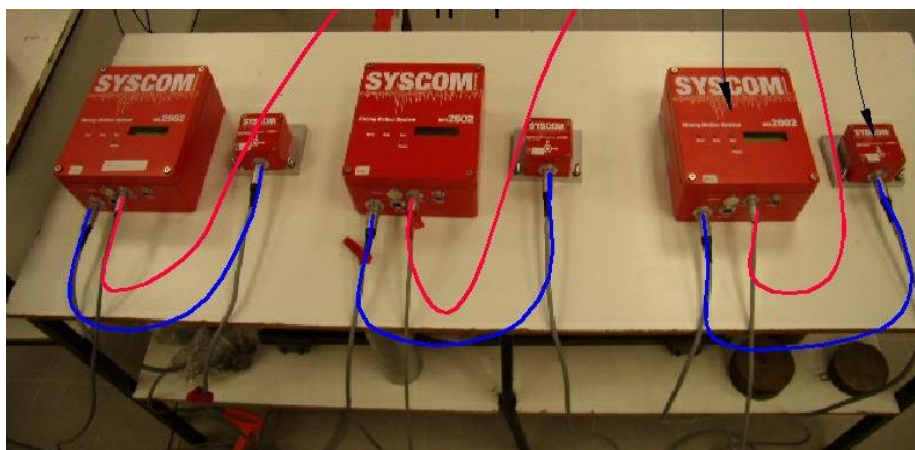
- για την αξιολόγηση των βλαβών [40,41,42]
- για την αξιολόγηση της σεισμικής ανθεκτικότητας [43,44]
- για την «αξιολόγηση και την παρακολούθηση της κατάστασης της κατασκευής» [45,46,47,48]
- για την βελτιστοποίηση του μοντέλου της κατασκευής και την ταυτοποίησή του [49, 50, 51, 52, 53]
- για την αξιολόγηση των επιπτώσεων αιώρησης καμπάνας [54,55]
- για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μετασκευής [56]

Ακόμη, σύμφωνα με τους Anguilar et al [25] δεν υπάρχει κάποια μεθοδολογία που ακολουθείται για κάθε περιοχή μελέτης. Η συγκεκριμένη διαδικασία, εξαρτάται από τον «*περιβαλλοντικό θόρυβο, τα χαρακτηριστικά της ίδιας της κατασκευής, την ποιότητα των υπολογιστικών συστημάτων και την εμπειρία του προσωπικού*». [25]

Κατά τους Cunha et al [57] η OMA διαχωρίζεται σε δύο μεθόδους οι οποίες θα αναλυθούν περισσότερο στο Παράρτημα Β':[25]

- Μη παραμετρικές για κάθε φάσμα συχνοτήτων («*Peak Picking, Frequency Domain Decomposition FDD, Enhanced Frequency Domain Decomposition EFDD, Kandom Decrement, PolyMol*»)
- Παραμετρικές για κάθε χρονοϊστορία («*Stochastic Subspace Identification SSI , Least Square Complex Experimental, Ibrahim Time Domain*»)

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την διαδικασία της OMA είναι το σύστημα επιταχυνσιομέτρων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 5), τα οποία παρέχουν στους μηχανικούς τα κατάλληλα δεδομένα για τα πειράματα. Σύμφωνα με τους Anguilar et al [25] γίνεται χρήση οργάνων υψηλής ανάλυσης και ευαισθησίας που έχουν επεξεργάσιμο εύρος συχνοτήτων και μετρήσεων. [25]



Εικόνα 5: Σύστημα επιταχυνσιομέτρων

Συμπερασματικά, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης μικρών, μεγάλων και περίπλοκων κατασκευών (FEM) και τα μοντέλα που διεξάγονται από αυτά μπορούν εύκολα να βελτιστοποιηθούν χάρη της διαδικασίας της OMA. Συνεπώς η ταλάντωση σε συνθήκες φυσιολογικές, χωρίς συγκεκριμένες διεγέρσεις συνδυαστικά με την βελτιστοποίηση του μοντέλου μπορούν να θεωρηθούν ένα έγκυρο εργαλείο μη καταστροφικής μεθόδου για την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων και κυρίως ιστορικών κατασκευών. [27]

Ακόμη σύμφωνα με τους Rainieri και Fabbrocino [27] οι βελτιστοποιημένες προσομοιώσεις κατασκευών σε πεπερασμένα στοιχεία και οι αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά μπορούν να βοηθήσουν στην κατασκευαστική επεξεργασία και στην αναγνώριση δομικών βλαβών. Ακόμη αναφέρουν ότι οι διαδικασίες της προσομοίωσης και των πειραματικών μεθόδων όταν εκτελούνται ταυτόχρονα μπορούν να ωφελήσουν στην αξιολόγηση σεισμικών μέτρων αντιμετώπισης, στην λήψη αξιόπιστων προτάσεων για την αντισεισμική προστασία των ιστορικών κατασκευών καθώς και τον έλεγχο της κατάστασής τους σε επόμενα σεισμικά γεγονότα. [27]

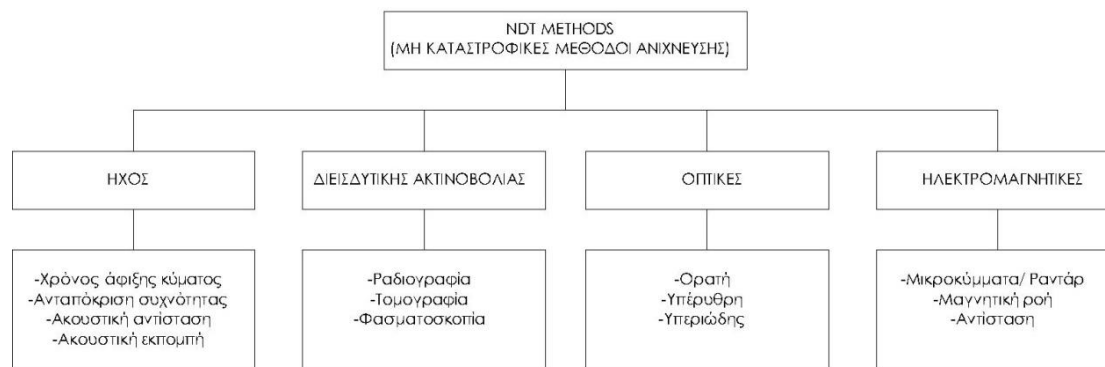
2.4. Μη καταστροφικές τεχνικές

Η σημασία των ιστορικών κτιρίων, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, είναι πολύ μεγάλη εφόσον η υπόστασή τους επηρεάζει την πολιτιστική, κοινωνική και οικονομική ζωή μιας χώρας. Με την πάροδο των χρόνων, όμως, τα υλικά της κατασκευής τους φθείρονται γι' αυτό και είναι αναγκαία η ασφάλειά τους. [58] Η αξιολόγηση της ανθεκτικότητάς τους αποτελεί μία περίπλοκη διαδικασία εφόσον λεπτομέρειες για την κατασκευαστική συμπεριφορά των περισσότερων κτιρίων είναι δύσκολο να βρεθούν. [58]

Σύμφωνα με τον Menendez [59], τα βήματα αποκατάστασης διακρίνονται σε τρία βήματα: αναγνώριση (anamnesis), διάγνωση (diagnosis) και θεραπευτικά μέτρα (therapeutical steps). Η anamnesis αποτελείται από την αναγνώριση του ιστορικού κτιρίου, τη χωρική και ιστορική αποτύπωση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κατά τη διαδικασία της diagnosis αναγνωρίζονται τα υλικά της κατασκευής, οι μηχανικές τους ιδιότητες και ο βαθμός βλάβης τους. Το τρίτο βήμα, περιέχει τις δοκιμές, τις εφαρμογές για τα προτεινόμενα μέτρα προστασίας του μνημείου και την μακροχρόνια παρακολούθηση για την διατήρηση του κτιρίου. [59]

Οι δοκιμές για το τρίτο βήμα μπορούν να πραγματοποιηθούν με δοκιμές τύπου δειγματοληψίας σε εργαστηριακό επίπεδο αλλά και με μη καταστροφικές τεχνικές στο πεδίο της κατασκευής. [59] Η μέθοδος πυρηνοληψίας, για παράδειγμα, αποτελεί μία τεχνική εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών του μνημείου πολύωρη ως διαδικασία και κυρίως αρκετά παρεμβατική για το μνημείο εξαιτίας της διόγκωσης των ρωγμών και της αλλοίωσης του χρώματος του δομικού υλικού. [60]. Οι μη καταστροφικές τεχνικές (εικόνα 6), από την άλλη, μπορούν να παρέχουν αρκετές και απαραίτητες πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες του κτιρίου, την τάση και την παραμόρφωση, την εσωτερική κατάσταση των τοιχοποιιών και γενικότερα την καθολική συμπεριφορά της κατασκευής. [58,59] Ταυτόχρονα δεν αποτελούν παρεμβατικές μέθοδοι για την κατασκευή καθώς δεν αλλοιώνουν την αισθητική και την μορφή του κτιρίου. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών οι οποίες θα αναλυθούν και

παρακάτω είναι η μέθοδος έρευνας με υπερήχους, η μέθοδος των ακτίνων-Χ, η μέθοδος του γεωραντάρ, η θερμογραφία και η μέθοδος πειραματικών μετρήσεων με δημιουργία και ανίχνευση ακουστικών κυμάτων (εικόνα 6) [61].



Εικόνα 6 Μη καταστροφικές τεχνικές [60]

Η χρήση των μη καταστροφικών τεχνικών στα μνημεία πραγματοποιείται εδώ και αρκετό καιρό. Για παράδειγμα, για την μέτρηση της υδροαπορροφητικότητας των υλικών της κατασκευής στα μέσα του 19^{ου} αιώνα χρησιμοποιούνταν η «*Kursten tube*», η οποία λειτουργούσε με μη καταστροφική τεχνική. Οι γεωφυσικές μη καταστροφικές τεχνικές (θερμογραφία, ultrasonic και ακουστική τομογραφία, impact echo) παρουσιάστηκαν την ίδια περίοδο, ξεκίνησαν να εφαρμόζονται εργαστηριακά για τον χαρακτηρισμό του πορώδους του υλικού και έπειτα σε in situ εφαρμογές. Αυτές οι τεχνικές, αντίστοιχα, εφαρμόστηκαν στα μνημεία πρώτα σε εργαστήρια και μετά στο πεδίο. [59]

Οι επί το πεδίο μη καταστροφικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για τους εξής λόγους: [59]

- Για την εύρεση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής
- Για την αναγνώριση των περιβαλλοντικών συνθηκών
- Για την παρακολούθηση της κατάστασης των κατασκευών των ιδιοτήτων των υλικών τους και των βλαβών

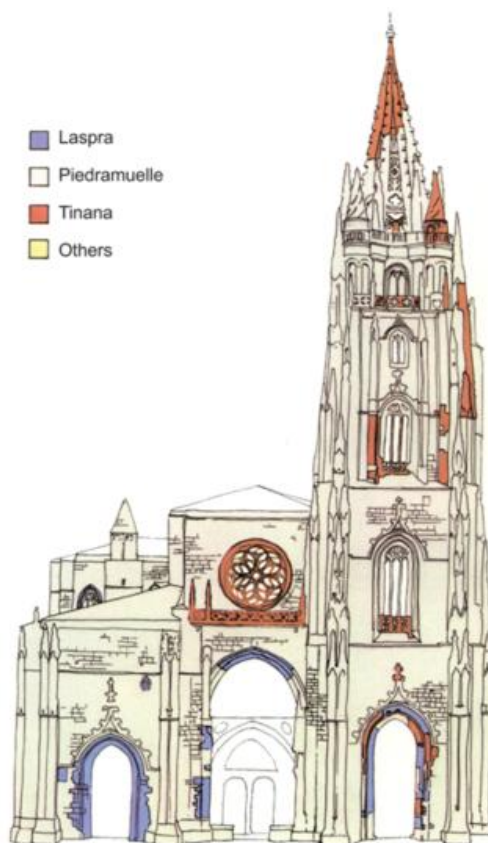
Παρακάτω ακολουθούν παραδείγματα μη καταστροφικών τεχνικών (Non Destructive Techniques – NDT): [59]

1) Οπτικός έλεγχος και χαρτογράφηση

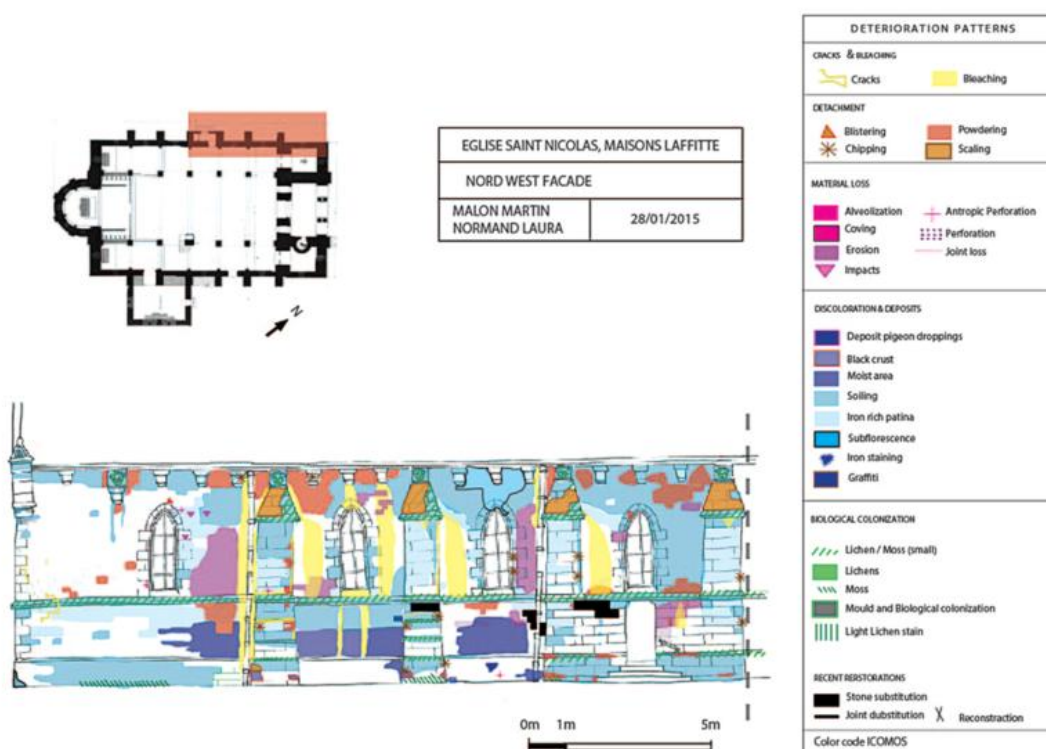
Ο οπτικός έλεγχος είναι μία προκαταρκτική διαδικασία που συνήθως διεξάγεται στην αρχή της διαδικασίας αποκατάστασης ενός κτιρίου για την γεωμετρική αποτύπωση και την αποτύπωση των φθορών. Ο κάθε μελετητής κατά την διαδικασία του οπτικού ελέγχου παρατηρεί με γυμνό μάτι την κατάσταση της κατασκευής, τις περιβαλλοντικές βλάβες που μπορεί να προκληθούν από ανερχόμενη υγρασία ή τις δομικές βλάβες με την παρουσίαση ρωγμών. Πρόκειται για μία μη ενδεδειγμένη διαδικασία καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη το εσωτερικό τμήμα των τοιχοποιιών του κτιρίου. [59]

Μία άλλη τεχνική οπτικού ελέγχου είναι με την βοήθεια φωτογραφικής μηχανής κατά την οποία η παρατήρηση μπορεί να ποιοτικοποιηθεί και έπειτα να αποτυπωθεί σε αρχιτεκτονικά σχέδια (εικόνα 7 ,8). [59]

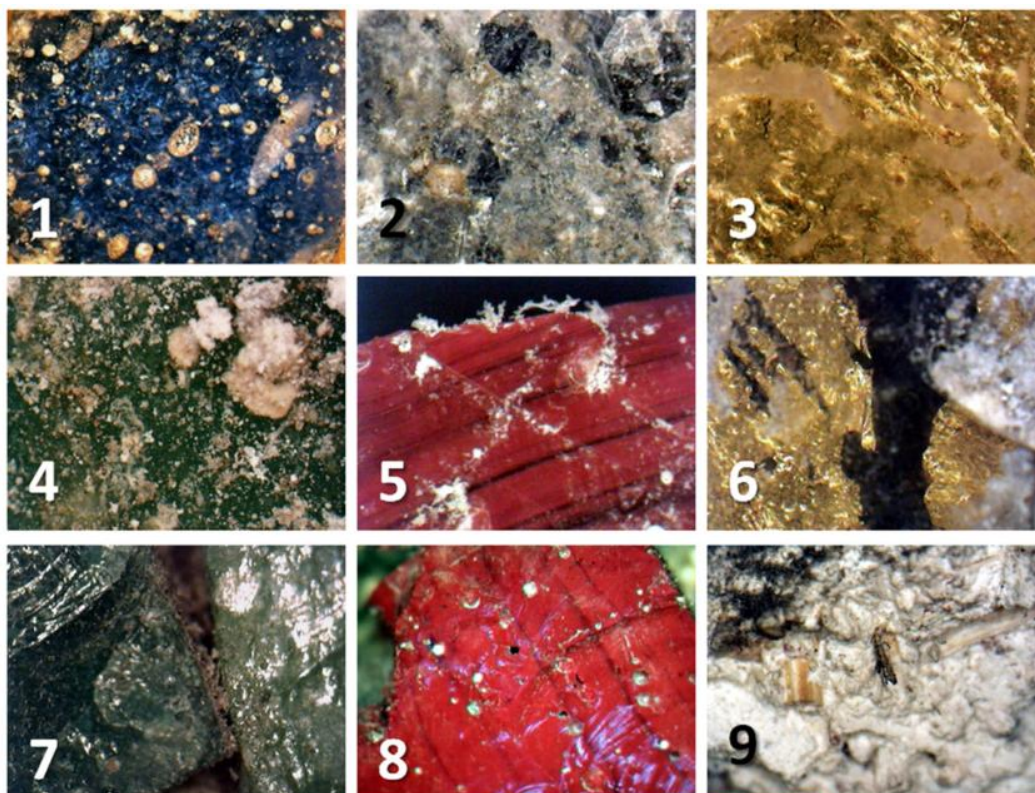
Η τεχνική οπτικής παρατήρησης βασίζεται στο μικροσκόπιο οπτικών ινών (FOM) όπου με τη βοήθεια οπτικών ινών συλλέγονται, επί το πεδίο, εικόνες της κατασκευής (εικόνα 9). Έτσι με εικόνες υψηλής ανάλυσης είναι εύκολο να αποτυπωθεί η μορφή του υλικού της κατασκευής, οι δομικές βλάβες και οι επεμβάσεις. [59]



Εικόνα 7: Παράδειγμα φωτογραφικής αποτύπωσης στον Καθεδρικό Ναό της πόλης Οβιένο, Ισπανία [59]



Εικόνα 8: Χαρτογράφηση περιβαλλοντικών φθορών στην Εκκλησία του Αγίου Νικολάου στην πόλη Maisons-Laffitte (Γαλλία) [59]

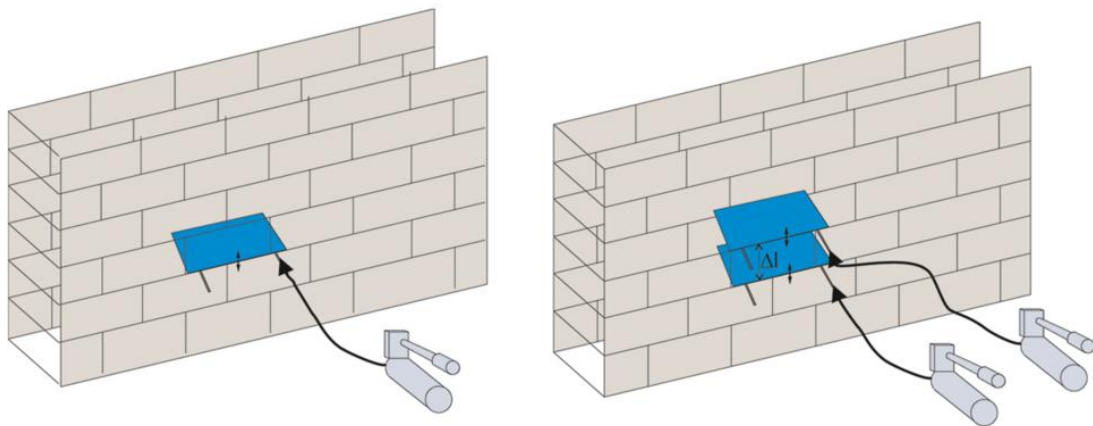


Εικόνα 9: Εικόνες FOM [59]

Μία τεχνική μοντελοποίησης της κατασκευής με μη καταστροφικούς ελέγχους είναι η φωτογραμμετρία. Κατά τη διαδικασία αυτή, λαμβάνονται από φωτογραφική μηχανή υψηλής ανάλυσης αρκετές αλληπάλληλες φωτογραφίες σε μικρή απόσταση από το κτίριο κι από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Με την εισαγωγή τους σε πρόγραμμα είναι εφικτή η τρισδιάστατη μοντελοποίηση της κατασκευής. Η πλέον διαδεδομένη τεχνική είναι η αεροφωτογραμμετρία η οποία διεξάγεται με την χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones). Το πιο σύγχρονο εργαλείο χαρτογράφησης και μοντελοποίησης είναι το terrestrial laser scanning, το οποίο όπως και το laser vibrometer που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική, με μία δέσμη λέιζερ που ακτινοβολεί το συγκεκριμένο όργανο επιτυγχάνεται γρήγορο σκανάρισμα του κτιρίου μελέτης αποτυπώνοντας τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές κλίμακες αντικαθιστώντας την φωτογραφική μηχανή. [59]

2) Μέτρηση της τάσης σε μια τοιχοποιία

Η μέτρηση της τάσης σε μια τοιχοποιία μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με την τεχνική "flat jack test". Αποτελεί ελάχιστα καταστροφική τεχνική καθώς αφαιρείται σε κάποια σημεία το κονίαμα ώστε να τοποθετηθεί το "flat jack" το οποίο συμμετέχει στην αύξηση της τάσης μέχρις ότου επανέλθει η αρχική κατάσταση των δύο προσόψεων των τοιχοποιιών. Η τάση που αναπτύσσεται έως ότου η επιτευχθεί η διαδικασία είναι ίση με την συνολική τάση της τοιχοποιίας. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση δύο παράλληλων flat jack (εικόνα 10).. Εφαρμόζοντας αυξανόμενη τάση και καταγράφοντας την «προκαλούμενη παραμόρφωση» είναι εφικτή η δημιουργία του διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης. Μετά την αφαίρεση των πλακών, τα κενά γεμίζονται με το υφιστάμενο κονίαμα. [59]



Εικόνα 10: Εφαρμογή flat jack [59]

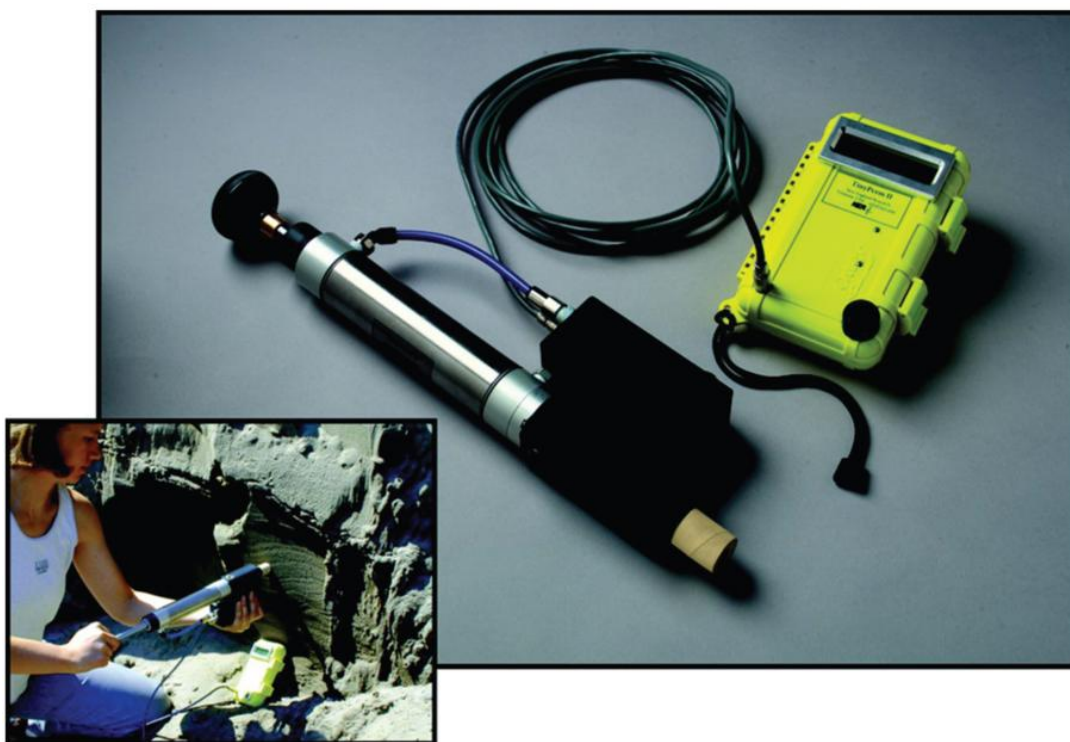
3) Μέτρηση της παραμόρφωσης σε μια κατασκευή

Ο υπολογισμός της παραμόρφωσης μίας τοιχοποιίας πραγματοποιείται με τα εξής μη καταστροφικά όργανα: επιμηκυσιομέτρα, κλισίμετρο, παχύμετρα και μορφομετατροπείς. Τα συστήματα αυτά μετράνε αποστάσεις και μετακινήσεις της τοιχοποιίας με στατική ή δυναμική φόρτιση. Η μέτρηση με στατικά φορτία υπολογίζεται από τα θεμέλια του εδάφους (soil settlement) και τις διαφορές της θερμοκρασίας. Οι πηγές φόρτισης για την δυναμική ανάλυση είναι οι ταλαντώσεις που προκαλούνται από εξωτερικά περιβαλλοντικά αίτια όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση της

Ιδιομορφική ανάλυσης σε κατάσταση λειτουργίας (Operational Modal Analysis). Το φάσμα σχεδιασμού των υλικών το οποίο είναι και το χαρακτηριστικό για την τοπική και καθολική συμπεριφορά της κατασκευής, αποτελεί και το αποτέλεσμα αυτών των φορτίσεων ενώ παράλληλα καταγράφεται από ένα σύστημα επιταχυνσιομέτρων. [59]

4) Μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών των δομικών υλικών της τοιχοποιίας

Για την **μέτρηση της διαπερατότητας** της τοιχοποιίας ως μη καταστροφική τεχνική χρησιμοποιούνται τα διαπερατόμετρα (εικόνα 11). Τα διαπερατόμετρα αυτά τοποθετούνται σε προεξοχές βράχων και στους πυρήνες. Η λειτουργία τους είναι να δημιουργούν ένα κενό στην επιφάνεια της πέτρας και να δημιουργείτε ένας «θάλαμος» στον οποίο μεταφέρεται αέρας από τον λίθο. Η πίεση του αέρα υπολογίζεται σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ από την ένταση του αέρα εκτιμάται η διαπερατότητα. [59]



Εικόνα 11: Διαπερατόμετρο [59]

Ένα άλλο όργανο χρησιμοποιείται για τον **υπολογισμό της υγρασίας** και της ποσότητας νερού που περιέχεται εσωτερικά της τοιχοποιίας. Τα

όργανα αυτά είναι το «*pin meters*», «*pin less meters*» ή ηλεκτρομαγνητικά μετροκύματα (εικόνα 12). [59]



Εικόνα 12: Όργανο μέτρησης της υγρασίας [59]

Επίσης το σπεκτροχρωμομετρο χρησιμοποιείται για την **μέτρηση της αλλαγής του χρώματος** και την θερμογραφία. [59]

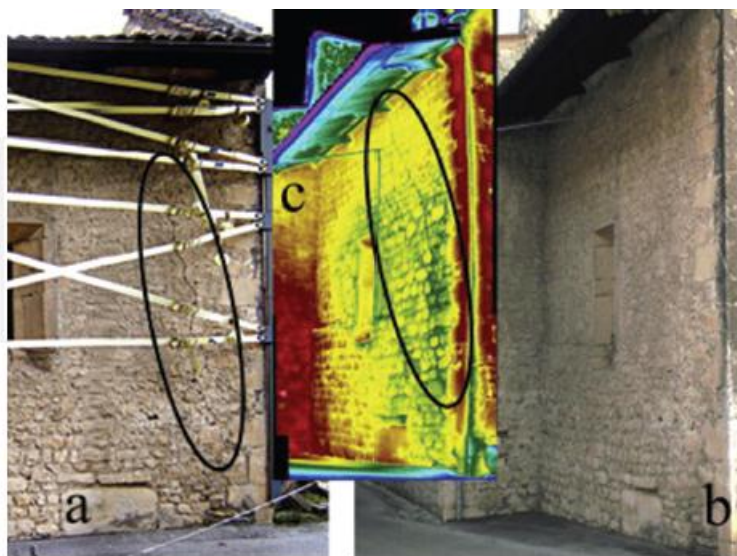
5) Θερμογραφία

Η θερμογραφία αποτελεί μία ενδεδειγμένη τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου. Η χρήσεις της είναι πολλές και ιδιαίτερα στο πεδίο των αρχιτεκτόνων και πολιτικών μηχανικών. Αρκετά συχνά χρησιμοποιείται ως εργαλείο διάγνωσης, διατήρησης και αξιολόγησης των αποκαταστάσεων ιστορικών κτιρίων. Η διαδικασία της θερμογραφίας διεξάγεται με ειδικές κάμερες (θερμοκάμερες) οι οποίες αποτελούνται από ένα συγκεκριμένο εύρος μήκος κύματος, διαφορετικά είδη φακών και λειτουργίες δεδομένων. Ένα μειονέκτημα μπορεί να είναι το περιορισμένο βάθος διεξόδου. [59]

Η συγκεκριμένη κάμερα λαμβάνει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται και ανακλάται από την επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Η έγχρωμη εικόνα είναι το αποτέλεσμα του ηλεκτρικού σήματος αφού μετατραπεί από ηλεκτρομαγνητικό σήμα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται το μήκος κύματος και μεταδίδεται στην θερμοκρασία της επιφάνειας. Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα φτάνει στην κάμερα ανάλογα με την μεταδοτικότητα του υλικού (ικανότητα του υλικού να εκπέμπει ενέργεια), το χρώμα της επιφάνειας, τις αντανakλάσεις σε μεταλλικές και γυάλινες επιφάνειες, τις μετεωρολογικές συνθήκες και την απόσταση της επιφάνειας από την κάμερα. Το κάθε υλικό αποτελείται από διαφορετική

θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα και πυκνότητα. Για αυτούς τους λόγους η κάμερα λαμβάνει διαφορετικές θερμοκρασίες σε κάθε υλικό. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία της θερμοκάμερας είναι οι σωστές προδιαγραφές της και η βαθμονόμησή της χωρίς περεταίρω μετρήσεις. [59]

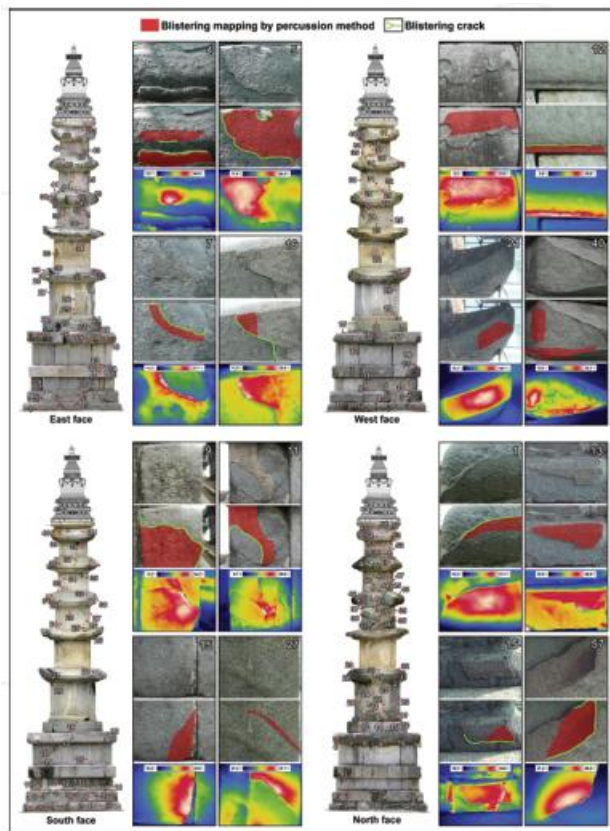
Σύμφωνα με Menendez B. [59] η θερμογραφία έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές για την προστασία ιστορικών κτιρίων για τον εντοπισμό οπής, της θέσης αποκόλλησης επιχρίσματος, της ανάπτυξης υγρασίας, και της γήρανσης υλικού, της εμφάνισης ρωγμών (εικόνα 13) ή μικροοργανισμών και για την αξιολόγηση των υλικών αποκατάστασης και διαφορετικών ειδών κονιαμάτων. Η θερμογραφία είναι μία τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί από απόσταση από την επιφάνεια των τοίχων και σε δυσπρόσιτα σημεία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής είναι η μελέτη και το επίπεδο υγρασίας και αποκόλλησης χρώματος από έργα τέχνης και τοιχογραφίες. [59]



Εικόνα 13: Παθητική θερμογραφία που εφαρμόζεται για την αναγνώριση των ρωγμών σε τοιχοποιία στην εκκλησία στην Sant Maria ad Cryptas (Ιταλία) (α) μετά τον σεισμό του 2009 (b) το 2007, (c) μετά το 2007 [59]

Οι δύο μέθοδοι θερμοκάμερας που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των ιστορικών κτιρίων είναι η παθητική και ενεργητική θερμογραφία. Και οι δυο μέθοδοι απαιτούν αλλαγή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η παθητική θερμογραφία χρησιμοποιεί τη παθητική θέρμανση ή ψύξη με την ηλιακή ενέργεια σε αντίθεση με την ενεργητική θερμογραφία όπου χρησιμοποιείται μία εξωτερική πηγή ως πηγή θέρμανσης και ψύξης. Η παθητική θερμογραφία, ακόμη, χρησιμοποιείται σε μεγάλες

περιοχές μελέτης ως πιο ποιοτική μέθοδος ενώ η ενεργητική θερμογραφία εφαρμόζεται σε μικρές περιοχές μελέτης και υπολογίζονται ορισμένες παράμετροι (εικόνα 14). [59]



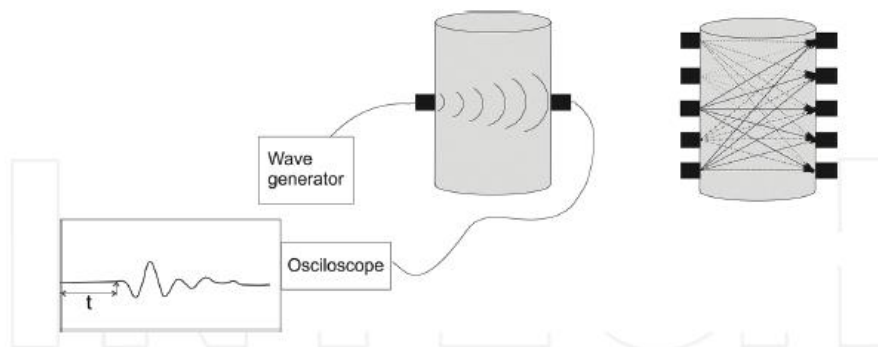
Εικόνα 14. Ενεργητική θερμογραφία η οποία εφαρμόζεται σε pagoda Magoksa Temple (Korea) [59]

6) Ακουστικές μέθοδοι

Ακουστικές τεχνικές εφαρμόζονται εδώ και αρκετά χρόνια σε ιστορικά κτίρια ως κατεξοχήν μη παρεμβατική μέθοδος. Το χτύπημα μιας επιφάνειας με μία «φάλαγγα δακτύλου (*finger phalange*)» ή το σύρσιμο μίας αλυσίδας αποτελούν παλιές ακουστικές μέθοδοι οι οποίες ηχογραφούνται και αναλύονται με ηλεκτρονικές συσκευές ώστε να αναλυθούν οι εκπεμπόμενοι ήχοι και τελικά ο χρήστης να κατανοήσει εάν έχει αποκολληθεί το επίχρισμα από την τοιχοποιία. Σε μία άλλη ακουστική τεχνική χρησιμοποιείται ένα μεγάφωνο το οποίο τοποθετείται σε επαφή με το υπό μελέτης έργο τέχνης ή την πλίνθινη τοιχοποιία και ένα μικρόφωνο το οποίο αποδέχεται τα εκπεμπόμενα ηχητικά κύματα. [59]

Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης του ηχητικού κύματος είναι και η πιο διαδεδομένη τεχνική που εφαρμόζεται στα ιστορικά κτίρια και υπολογίζεται

με την απόσταση μεταξύ της πηγής ήχου και δέκτη και τον χρόνο διάδοσης του κύματος. Οι πηγές ηχητικών κυμάτων συνήθως είναι μία ηχητική κρούση συχνότητας γύρω στα 5Hz ή ένας πιεζοηλεκτρικός υπερηχητικός πομπός υψηλότερης συχνότητας από 20kHz. Ο δέκτης είναι ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο το οποίο μετατρέπει την ταλάντωση σε ηλεκτρικό σήμα. Με το σήμα αυτό μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια ή άλλοι παράμετροι οι οποίοι δείχνουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού (εικόνα 15). [59]



Εικόνα 15: Σύστημα μέτρησης πλάτους κύματος για την ακουστική τομογραφία [59]

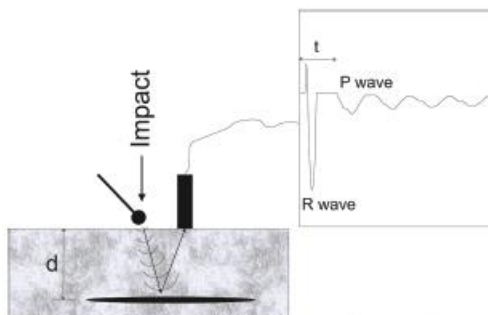
Με όσο το δυνατόν περισσότερες μετρήσεις για διαφορετικές πορείες των ηχητικών κυμάτων όπως φαίνονται και στην παραπάνω εικόνα μπορεί να δημιουργηθεί η ηχητική και υπερηχητική τομογραφία του υλικού (εικόνα 16). Η τομογραφία απεικονίζει την κατανομή του πλάτους των ηχητικών κυμάτων εσωτερικά του υλικού μελέτης είτε σε δισδιάστατη είτε σε τρισδιάστατη μορφή. [59]



Εικόνα 16: Τρισδιάστατη τομογραφία του αγάλματος της Ελεονόρα Αρραγκόνα [59]

7) Impact echo

Μία ακόμα μη καταστροφική τεχνική εύρεσης των μηχανικών χαρακτηριστικών ενός υλικού είναι η Impact echo. Αυτή η τεχνική βασίζεται στην άμεση διάδοση ηχητικών κυμάτων (περίπου 2-50kHz) στην τοιχοποιία τα οποία αντανακλώνται από εσωτερικές ασυνέχειες (ρωγμές, αποκολλήσεις, οπλισμένες κατασκευές). Αυτή η αντανάκλαση οφείλεται στο γεγονός ότι για κάθε ασυνέχεια δημιουργείται διαφορετικό ηχητικό κύμα και φάσμα συχνοτήτων. Η μέθοδος αυτή ξεκίνησε από κατασκευές με σκυρόδεμα εξερευνώντας αν υπάρχουν ασυνέχειες στο εσωτερικό του υλικού υπολογίζοντας το μέγεθος και το βάθος των ασυνεχειών. Κατά τη διαδικασία της μεθόδου αυτής καταγράφονται τα ηχητικά κύματα και υπολογίζεται το φάσμα συχνοτήτων. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι είναι αναγκαίος μόνο ένας μορφοτροπέας (transducer). Από την άλλη πλευρά, όμως, το μειονέκτημά της είναι ότι απαιτούνται αρκετές μετρήσεις ενώ παράλληλα δεν δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των διαστάσεων της ασυνέχειας η οποία γεμίζει με νερό. Στην εικόνα 17 φαίνεται η εφαρμογή της μεθόδου αυτής. [59]

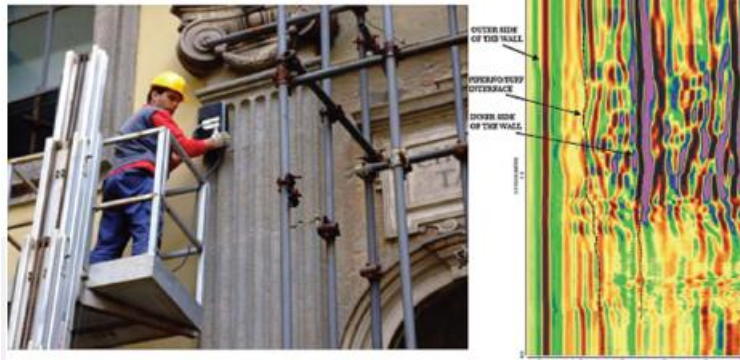


Εικόνα 17: Σύστημα Impact Echo [55]

8) GPR

Ένα άλλο όργανο μη καταστροφικής τεχνικής που χρησιμοποιείται κυρίως στους γεωφυσικούς τομείς είναι το ground penetrating radar και η διαφορά με τις υπόλοιπες τεχνικές είναι ότι το όργανο αυτό καταγράφει ηλεκτρομαγνητικά κύματα και όχι ηχητικά (εικόνα 18). Κατά τη διάρκεια αυτής της τεχνικής, η κεραία λήψης εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα (συχνότητα 500–2500 MHz) ενώ συνήθως κινείται ταυτόχρονα με τον πομπό. Ο πομπός τοποθετείται στην μία μεριά του αντικειμένου ενώ οι δύο κεραίες τοποθετούνται μαζί στην αντίθετη επιφάνεια. Αυτή η μέθοδος είναι

λιγότερο κοινή και γενικά χρησιμοποιείται μόνο για τη μέτρηση της ταχύτητας του σήματος και τη βαθμονόμηση της δοκιμής. [59]



Εικόνα 18: Εφαρμογή του ραντάρ στο μνημείο Monte de Pieta(Νάπολη, Ιταλία) [59]

2.5. Laser Scanning Vibrometer (SLDV)

Το laser scanning vibrometer, αρχικά, βασίζεται στο φαινόμενο Doppler. Σύμφωνα με την Μουστεράκη [60], *«το φαινόμενο Doppler πήρε το όνομά του από τον Αυστριακό φυσικό Christian Doppler το 1842»*. Βασίζεται στο γεγονός που εξελίσσεται όταν ένας παρατηρητής βρίσκεται σε σχετική κίνηση ταυτόχρονα με μία πηγή που εκπέμπει κύματα και οι συχνότητες των δύο αυτών είναι ίση. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί κανείς να το συναντήσει σε μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά κύματα ενώ χρησιμοποιείται σε αρκετούς επιστημονικούς και τεχνικούς τομείς με σκοπό την μέτρηση της ταχύτητας των κινούμενων αντικειμένων, των μορίων ή αντικειμένων του γαλαξία. [60]

Η ταχύτητα του κύματος που μπορεί κανείς να αντιληφθεί εξαρτάται από *«τις θέσεις της πηγής και του παρατηρητή»*. Στα ηχητικά κύματα είναι αναγκαίος και ο προσδιορισμός του μέσου διάδοσης του κύματος. Συνεπώς, το φαινόμενο Doppler καταλήγει σε αποτελέσματα σχετικά με *«την κίνηση του παρατηρητή, της πηγής και του μέσου διάδοσης»*. [60]

Σύμφωνα με την Μουστεράκη [60], αναφέρεται ότι ένας σημαντικός κανόνας σε σχέση με το φαινόμενο Doppler είναι το γεγονός ότι όσο μειώνεται η απόσταση του παρατηρητή από την πηγή αυξάνεται η συχνότητα του σήματος που εκπέμπεται και αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής ενώ όσο αυξάνεται η απόστασή τους μειώνεται και η συχνότητα αυτή. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η φορά της κίνησης του παρατηρητή είναι σύμφωνα με το μέσο διάδοσης ανεξάρτητα με το γεγονός αν απομακρύνεται ή όχι. Το φαινόμενο Doppler εφαρμόζεται σε αρκετά επιστημονικά πεδία, όπως για την μέτρηση της ταχύτητας των αυτοκινήτων από την αστυνομία, στην αστρονομία, στην ιατρική και σε άλλα πεδία. [60]

Το σύστημα laser Doppler Vibrometry (LDV) αποτελεί μία μη επεμβατική ιδιαίτερα χρήσιμη μέθοδο αξιολόγησης της ακεραιότητας επιφανειών ιδιαίτερα για τις ιστορικές κατασκευές και τα μνημεία στα οποία η

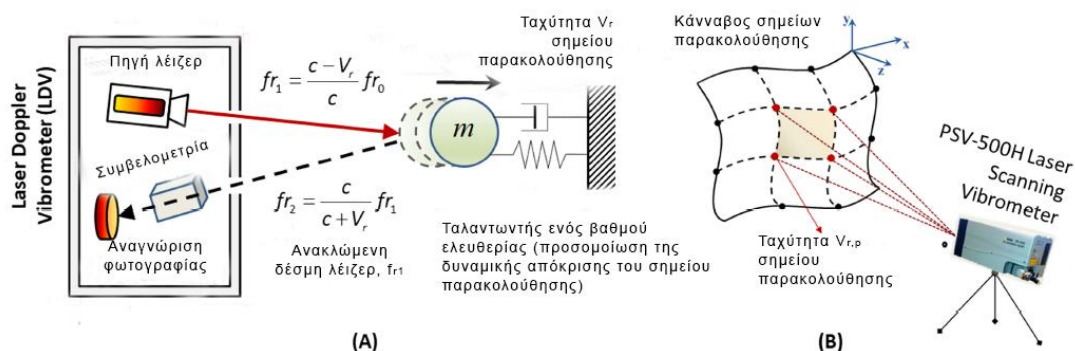
οποιαδήποτε επέμβαση δεν πρέπει να είναι παρεμβατική. Αποτελεί ακόμη μία μη καταστροφική τεχνική ανίχνευσης δονήσεων κατά την οποία το laser vibrometer εκπέμπει ακτίνα laser η οποία μεταφέρεται στην επιφάνεια του αντικειμένου μελέτης. Από την «μετατόπιση Doppler της συχνότητας της ακτίνας laser» υπολογίζεται το πλάτος και η συχνότητα της ταλάντωσης. [60]

Ιστορικά, το laser vibrometer ανακαλύφθηκε από τους Yeh and Cummins στο Πανεπιστήμιο του Κολούμπια το 1964 .[62]

Η μέθοδος της Σάρωσης Δονήσεων με Laser (Laser Scanning Vibrometry-LSV) είναι η εξέλιξη του συστήματος laser Doppler vibrometry (LDV) και θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για το έλεγχο της μηχανικής συμπεριφοράς του κτιρίου και την βελτιστοποίηση του μοντέλου της κατασκευής. [63] Ονομάζεται Laser Scanning Vibrometer γιατί παράλληλα με τις μετρήσεις της ταχύτητας γίνεται και σκανάρισμα της επιφάνειας αντικειμένου σε προκαθορισμένα σημεία της επιφάνειας.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 19) απεικονίζονται οι βασικές αρχές που βασίζεται το LDV. Με την παρακάτω εξίσωση υπολογίζεται η ταχύτητα ταλάντωσης: [63]

$$V_{r,p} = \frac{1}{2}f_r = \frac{1}{2}(f_{r2} - f_{r0}), p = 1:N_p$$



Εικόνα 19: Οι αρχές του laser vibrometer [63]

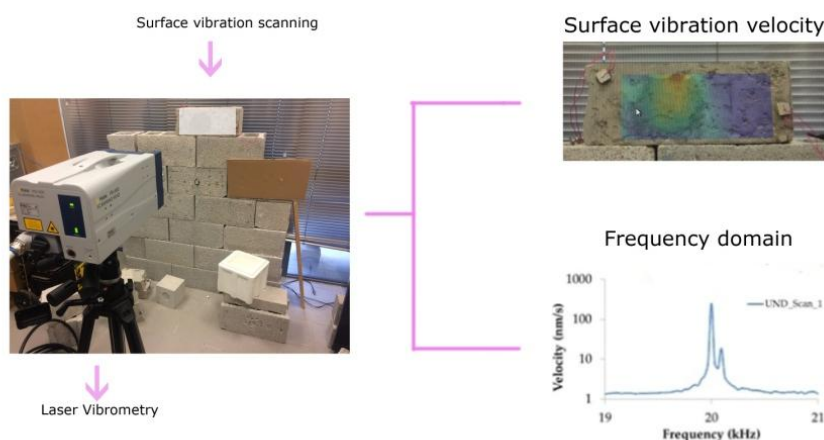
Οι μεταβλητές που φαίνονται στην εικόνα ήταν οι εξής: [63]

- Λ = μήκος κύματος της δέσμης laser
- f_{r0} = αρχική συχνότητα δέσμης laser
- f_{r2} = συχνότητα δέσμης laser μετά την αλλαγή της συχνότητας με το φαινόμενο Doppler
- f_{r1} = ανακλώμενη δέσμη laser
- N_p = ο αριθμός των σημείων παρακολούθησης
- c = ταχύτητα της δέσμης laser, η οποία είναι ίση με την ταχύτητα φωτός

Η τεχνική αυτή βασίστηκε στην αντικατάσταση των ανθρώπινων αισθήσεων και αισθητήρων επαφής με συστήματα μέτρησης απομακρυσμένης προσέγγισης του αντικειμένου μελέτης. Το laser vibrometer σαρώνει το αντικείμενο ενώ ταλαντώνεται είτε με τεχνητά μέσα όπως μηχανικά και ακουστικά είτε από περιβαλλοντικούς παράγοντες (Operational Modal Analysis) όπως πραγματοποιείται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Με το όργανο αυτό υπολογίζονται επιφανειακές ταχύτητες οι οποίες απεικονίζονται σε δισδιάστατους και τρισδιάστατους χάρτες. Στην εφαρμογή της μεθοδολογίας έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή της ταχύτητας μεταβάλλεται και παρουσιάζεται αρκετά αυξημένη όπου υπάρχει κάποια ασυνέχεια (ρηγμάτωση, αποκόλληση) ή ύπαρξη βλάβης. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, το laser vibrometer, θα χρησιμοποιηθεί για εργαλείο εύρεσης των βέλτιστων μηχανικών παραμέτρων της κατασκευής μέσω της προσέγγισης των δυναμικών χαρακτηριστικών (συχνοτήτων όπου υπάρχει μεταβολή της ταχύτητας). Συνεπώς, τα αποτελέσματα που εξάγονται από το laser vibrometer συνοπτικά είναι η επιφανειακή ταχύτητα ταλάντωσης, τα φάσματα απόκρισης και οι χρονοϊστορίες της ταχύτητας κάθε σημείου. [60]

Στην εικόνα 20 φαίνεται ένα παράδειγμα ελέγχου αποκόλλησης κονιάματος σε ένα δοκίμιο με τη βοήθεια του laser vibrometer. Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Πολυτεχνείου Κρήτης της Αρχιτεκτονικής Σχολής στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος, το οποίο ακόμα δεν έχει δημοσιευτεί. Στην εικόνα

παρουσιάζεται η διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις με το laser vibrometer.



Εικόνα 20: Πειραματική διάταξη του laser vibrometer με την διαδικασία διεξαγωγής φάσματος συχνοτήτων

Αναλυτικότερα, το βασικό πλεονέκτημα του laser vibrometer είναι ο απομακρυσμένος έλεγχος μετρήσεων με ακρίβεια χωρίς καταστρεπτικό και επεμβατικό χαρακτήρα. Στοχεύει δέσμη laser και προσδιορίζει την ταχύτητα στην επιθυμητή θέση του κάθε σημείου. Ακόμη μπορεί να μετρήσει γρήγορα την ταχύτητα ταλάντωσης σε κινούμενα ή περιστρεφόμενα αντικείμενα αλλά και πολλά σημεία χάρη στην ευκολία του χειρισμού της δέσμης laser. Οι γωνίες σάρωσης και χωρικών συντεταγμένων συνδέονται μεταξύ τους με «εξισώσεις μη γραμμικών συστημάτων». Ο υπολογισμός αυτών των εξισώσεων πραγματοποιείται με τη «μέθοδο παλινδρόμησης των ελαχίστων τετραγώνων». Η διαχείριση των αποτελεσμάτων γίνεται από προγράμματα σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. [60]

Εκτός από πλεονεκτήματα, όμως, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα όπως το γεγονός το laser πρέπει να στοχεύει σε επιφάνεια αντικειμένου στην οποία τουλάχιστον το 10% της προσπίπτουσας ακτίνας να ανακλάται πίσω στο laser. Σε διαφορετική περίπτωση η μέτρηση του πλάτους και της φάσης της ταχύτητας ταλάντωσης της κατασκευής δεν θα είναι σωστή. Ακόμη θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανάγκη τοποθέτησης μόνωσης του εξοπλισμού από ταλαντώσεις που δημιουργούνται από εξωτερικό θόρυβο. [61]

Το πεδίο εφαρμογών του laser vibrometer εκτός από την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής ή δομικών στοιχείων της, μπορεί να είναι η μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς και δομικής ακεραιότητας μεταλλικών δομικών στοιχείων όπως είναι οι πλάκες και οι δοκοί, στοιχεία περιστρεφόμενης μηχανής και φτερά αεροσκαφών. [63]

Η διαδικασία που ακολουθείται από το laser vibrometer αρχικά ξεκινάει με το στήσιμο του οργάνου. Ο έλεγχος του οργάνου πραγματοποιείται με την ρύθμιση του «*σαρωτή*». Το «*γαλβανομετρικό σήμα εντολών*» αποτελείται από τις τιμές αναγνώρισης των παραμέτρων μετατροπής των «*οπτικών γωνιών και τάσεων*». Έπειτα πραγματοποιείται ο καθορισμός της «*θέσης της κεφαλής του laser vibrometer, του προσανατολισμού του και των μητρών μετασχηματισμού μεταξύ του laser και του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων*». Αυτό πετυχαίνεται εάν σημαδευτούν τρία ή περισσότερα σημεία ώστε να καταγραφούν «*οι γωνίες σάρωσης*» από την ακτίνα laser. Η εξαγωγή των μητρών μετασχηματισμού επιτυγχάνεται με την συμβολή αλγορίθμων. [60]

Μετά την στόχευση της δέσμης laser στο επιθυμητό σημείο, δημιουργείται ένας **κάναβος σημείων ή αλλιώς χάρτης σημείων** που απεικονίζονται οι **επιφανειακές ταχύτητες** ταλάντωσης. Οι περιοχές που παρουσιάζονται στον χάρτη με την μεγαλύτερη ταχύτητα είναι οι ελαττωματικές περιοχές. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, θεωρούνται ελαττωματικές περιοχές γιατί είτε έχει αποκολληθεί το κονίαμα, είτε έχει προστεθεί κάποιο πρόσθετο υλικό, είτε έχει δημιουργηθεί ρηγμάτωση. [60]

Σύμφωνα με την Μουστεράκη [60], τα όργανα που εκπέμπουν δέσμη laser, ακόμα κι αν έχουν αρκετά υψηλό κόστος, υπερτερούν από αυτά που περιέχουν οπτικούς αισθητήρες όπως οι υπέρυθρες θερμικές κάμερες, οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως, καθώς έχουν ιδιαίτερα υψηλή ευαισθησία και προσφέρουν λεπτομερή δεδομένα για τον χώρο, τον χρόνο και τη συχνότητα. [60]

Το laser vibrometer, ακόμη έχει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά όργανα υπολογισμού των μηχανικών παραμέτρων μίας

κατασκευής όπως τα επιταχυνσιόμετρα καθώς βασίζεται στην ανέπαφη μετάδοση ταχυτήτων και στην αυξημένη ακρίβεια μετρήσεων που βασίζεται στην *«αρχή μέτρησης της συχνότητας Doppler μιας ακτίνας laser που διασπάται από έναν κινούμενο στόχο με τα μέσα της συμβολομετρίας (Interferometry).»*[60]

Αναλυτικότερα, όπως αναφέρθηκε ήδη, οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια μελέτης δημιουργούν *«μετατόπιση της συχνότητας Doppler στην προσπίπτουσα ακτίνα laser»*. Η σύνδεση μεταξύ των τιμών της συχνότητας με αυτών της ταχύτητας υλοποιείται εφόσον η μετατόπιση κατά τη διεύθυνση της ακτίνας laser είναι *«γραμμικά συνδεδεμένη με την συνιστώσα της ταχύτητας»*. [60,64]

Για την αναγνώριση των περιοχών που υπάρχουν βλάβες, σημαντική διαδικασία είναι *«η ανάλυση των σημάτων που συλλέγονται από την επιφάνεια του δείγματος»*. Η διαδικασία *«RMS (Root Mean Square)»* συμβάλλει στην διεξαγωγή μέσων τιμών της *«επιφανειακής ταχύτητας»* κάθε σημείου του κανάβου της επιφάνειας μελέτης ενώ η *«ανάλυση Fourier (FFT)»* διεξάγει το φάσμα συχνοτήτων για κάθε σημείο. Με την βοήθεια των δύο προηγούμενων αναλύσεων μαζί με την διαδικασία Lock-in (ή αλλιώς FastScan) λαμβάνονται οι χρωματικοί χάρτες σε σχέση με το εύρος και το φάσμα ανάλογα με μία μόνο συχνότητα διέγερσης. [60]

Συμπερασματικά, σύμφωνα με την Μουστεράκη [60], τα συνολικά πλεονεκτήματα στην εφαρμογή του laser vibrometer είναι τα εξής:

- μη καταστρεπτική και μη επεμβατική λειτουργία,
- ανέπαφη εφαρμογή
- φορητότητα
- μείωση της ανάγκης δειγματοληψίας
- εφαρμογή σε σαθρές και ανώμαλες επιφάνειες
- δεν απαιτείται η προετοιμασία της επιφάνειας
- κατάλληλο για όλες τις κλίμακες έργου
- φιλικό προς χρήση
- ασφαλής πηγή ακτινοβολίας και ενέργειας

Κεφάλαιο 3

Γενικές πληροφορίες του κτιρίου μελέτης

3.1. Ιστορικά αναδρομή της Πρώην Ιερατικής Σχολής

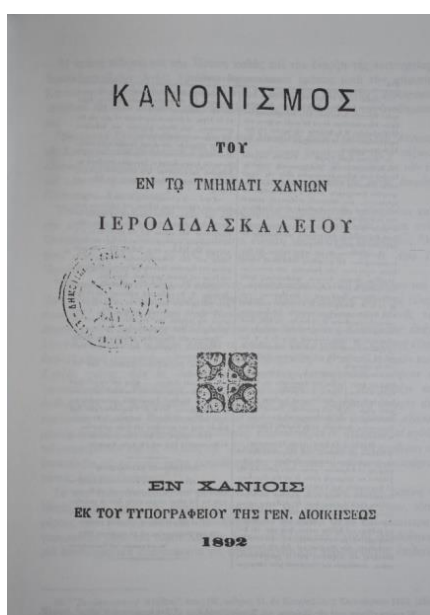
Το κτίριο της Πρώην Ιερατικής Σχολής, στην Ιερά Μονή των Τζαγκαρόλων, έχει μεγάλη ιστορική αξία καθώς ήταν το πρώτο πανεπιστήμιο της Κρήτης που συνδεόταν με την ιστορία της Εκκλησίας της Κρήτης *«του τέλους του 19^{ου} αιώνα και των αρχών του 20^{ου} αιώνα»*. [65]

Η λειτουργία της Ιερατικής Σχολής ξεκίνησε το 1892 στην Ιερά Μονή της Αγίας Τριάδας και τελείωσε το 1974. Ο επίσκοπος Κισσάμου και Σελίνου Γεράσιμος Στρατηγάκης εμπνεύστηκε την ιδέα ανέγερσης κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας ενώ παράλληλα άφησε 30.000 χρυσά γρόσια στην μυστική του διαθήκη για την ίδρυση του Ιερατικής Σχολής το οποίο ονομαζόταν Ιεραδιδασκαλείο (εικόνα 21). Ο Θεοφιλεστάτος Επίσκοπος Κυδωνίας και Αποκορώνου Νικηφόρος Ζαχαριάδης ανέλαβε έπειτα να υλοποιήσει την ιδέα του Στρατηγάκη με την πραγματοποίηση της πρώτης συνεδρίασης για την ανέγερση του Ιεραδιδασκαλείου στις 25 Αυγούστου 1892. [65]

Την εποχή που ιδρύθηκε το Ιεραδιδασκαλείο, οι τοπικές εφημερίδες καταγράφουν το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του λαού για την ανέγερση αυτού αναφέροντας ότι *«το ενδιαφέρον του λαού ολόκληρου υπέρ του Ιεραδιδασκαλείου»* ακόμα και *«πάντες οι επιστήμονες»*. [65]



Εικόνα 21 «Η πρώτη σφραγίδα του Ιεραδιδασκαλείου» [65]



Εικόνα 22: «Ο “ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ” του Ιεραδιδασκαλείου» [65]

Στην αρχή της τελευταίας Κρητικής Επανάστασης του 1895-1897, επιλέχθηκε από τους υπεύθυνους της τότε Εφορίας, η Ιερά Μονή Αγίας Τριάδας Ακρωτηρίου ως ασφαλές μέρος για εκπαιδευτήριο ενώ πιο πριν στεγαζόταν στον σημερινό χώρο του Αγίου Ματθαίου. Για την ομαλή λειτουργία του, συνέβαλαν το τότε Ηγουμενοσυμβούλιο με ειδική «Πράξη» (εικόνα 22), ο Ελευθέριος Βενιζέλος καθώς και ολόκληρη η κοινωνία των Χανιών.

[65]

Στα πρώτα χρόνια λειτουργίας της Σχολής (1892-1897), οι αίθουσες και η διαμονή των μαθητών του Ιεραδιδασκαλείου πραγματοποιούνταν σε όλο το

κτιριακό συγκρότημα της Μονής ενώ οι μοναχοί είχαν μετακομίσει σε εξωτερικά κελιά. Για τις αυξανόμενες ανάγκες, είχαν κατασκευαστεί ακόμα πέντε δωμάτια. Ωστόσο, στην Επανάσταση του 1896-1897, όλοι οι χώροι είχαν μετατραπεί σε νοσοκομείο και βοηθητικός χώρος για την επανάσταση. Για αυτούς του λόγους υπήρξαν φθορές σε όλους τους χώρους.[65]

Κατά την περίοδο 1899-1905, αναδείχθηκε η ανάγκη κατασκευής νέου κτιρίου εφόσον ο αριθμός των μαθητών ανέβαινε και οι υφιστάμενες αίθουσες είχαν μικρή χωρητικότητα, δεν ήταν λειτουργικές και συνεπώς δεν υπήρχαν καλές συνθήκες υγιεινής. [65]

Έτσι, τον Αύγουστο του 1900, η Κρητική Πολιτεία πραγματοποίησε ένα μειοδοτικό διαγωνισμό ο οποίος προκήρυξε την δημιουργία μίας νέας κατασκευής στο ανατολικό τμήμα της Μονής όπου προϋπήρχε ένας ψηλός πέτρινος φράχτης αναφέροντας ότι *«εν τω οικοδομήματι θα υπάρχει, πλην των αιθουσών των παραδόσεων, και ευρύς θάλαμος, όστις εκτισμένος κατά τους όρους της υγιεινής θα χρησιμεύση δια τους μαθητάς ως υπνωτήριο»*. Το Ιεραδιδασκαλείο διέθετε *«υπνωτήριο»* με 45 κλίνες και *«αίθουσες διδασκαλίας»* που θα μπορούν να παρευρίσκονται 36 μαθητές. [65]

Ο βόρειος όγκος του κτιρίου παραδόθηκε στις 7 Οκτωβρίου 1900 την ημέρα της εορτής του *«Αγίου Ιωάννου του Ερημίτου και της Μονής Γουβερνέτου»*. [65]

Στις 2 Αυγούστου 1901, αποφασίστηκε η προσθήκη νέων εγκαταστάσεων στο Ιεραδιδασκαλείο με χρηματική βοήθεια από τον Πρίγκιπα Γεώργιο της Ελλάδας. Το έργο ολοκληρώθηκε το 1902 και αποτελούνταν από *«διαμέρισμα οικοτροφείου, αίθουσες παραδόσεων, αίθουσα τελετών καθώς και νοσοκομείο»*. Το έτος επιβεβαιώνεται από την εικόνα 23. Η συγκεκριμένη φωτογραφία (εικόνα 23) έχει αποτυπωθεί από τον Guiseppe Gerola κατά την επίσκεψη του στην Κρήτη για την καταγραφή των Ενετικών μνημείων στην Κρήτη και απεικονίζεται το κτίριο. [65]



Εικόνα 23 Φωτογραφία της Μονής Αγίας Τριάδας που φαίνεται μέρος του Ιεροδιδασκαλείου [65]

Πρώτος από τους καθηγητές που έλαβε μέρος στην εκπαίδευση των μαθητών ήταν «ο αδερφός της Ιεράς Μονής Αγία Τριάδος και πτυχιούχος της Θεολογικής Σχολής της Χάλκης αρχιμ. Δωρόθεος Κλωνάρης». Κατά την διάρκεια του πρώτου χρόνου λειτουργίας της Σχολής, υπήρχαν δύο καθηγητές, ο Διευθυντής και δεκαοκτώ μαθητές. Στο δεύτερο έτος, το προσωπικό αυξήθηκε και αποτελούνταν από τη Α και Β τάξη, «τον διευθυντή τον αρχιμ. Χρύσανθο Τσεπετάκη» και είκοσι επτά μαθητές. [65]

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του, ήταν πολλοί αυτοί που ήθελαν να συνδράμουν χρηματικά για τις ανάγκες και τη συντήρηση του Ιεραδιδασκαλείου. [65]

Η Σχολή λειτούργησε μέχρι το 1897 και μετά η λειτουργία της πήρε αναστολή καθώς ξεκίνησε η Επανάσταση και οι μαθητές έπρεπε να συμμετέχουν. (εικόνα 24) [65]

Με την ίδρυση της Κρητικής Πολιτείας και την επανάσταση του Θερίσου το 1905 άρχισε να λειτουργεί ξανά η Σχολή με πέντε τάξεις και «διευθυντή τον Χρύσανθο Τσεπετάκη». Ο διευθυντής αυτός επιθυμούσε να κάνει τους μαθητές: «ιερείς, ποιμένες, γεωργούς, γεωπόνους, καλλιγράφους, ορθογράφους, λαογράφους, ποιητές, λογοτέχνες, πυρογράφους και οξυγράφους» (εικόνα 25) [65]



Εικόνα 24: Γυναίκες και παιδιά στον περίβολο της Μονής , το 1897, χρήση ως νοσοκομείο επαναστατών[65]



Εικόνα 25: Ομαδική φωτογραφία μαθητών με τον διευθυντή Χρ. Τσεπετάκη μπροστά από το Ηγουμενείο. [65]

Η Σχολή δεν θα λειτουργήσει μέχρι το 1924 εξαιτίας της ασταθούς πολιτικής κατάστασης που υπήρχε στην Κρήτη και των Βαλκανικών Πολέμων που συνέβαιναν στην υπόλοιπη Ελλάδα και της Μικρασιατικής καταστροφής. Θα επαναλειτουργήσει την χρονική περίοδο 1924-1927 ως «*Ιερατική Σχολή*» . [65]

Μέχρι το 1946 η Σχολή στεγαζόταν στην Μονή Ζωοδόχου Πηγής (Χρυσοπηγής) Χανίων. [65]

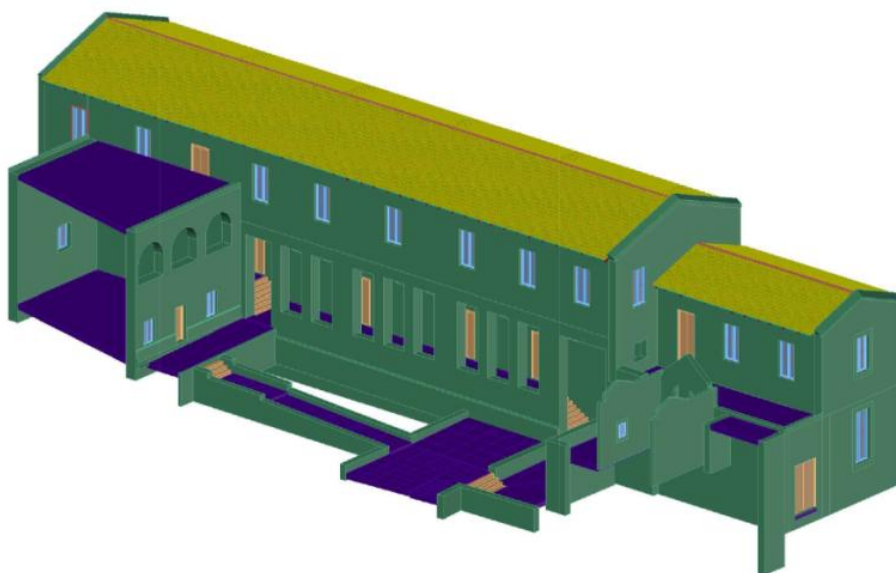
Από το 1947 μέχρι το 1974, επιστρέφει στην Ανατολική πτέρυγα της Μονής Αγίας Τριάδας ως Ιερατική Σχολή και εξατάξια Εκκλησιαστική Σχολή. Την περίοδο 1945 έως 1959 λειτούργησε ως Κατώτερο και Ανώτερο Εκκλησιαστικό Φροντιστήριο. [65]

Τον Ιούνιο του 1974, η Σχολή μεταστεγάστηκε στην περιοχή του Αγίου Ματθαίου στον Δήμο Ακρωτηρίου, στο κτήριο του *«Οικοτροφείου και Ορφανοτροφείου Θηλέων της Ιεράς Μητρόπολης»*. [65]

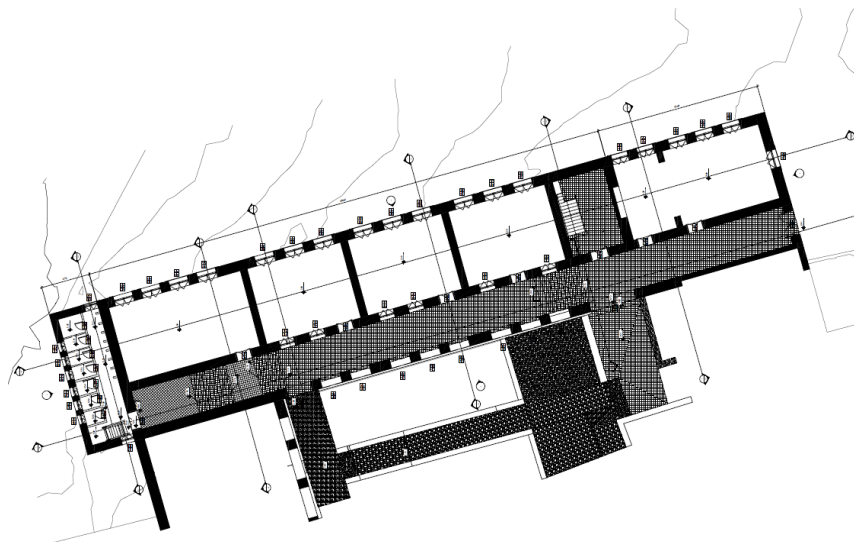
Το Ιεραδιδασκαλείο Κρήτης κατάφερε να συνδυάσει την χριστιανισμό και την παιδαγωγία με δημιουργικό και αποτελεσματικό τρόπο στην θεωρία και στην πράξη. Κατά την περίοδο της λειτουργίας της ως Ιεραδιδασκαλείο αλλά και ως Ιερατική Σχολή, η συνεισφορά της στην εκπαιδευτική και εκκλησιαστική ζωή της Κρήτης ήταν πολύ σημαντική και αποδεικνύεται από την ιστορία και την τοπική κοινωνία. [65]

3.2 Περιγραφή του κτιρίου μελέτης

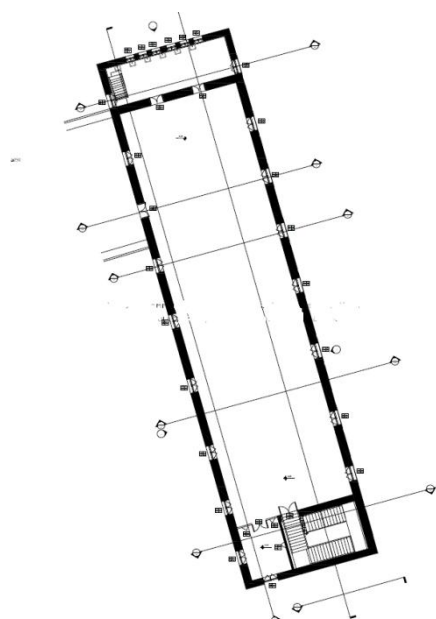
Το κτίριο της Πρώην Ιερατικής Σχολής βρίσκεται στην ανατολική πτέρυγα της Μονής και είναι ένα απλό και επίμηκες κτίριο (εικόνα 26,27). Ως προς την κάτοψη είναι ορθογωνική με διαστάσεις 10,80 x 56,00μ περίπου. Στην εικόνα 26 φαίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της Ιερατικής Σχολής και στις εικόνες 27-29 απεικονίζονται οι κατόψεις και ορισμένες όψεις και τομές από την ερευνητική ομάδα με επιστημονικά υπεύθυνη την Καθηγήτρια Κωτσάκη Αμαλία που εκπονεί το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο: «Διερεύνηση δυνατοτήτων προστασίας, ανάδειξης, αποκατάστασης και επανάχρησης κτηρίου πρώην Ιερατικής Σχολής, καθώς και των παρακείμενων ερειπωμένων κτισμάτων κατοικιών στην Ιερά Μονή Αγίας Τριάδος Τζαγκαρόλων στα Χανιά Κρήτης μαζί με τον περιβάλλοντα χώρο τους» [5].



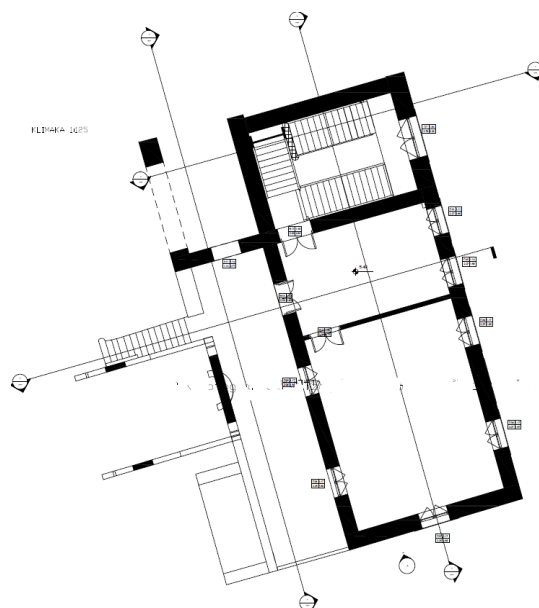
Εικόνα 26: Τρισδιάστατη απεικόνιση της Πρώην Ιερατικής Σχολής [5]



Εικόνα 27: Η κάτοψη του ισογείου [5]



(α)



(β)

Εικόνα 28: Κάτοψη ορόφου, (α) βόρειο τμήμα, (β) νότιο τμήμα [5]



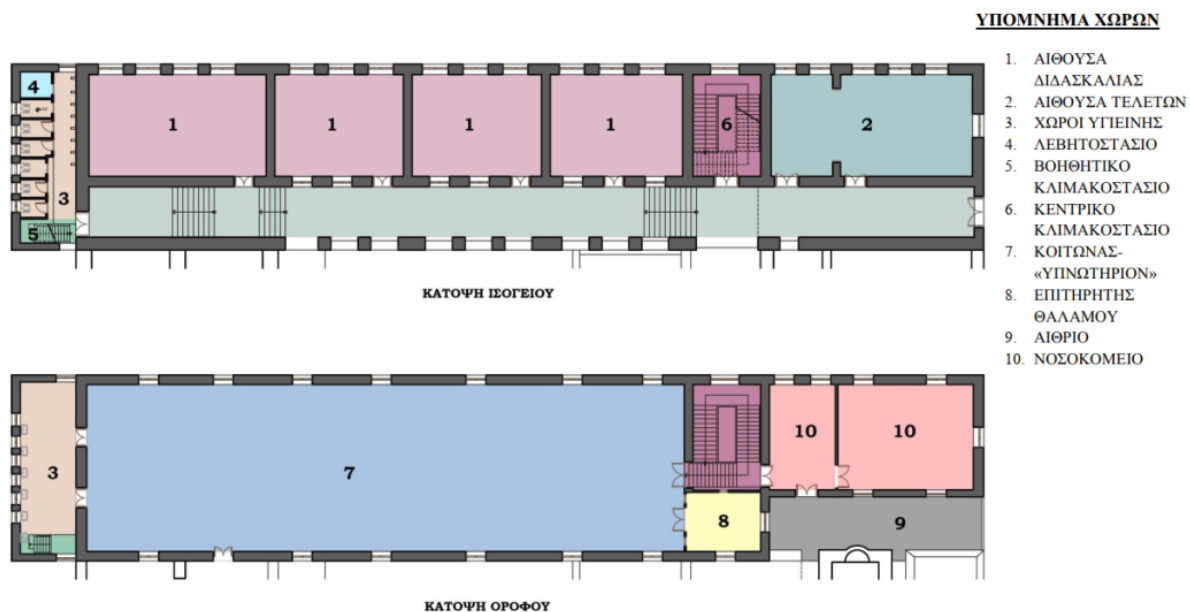
Εικόνα 29: Διαμήκεις τομές, (α) από την δυτική πλευρά, (β) από την ανατολική πλευρά [5]

Η Πρώην Ιερατική Σχολή κατασκευάστηκε το 1900 και ολοκληρώθηκε γρήγορα το 1902 με σκοπό την στέγαση του νέου Ιεραδιδασκαλείου. Αργότερα διαμορφώθηκε ως Ιερατική Σχολή και από το 1930 έως το 1975 λειτούργησε ως Εκκλησιαστική Σχολή. Έπειτα το κτίριο παράκμασε και ερειπώθηκε λόγω της μεταφοράς της Εκκλησιαστικής Σχολής στον Άγιο Ματθαίο Ακρωτηρίου. Στην εικόνα 30 φαίνεται η πρόσοψη του κτιρίου και στην εικόνα 31 οι λειτουργίες του κάθε δωματίου την περίοδο λειτουργίας του.

Η κατασκευή είναι διώροφη ενώ παράλληλα διαιρείται σε δύο όγκους με τον βόρειο να είναι υψηλότερος από τον νότιο. Η πρόσβαση από τον περίβολο πραγματοποιείται από την δυτική όψη του βόρειου τμήματος της κατασκευής (εικόνα 32α) ενώ παράλληλα υπάρχει μία θύρα στην οποία επιτυγχάνεται η πρόσβαση από το εξωτερικό της Μονής (εικόνα 32β).



Εικόνα 30: Πρόσοψη της Πρώην Ιερατικής Σχολής



Εικόνα 31: Λειτουργίες της Πρώην Ιερατικής Σχολής [65]



(α)



(β)

Εικόνα 32: Είσοδοι του κτιρίου, (α) από την εξωτερική πλευρά, (β) από την δυτική όψη του βόρειου τμήματος [65]

Στο ισόγειο, κατά μήκος της δυτικής όψης της κατασκευής, αναπτύσσεται μία στοά με λιθόκτιστους πεσσούς που εκτείνονται σε σειρά και στηρίζουν τον υπερκείμενο όροφο. Η στοά εξελίσσεται σε τέσσερα επίπεδα ενώ λόγω της κλίσης του εδάφους σχηματίζονται λιθόκτιστες κλίμακες (εικόνα 33).

Στη στοά υπάρχουν στην σειρά εισοδοί για πέντε δωμάτια που λειτουργούσαν ως αίθουσες διδασκαλίας (εικόνα 35). Στην μεγαλύτερη αίθουσα του ισογείου και νότια υπήρχε η αίθουσα τελετών, όπως αναφέρεται στην διπλωματική της Ανδρέου και στο βιβλίο του Δελάκη «ΤΟ ΙΕΡΟΔΙΔΑΣΚΑΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ» (εικόνα 34).

Το βόρειο τμήμα του συνόλου της κατασκευής και το οποίο επεκτείνεται και εκτός του περιγράμματος της Μονής, περιέχει τους χώρους υγιεινής οι οποίο επαναλαμβάνονται και στον όροφο του κτιρίου (εικόνα 36). Αυτοί οι χώροι αποτελούνται από ντουζ και ένα μικρό χώρο λεβητοστασίου.



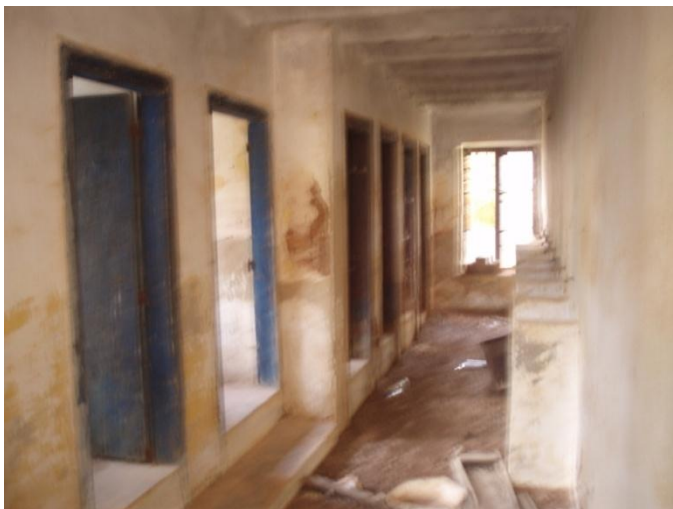
Εικόνα 33: Ο διάδρομος με τους πεσσούς στην δυτική πλευρά του κτιρίου



Εικόνα 34: Αίθουσα τελετών στο ισόγειο [65]



Εικόνα 35: Αίθουσα διδασκαλίας στο ισόγειο [65]



Εικόνα 36: Χώροι υγιεινής στο ισόγειο

Δύο είναι τα κλιμακοστάσια που οδηγούν στον πρώτο όροφο. Υπάρχει το κεντρικό κλιμακοστάσιο το οποίο συνδέεται με την κεντρική είσοδο της στοάς (εικόνα 37) και ένα ετοιμόρροπο ξύλινο κλιμακοστάσιο που βρίσκεται στους χώρους υγιεινής (εικόνα 38).

Με το κεντρικό κλιμακοστάσιο στον όροφο συνδέεται μία μεγάλη ενιαία αίθουσα. Κάτω από αυτή την μεγάλη αίθουσα του ορόφου, δηλαδή στο ισόγειο, αναπτύσσονται τέσσερις αίθουσες διδασκαλίας και μία μεγαλοπρεπής στοά. Αυτός ο χώρος λειτουργούσε ως «υπνωτήριο», με 45 κλίνες για τους μαθητές της Σχολής (εικόνα 39).



Εικόνα 37: Κεντρικό κλιμακοστάσιο



Εικόνα 38: Κλιμακοστάσιο στους χώρους υγιεινής [65]



Εικόνα 39: Κοιτώνας στον όροφο

Σε σύνδεση με την μεγάλη αίθουσα του ορόφου βρίσκεται ένα μικρό δωμάτιο στο οποίο διέμενε ο επιτηρητής του θαλάμου. (εικόνα 40).

Ο νότιος όγκος της κατασκευής εφάπτεται με «το συγκρότημα του Οστεοφυλακίου και το παρεκκλήσι του Σωτήρα».

Στον όροφο του νότιου όγκου υπάρχουν αίθουσες όπου στεγαζόταν το νοσοκομείο (εικόνα 41). Οι αίθουσες αυτές δεν επεκτείνονται σε όλο το πλάτος του όγκου του ισογείου δημιουργώντας «ένα μικρό αίθριο χώρο πίσω από το παρεκκλήσιο» (εικόνα 42). Στην εξωτερική δυτική όψη αυτού του όγκου αναπτύσσεται ένα λιθόκτιστο κλιμακοστάσιο (εικόνα 43) που στηρίζεται σε τοξωτή κατασκευή και το οποίο δίνει την δυνατότητα άμεσης πρόσβασης στα δωμάτια του ορόφου. Λόγω του αίθριου, ακόμη, το κτίριο συνδέεται με «το δώμα της νότιας πτέρυγας της Μονής» (εικόνα 42).



Εικόνα 40: Δωμάτιο του επιτηρητή στον όροφο



Εικόνα 41: Χώρος νοσοκομείο στο νότιο τμήμα



(α)



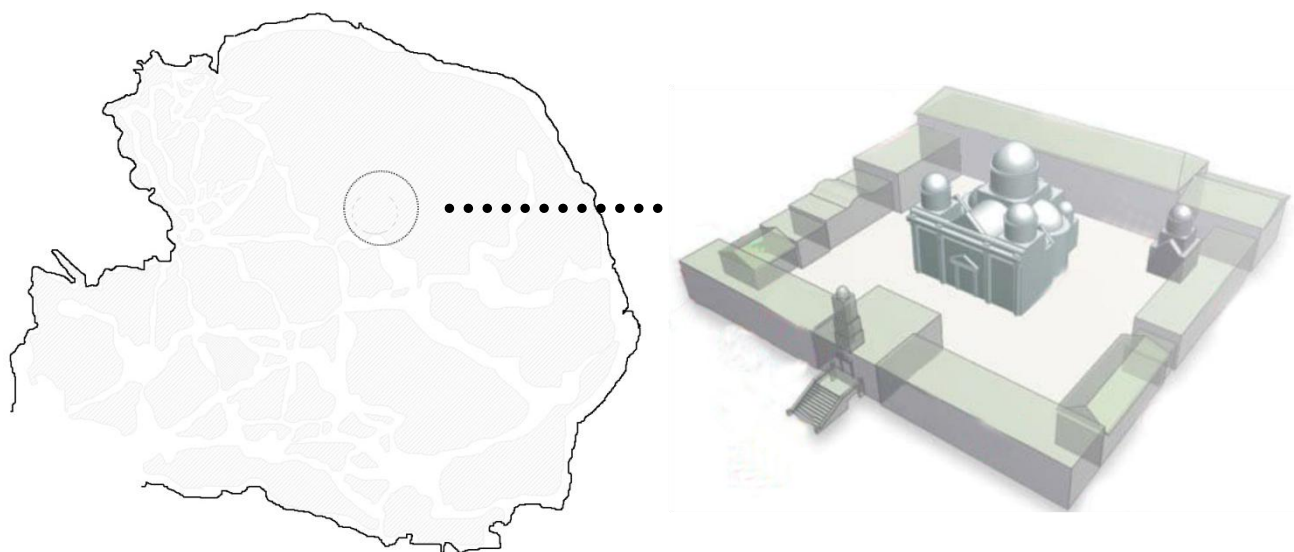
(β)

Εικόνα 42: (α) Το αίθριο του νότιου τμήματος και (β) η σύνδεση με το δώμα της νότιας πτέρυγας



Εικόνα 43: Το λιθόκτιστο κλιμακοστάσιο για την πρόσβαση στην Πρώην Ιερατική Σχολή από τον Ναϊσκο

3.3 Τοπογραφία της περιοχής μελέτης



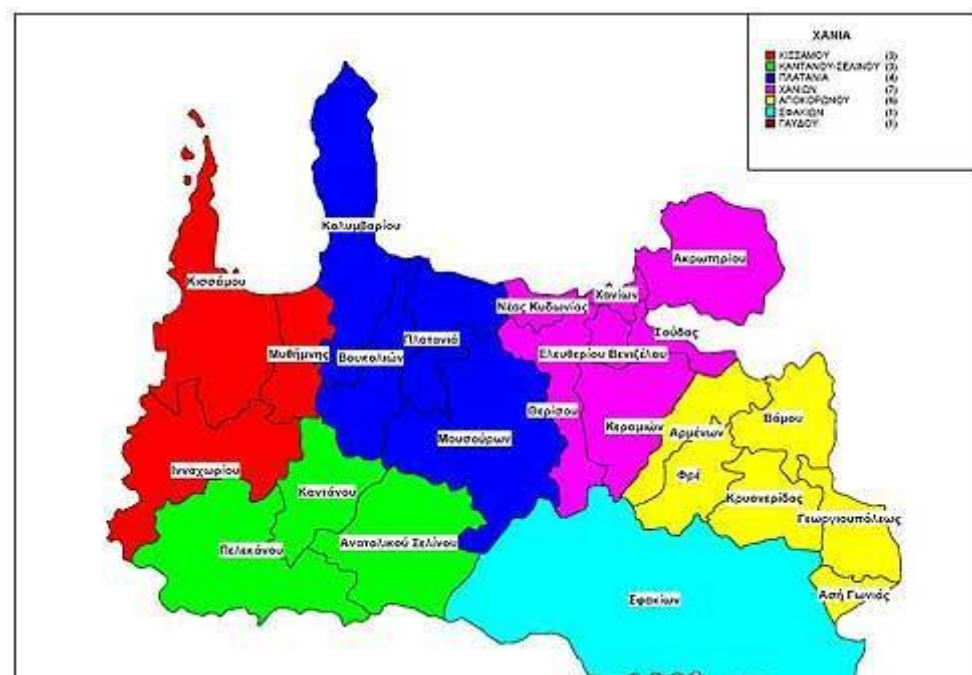
Εικόνα 44: Τρισδιάστατη απεικόνιση της Μονής Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων [66]

Η Πρώην Ιερατική Σχολή αποτελεί τμήμα του μοναστηριακού συγκροτήματος της Αγίας Τριάδας. Το μοναστηριακό συγκρότημα που ονομάζεται και αλλιώς «*Αγία Τριάδα των Μουρτάρων από το όνομα των ιδιοκτητών της περιοχής*» κτίστηκε στη θέση «*Τζομπόμυλος*», στους πρόποδες της χαμηλής οροσειράς του Σταυρού, στο ακρωτήριο «*Μελέχα*», ή Ακρωτήρι. [67] Όπως, επίσης, αναφέρει ο Τωμαδάκης [68], η Μονή αναπτύσσεται σε μια ψαμμώδης πεδιάδα κατάφυτη γεμάτη αμπελώνες και ελαιώνες (πεύκα και κυπαρίσσια) που ανήκουν στην Μονή και στην διπλανή Μονή Γουβερνέτο (εικόνα 45).

Το κτίριο βρίσκεται στον δήμο Ακρωτηρίου της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων. Το Ακρωτήρι βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων (εικόνα 44,46). Παράλληλα, αποτελεί το ανατολικότερο μεγάλο ακρωτήρι της Περιφερειακής Ενότητας και «*σχεδόν ολόκληρο βρέχεται από το Κρητικό Πέλαγος*». [69]



Εικόνα 45: Οι αμπελώνες στον περίβολο της Μονής

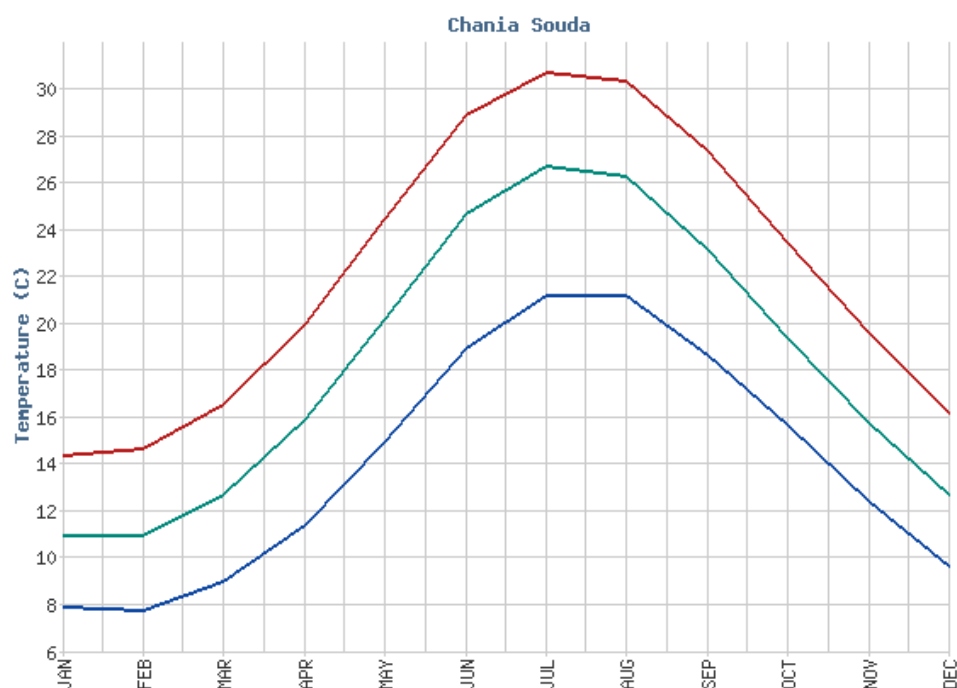


Εικόνα 46: Γεωγραφική Θέση της περιοχής μελέτης [70]

3.4. Κλιματολογικά δεδομένα

Το κλίμα της περιοχής είναι μεσογειακό με υψηλή θερμοκρασία και ξηρασία τους καλοκαιρινούς μήνες και αρκετές βροχές τον χειμώνα. Η τοποθεσία περιτριγυρίζεται από το Κρητικό Πέλαγος όπου αναπτύσσονται βόρειοι ισχυροί άνεμοι τον χειμώνα και ασθενείς άνεμοι το φθινόπωρο και το καλοκαίρι. Το χιόνι σπάνια εμφανίζεται στην περιοχή ενώ ολικοί παγετοί δεν παρουσιάζονται ποτέ. [20]

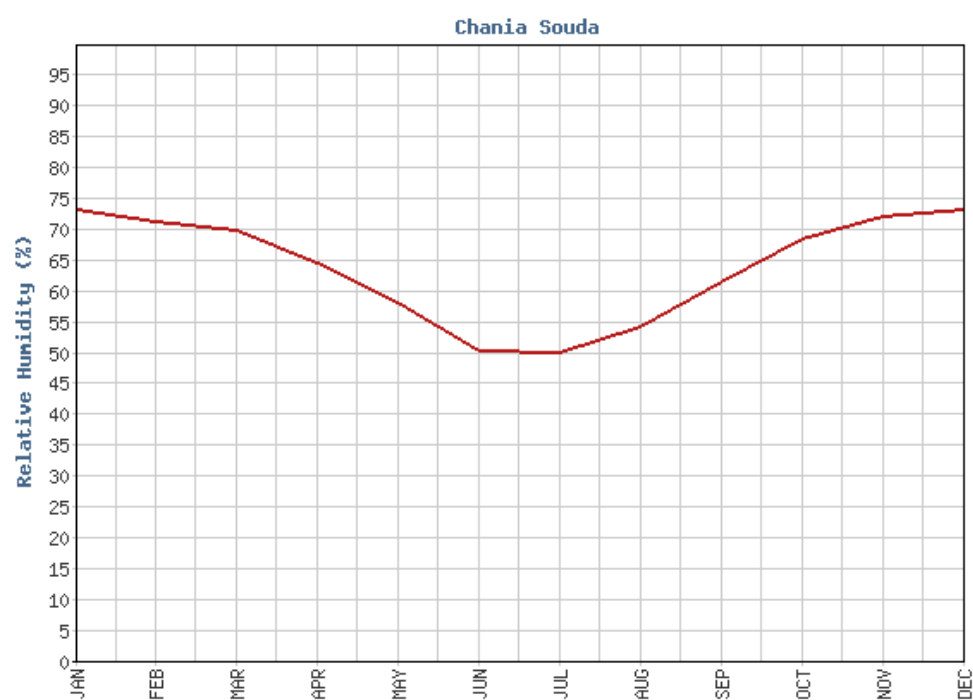
Στα ακόλουθα διαγράμματα (εικόνες 47-50) και στους πίνακες (Πινάκας 1-4) απεικονίζονται τα κλιματολογικά δεδομένα του «Μετεωρολογικού Σταθμού Σούδας από το δίκτυο της ΕΜΥ» [71].



Εικόνα 47: Θερμοκρασία [71]

Πίνακας 1: Θερμοκρασία [71]

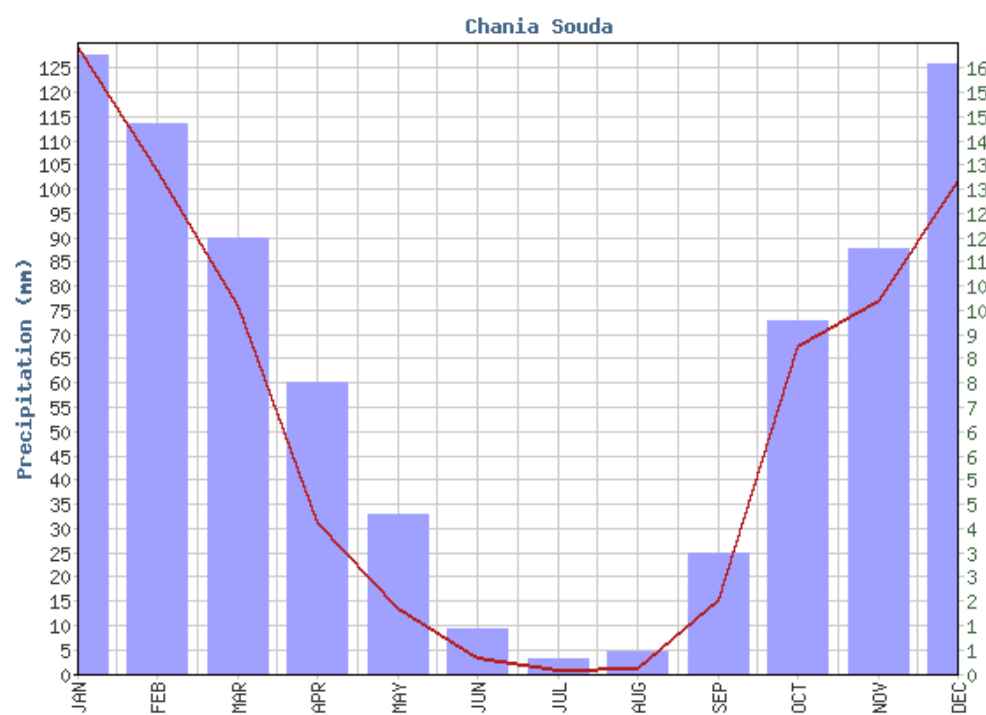
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	7.9	7.8	9.0	11.4	15.0	19.0	21.2	21.2	18.7	15.7	12.4	9.7
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	11.0	11.0	12.7	15.9	20.2	24.7	26.7	26.3	23.2	19.4	15.8	12.7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	14.4	14.7	16.6	20.0	24.5	28.9	30.7	30.4	27.4	23.5	19.6	16.2



Εικόνα 48: Υγρασία [71]

Πίνακας 2: Υγρασία [71]

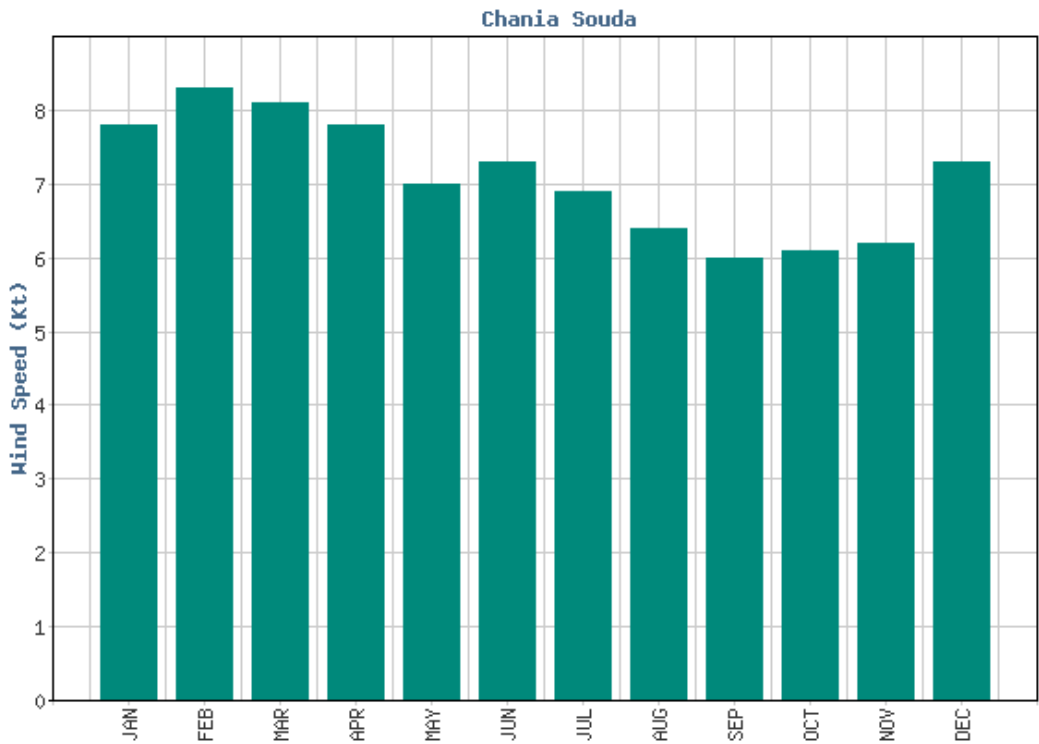
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	73.4	71.3	69.9	64.7	58.3	50.5	50.2	54.3	61.7	68.5	72.2	73.3



Εικόνα49: Υετός [71]

Πίνακας 3: Υετός[71]

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέσο Μηνιαίο Ύψος Υετού	129.5	104.0	76.0	31.5	13.5	3.4	1.0	1.4	15.4	67.7	77.0	101.9
Μέσος Μηνιαίος Αριθμός Ημερών Υετού	16.3	14.5	11.5	7.7	4.2	1.2	0.4	0.6	3.2	9.3	11.2	16.1



Εικόνα 50: Άνεμοι [71]

Πίνακας 4: Άνεμοι [71]

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Επικρατούσα Διεύθυνση Ανέμου	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	ΒΔ	ΒΔ	Δ	Β	Δ	Δ
Μέση Μηνιαία Ένταση Ανέμου	7.8	8.3	8.1	7.8	7.0	7.3	6.9	6.4	6.0	6.1	6.2	7.3

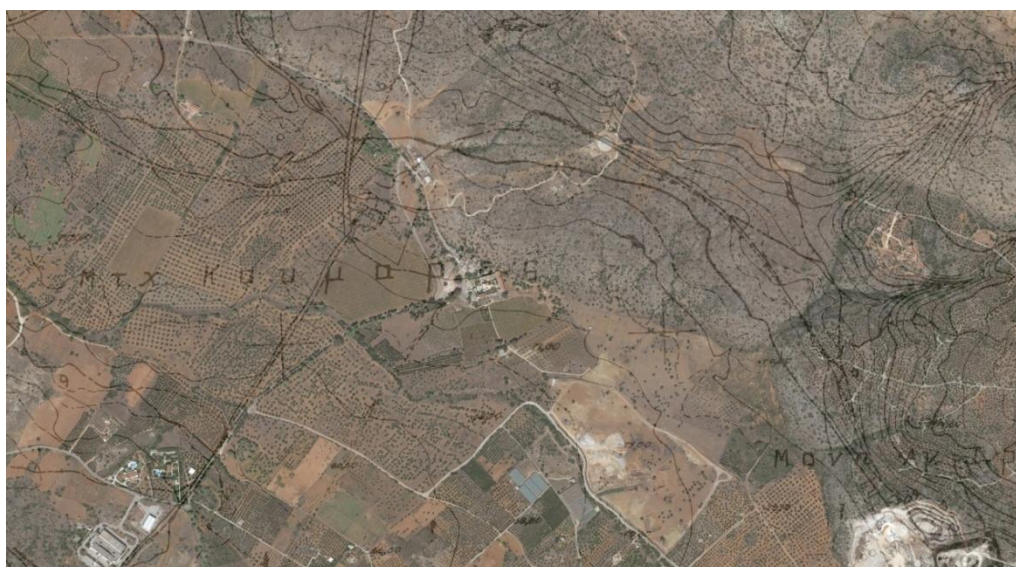
3.5. Γεωλογικά δεδομένα

Τα γεωλογικά δεδομένα για το κτίριο της Πρώην Ιερατικής Σχολής και την ευρύτερη περιοχή, είναι ότι περιλαμβάνουν παλαιούς γεωλογικούς σχηματισμούς από τα κατώτερα και ανώτερα καλύμματα της Κρήτης, οι οποίοι εμφανίζονται στην νότια νοτιοδυτική και νοτιοανατολική περιοχή. Ακόμη υπάρχουν και νεότεροι σχηματισμοί, τα νέα ιζήματα, οι οποίοι βρίσκονται στο μεγαλύτερο μέρος της ευρύτερης βόρειας ζώνης της περιοχής. [70]

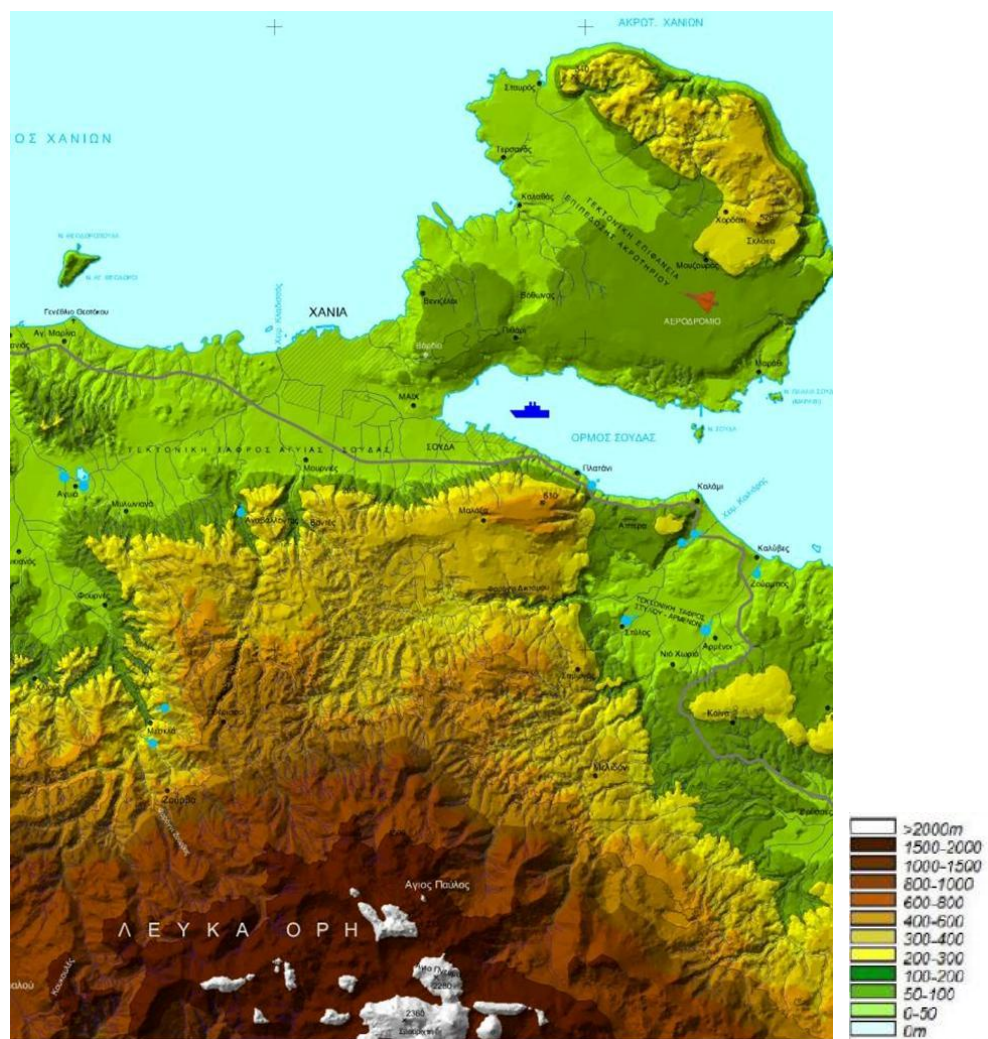
Το κτίριο μελέτης και η ευρύτερη περιοχή επίσης βρίσκεται σε μία ιδιαίτερη κλίση εδάφους όπως φαίνεται και στην εικόνα 51.

Σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα (εικόνα 52) στη περιοχή αυτή υπάρχουν οι εξής ζώνες [70]:

- χαμηλή μορφολογική ζώνη (υψομέτρων 0 έως +200μέτρα):
Απαρτίζεται από «*νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς*».
- λοφώδης και ημιορεινή μορφολογική ζώνη:
Απαρτίζεται από «*νεογενείς και κυρίως μαργαϊκούς σχηματισμούς*».



Εικόνα 51: Χάρτης που απεικονίζει την περιοχή μελέτης με βάση το τοπογραφικό 1:5000 Γ.Υ.Σ.



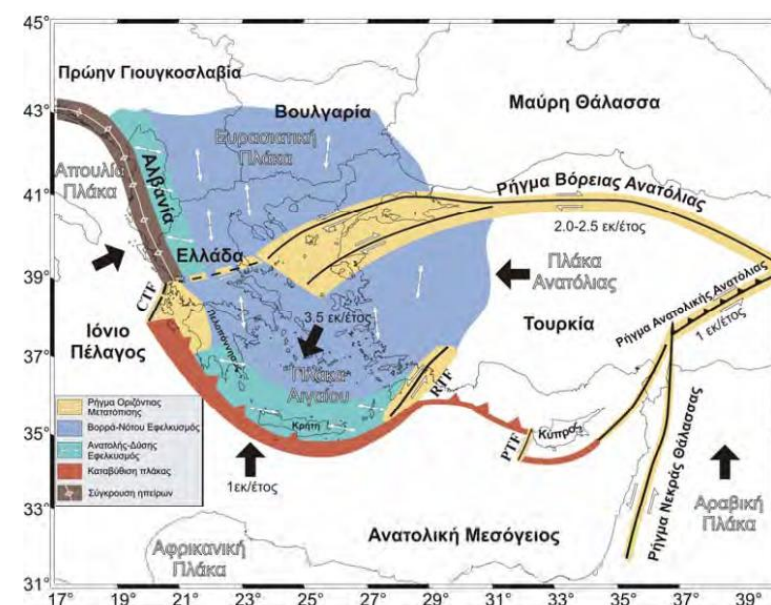
Εικόνα 52 Χάρτης μορφολογικού ανάγλυφου περιοχών της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων [70]

3.6. Σεισμοτεκτονικά δεδομένα

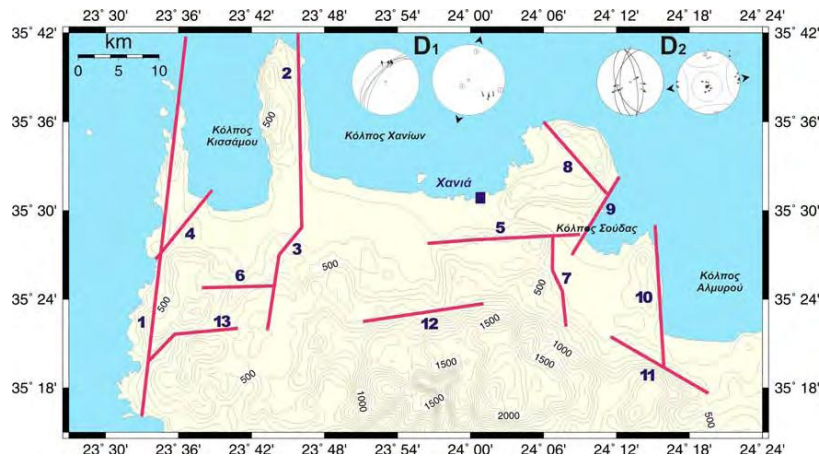
Σύμφωνα με τον (Parazachos, 1990), το τμήμα του Ελληνικού Τόξου διαπερνά την δυτική Κρήτη γι' αυτό και θεωρείται από τις «*πιο ενεργές σεισμοτεκτονικές περιοχές της δυτικής Ευρασίας, με μεγέθη σεισμών έως 8.3 ρίχτερ*» (Εικόνα 53). Το γεγονός αυτό εξηγείται, ακόμα, γιατί η περιοχή αυτή αποτελεί τον συνδυασμό βύθισης «*του ανατολικού τμήματος της λιθόσφαιρας της Μεσογείου*» και της κίνησης προς τα νοτιοδυτικά της «*λιθόσφαιρικής πλάκας του Αιγαίου*» το οποίο προκαλείται από την κίνηση προς τα δυτικά «*της Ανατόλιας κατά μήκος της τάφρου του βορείου Αιγαίου*». [72]

Στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Κρήτης, η Αφρικανική πλάκα πλησιάζει την Ευρασιατική (Εικόνα 53). Συνεπώς, η περιοχή της Δυτικής Κρήτης εμφανίζει υψηλή σεισμικότητα με επιφανειακούς και ενδιάμεσου βάθους σεισμούς. [72]

Στην εικόνα 54 φαίνεται και το μεγάλης γωνίας κλίσης ρήγμα (Ρήγμα Ακρωτηρίου) που διαπερνά το κτίριο μελέτης και το οποίο δραστηριοποιείται.



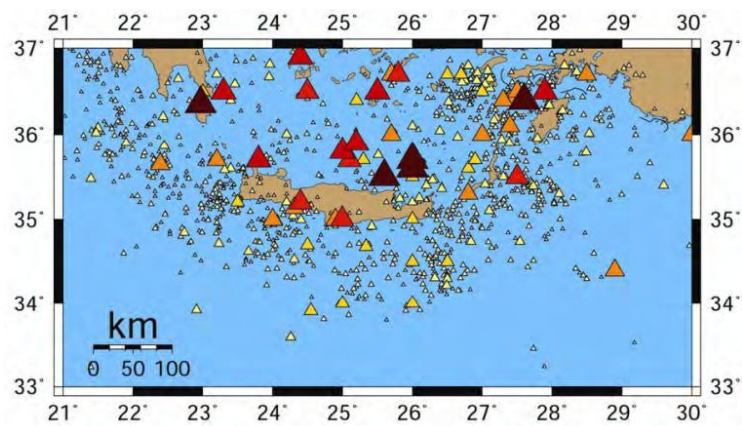
Εικόνα 53: Το γεωδυναμικό και τεκτονικό μοντέλο της Ελλάδας [72]



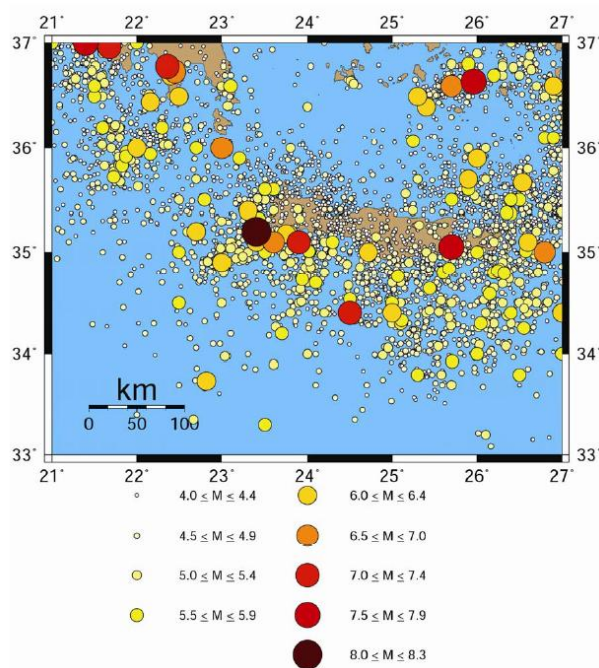
Εικόνα 54: Τα νεοτεκτονικά ρήγματα της Δυτικής Κρήτης [72]

Από την παρακάτω εικόνα (Εικόνα 55) συμπεραίνεται ότι, στο νότιο και βορειοδυτικό τμήμα της Κρήτης, η σεισμικότητα είναι πολύ υψηλή σε σχέση με το βόρειο τμήμα της Κρήτης [72]

Συνεπώς, «οι σεισμοί ενδιαμέσου βάθους του ρήγματος της περιοχής Κυθήρων» και οι επιφανειακοί σεισμοί που προκαλούνται από γειτονικά κανονικά ρήγματα (Εικόνα 55, 56) επιδρούν τους ανατολικότερους Δήμους της Περιφερειακής Χανίων όπου ανήκει και ο Δήμος Ακρωτηρίου όπου βρίσκεται το κτίριο μελέτης.[72]



Εικόνα 55 Τα επίκεντρα των σεισμών ενδιάμεσου βάθους» [72]



Εικόνα 56: Τα επίκεντρα των επιφανειακών σεισμών στη Δυτική Κρήτη [72]

3.7. Αποτύπωση φθορών της κατασκευής

Από άποψη μακροσκοπικής ανάλυσης δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα σημαντικές βλάβες. Τα προβλήματα επικεντρώνονται στη διάβρωση υλικών είτε λόγω γήρανσης είτε λόγω υψηλών ποσοστών υγρασίας που επικρατούν στο χώρο. Οι σημαντικότερες φθορές παρουσιάζονται στις ανατολικές τοιχοποιίες λόγω φυσικών φθορών.

Τοιχοποιίες

Συνολικά στο κτίριο δεν υπάρχουν σημαντικές ρωγμές. Η πιο επιβαρυμένη τοιχοποιία παρατηρείται στην δυτική όψη του κτιρίου που συνορεύει με τον Ναϊσκο του Σωτήρος. (εικόνα 57). Ακόμη, αρκετές ρηγματώσεις παρουσιάζονται σε μεμονωμένες εσωτερικές τοιχοποιίες στο ισόγειο (εικόνα 58).

Σε αρκετά σημεία της ανατολικής τοιχοποιίας καθώς και στα δάπεδα παρουσιάζεται η ύπαρξη ριζικών συστημάτων (εικόνες 59-60). Κυρίως, όμως, παρατηρείται αποσάθρωση-μερική αποκόλληση κονιαμάτων από έντονη ανερχόμενη υγρασία, γεγονός που οφείλεται στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες και στην επαφή με το υπέδαφος. Ακόμη, λόγω της απουσίας των τζαμικιών, η βροχή εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου και συνεπώς τα επιχρίσματα και τα συνδετικά κονιάματα που βρίσκονται στις περιοχές κάτω από τα ανοίγματα του ισογείου και του ορόφου παρουσιάζουν φυσικές φθορές (εικόνα 61).



Εικόνα 57: Ρωγμή στην δυτική τοιχοποιία



Εικόνα 58: Ρωγμή σε εσωτερική τοιχοποιία



Εικόνα 59: Ύπαρξη ριζικών συστημάτων στην τοιχοποιία



Εικόνα 60: Ύπαρξη ριζικών συστημάτων στο δάπεδο



Εικόνα 61: Αποκόλληση κονιάματος

Στέγη

Η στέγη παρουσιάζει στον όροφο και στο κεντρικό κλιμακοστάσιο ορισμένα προβλήματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη συντήρησης, στη γήρανση των υλικών και στην αποκόλληση των κεραμιδιών. Η απουσία των κεραμιδιών έχει ως αποτέλεσμα την διείσδυση του νερού το οποίο οδηγεί σε φθορές και μερική κατάρρευση των ξύλινων ζευκτών και του πετσώματος της στέγης. (εικόνες 62-63).

Κλιμακοστάσιο

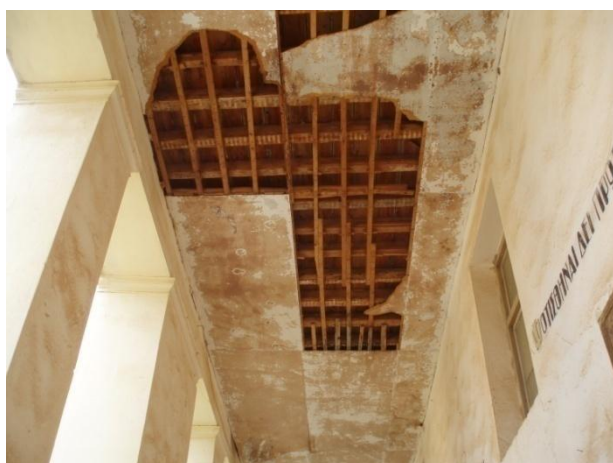
Το ξύλινα δομικά στοιχεία του κεντρικού κλιμακοστασίου, λόγω υγρασίας, έχουν σαπίσει ενώ υφίσταται και μερική κατάρρευση (εικόνα 64).

Δάπεδα

Σε αρκετά σημεία της ανατολική τοιχοποιίας καθώς και στα δάπεδα παρουσιάζεται η ύπαρξη ριζικών συστημάτων. Κυρίαρχα, όμως, παρατηρείται η προσβολή της ξυλείας από την υγρασία (εικόνα 65).

Κουφώματα

Τα κιγκλιδώματα των κουφωμάτων εμφανίζουν εκτεταμένη οξείδωση. Στις ποδιές των παραθύρων, τα ξύλινα στοιχεία φαίνονται να έχουν περιορισμένες παραμορφώσεις (εικόνα 66).



Εικόνα 62: Κατάρρευση ξύλινων στοιχείων στον όροφο



Εικόνα 63 Κατάρρευση ξύλινων στοιχείων στο κλιμακοστάσιο



Εικόνα 64 Κατάρρευση των σανιδιών στο κλιμακοστάσιο



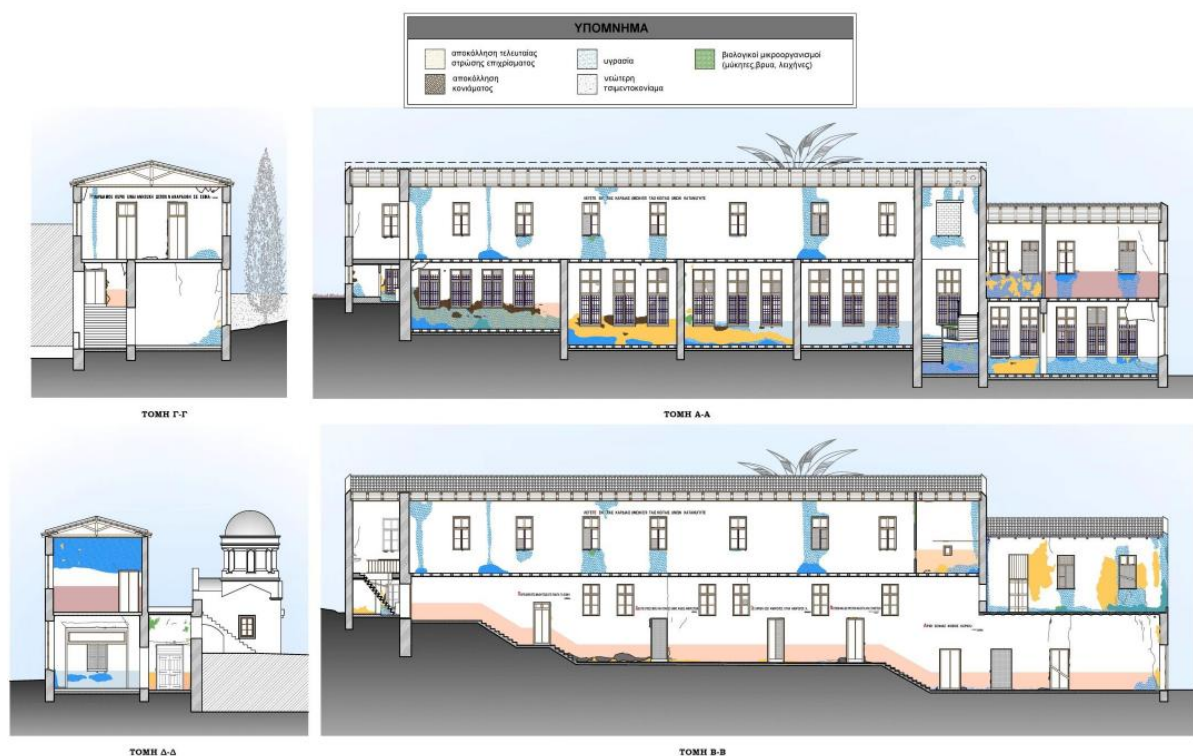
Εικόνα 65 Προσβολή ξυλείας



Εικόνα 66 Παραμορφώσεις στα ξύλινα στοιχεία των ανοιγμάτων



Εικόνα 67 Αποτύπωση φθορών εξωτερικά του κτιρίου [65]



Εικόνα 68: Αποτύπωση φθορών εσωτερικά του κτιρίου [65]

Στις εικόνες 67-68 απεικονίζονται συνολικά οι φυσικές φθορές και δομικές βλάβες στις βασικές όψεις της (εικόνα 67) και εσωτερικά της κατασκευής (εικόνα 68). Τα σχέδια έχουν ληφθεί από την διπλωματική εργασία της Ανδρέου Αναστασίας με τίτλο *«Αποκατάσταση και μετατροπή της Πρώην Ιερατικής Σχολής της Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων»* [65].

Κεφάλαιο 4

Διερεύνηση της υφιστάμενης κατάστασης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής γίνεται χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε απαρτίζεται από τρισδιάστατα εξαεδρικά στερεά (solid) πεπερασμένα στοιχεία με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο και παράλληλα πραγματοποιήθηκαν αλληπάλληλες διακριτοποιήσεις με κριτήριο την ακριβή και ρεαλιστική προσομοίωση της κατασκευής καθώς και τα έγκυρα αποτελέσματα. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Comsol Multiphysics [1].

Η μοντελοποίηση της κατασκευής, βασίστηκε στην αρχιτεκτονική αποτύπωση ενώ λήφθηκαν υπόψη και οι αρχιτεκτονικές προτάσεις από την ερευνητική ομάδα που με επιστημονικά υπεύθυνη την Καθηγήτρια Κωτσάκη Αμαλία εκπονεί το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο: *«Διερεύνηση δυνατοτήτων προστασίας, ανάδειξης, αποκατάστασης και επανάχρησης κτηρίου πρώην Ιερατικής Σχολής, καθώς και των παρακείμενων ερειπωμένων κτισμάτων κατοικιών στην Ιερά Μονή Αγίας Τριάδος Τζαγκαρόλων στα Χανιά Κρήτης μαζί με τον περιβάλλοντα χώρο τους»* [5] (κάποια από τα αρχιτεκτονικά σχέδια παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 3.1.2 της παρούσης διατριβής).

Ως προς τις συνοριακές συνθήκες, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω, λήφθηκαν υπόψη τα μόνιμα φορτία (ίδιο βάρος) των λιθοδομών, ξύλινων δοκών (πατάρια και δώματα) και τα κινητά φορτία με βάση τον Κανονισμό φορτίσεων από τον Ευρωκώδικα EN 1991-1-1 [73]

Με βάση τους ισχύοντες Κανονισμούς για την εκτίμησης της μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω αναλύσεις, πριν την διαδικασία της βελτιστοποίησης, μετά την διαδικασία

της βελτιστοποίησης και στο μοντέλο αρχιτεκτονικών προτάσεων και επεμβάσεων:

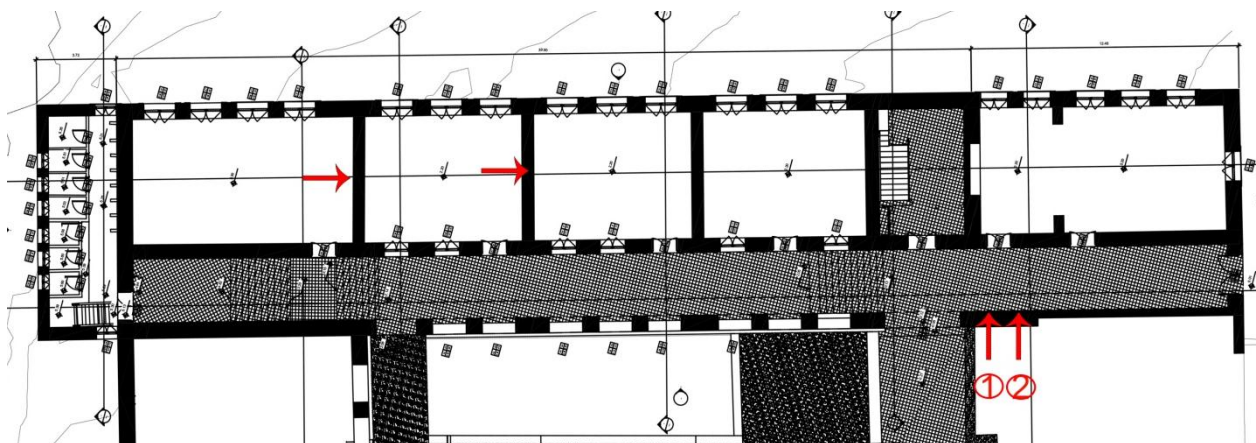
- 1) Γραμμική στατική επίλυση.
- 2) Υπολογισμός των κανονικών μορφών της κατασκευής (ιδιομορφική ανάλυση).
- 3) Φασματική ανάλυση της κατασκευής (σεισμική ανάλυση για το φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού).
- 4) Δυναμική απόκριση κατασκευής σε καταγεγραμμένο πραγματικό σεισμικό γεγονός.

4.1. Μηχανικές ιδιότητες τοιχοποιίας

Προκειμένου να δημιουργηθεί το προσομοίωμα και να διεξαχθούν αναλύσεις για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής, έγινε επιλογή των βασικών ιδιοτήτων των υλικών. Η αρχική επιλογή βασίστηκε σε εργαστηριακές μετρήσεις που έγιναν σε δύο δείγματα υλικού, που ελήφθησαν από το χώρο της κατασκευής με την μέθοδο της πυρηνοληψίας από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Αντοχής Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών στο Πολυτεχνείο Κρήτης στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος του Πολυτεχνείου Κρήτης με επιστημονικά υπεύθυνη την Καθηγήτρια Κωτσάκη Αμαλία με τίτλο «Διερεύνηση δυνατοτήτων προστασίας, ανάδειξης, αποκατάστασης και επανάχρησης κτηρίου πρώην Ιερατικής Σχολής, καθώς και των παρακείμενων ερειπωμένων κτισμάτων κατοικιών στην Ιερά Μονή Αγίας Τριάδος Τζαγκαρόλων στα Χανιά Κρήτης μαζί με τον περιβάλλοντα χώρο τους» [5,74]. Οι περιοχές 1 και 2 που παραλείφθηκαν τα δύο δείγματα υποδεικνύονται με τα κόκκινα βέλη στην παρακάτω εικόνα 69.

Παρόλ' αυτά τα δείγματα που ελήφθησαν ήταν από συγκεκριμένες ρηγματωμένες περιοχές (εικόνα 69). Τα συγκεκριμένα δείγματα δεν ανταποκρίνονται στην συνολική συμπεριφορά της κατασκευής για αυτό τον λόγο είναι πολύ σημαντική η διαδικασία της βελτιστοποίησης που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο και προσδιορίζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά ολόκληρης της κατασκευής.

Οι υπόλοιπες ρηγματωμένες και αποσαθρωμένες από υγρασία περιοχές που λήφθηκαν υπόψη και στην προσομοίωση του κτιρίου μελέτης απεικονίζονται με κόκκινα βέλη στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 69).



Εικόνα 69: Σημεία δειγματοληψιών στην κάτοψη ισογείου [74]

Λαμβάνοντας τα παραπάνω, τα μηχανικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν για την ανάλυση της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι τα εξής:

A) Για τους τοιχούς θεωρήθηκε

Μέτρο ελαστικότητας $E = 2 \text{ GPa}$

Λόγος Poisson $\nu=0.4$

Πυκνότητα υλικού: $\rho=2610 \text{ kg/m}^3$.

Μέτρο διάτμησης $G = 1,98 \text{ GPa} (=0,4 \times E)$

Θλιπτική αντοχή $f_{wc}=1,79 \text{ MPa}$

Εφελκυστική αντοχή $f_{wt} = f_{wc}/10 = 0,19 \text{ MPa}$

Για τις ρηγματωμένες τοιχοποιίες (εικόνα 69) εισάγεται $E=1,1 \text{ GPa}$ (75% μείωση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας)

B) Για τα ξύλινα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες της ξύλειας κατηγορίας κωνοφόρα και λεύκη C16 με τα εξής φυσικά χαρακτηριστικά (σύμφωνα με το πρότυπο EN338):

Μέτρο ελαστικότητας $E = 7 \text{ GPa}$

Λόγος Poisson $\nu=0.25$

Πυκνότητα υλικού: $\rho=310 \text{ Kg/m}^3$

Μέτρο διάτμησης $G = 3,2 \text{ GPa} (=0,4 \times E)$

Γ) Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μέταλλο S275 με τα εξής φυσικά χαρακτηριστικά (σύμφωνα με το πρότυπο EN1993):

Μέτρο ελαστικότητας $E = 200 \text{ GPa}$

Λόγος Poisson $\nu = 0.30$

Πυκνότητα υλικού: $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$

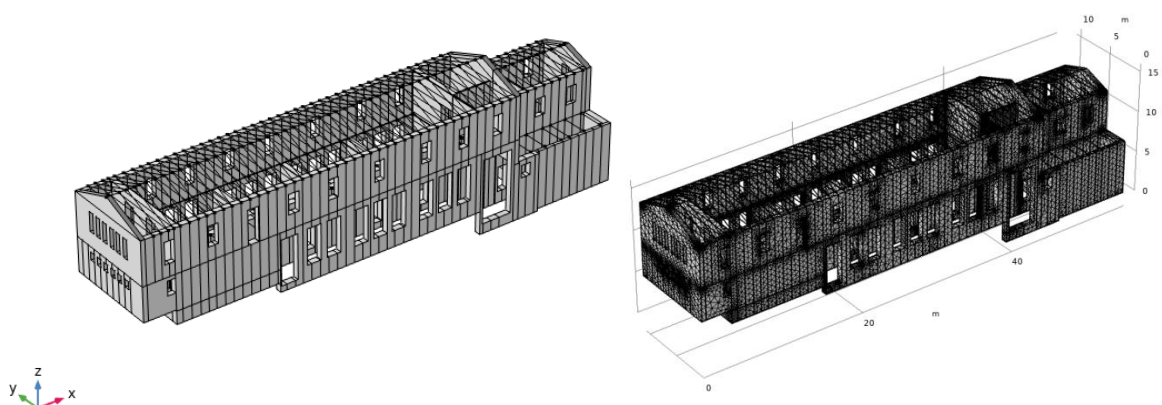
Μέτρο διάτμησης $G = 80 \text{ GPa}$ ($= 0,4 \times E$)

4.2. Υπολογιστικό μοντέλο – Φορτίσεις

4.2.1. Υπολογιστικό Μοντέλο

Δημιουργήθηκε προσομοίωμα (εικόνα 70α) που αποτελείται από τρισδιάστατα εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1] για την προσομοίωση της φέρουσας τοιχοποιίας και στοιχεία δοκού στο χώρο για την προσομοίωση των ξύλινων δοκών των πατωμάτων και των κύριων στοιχείων των δικτυωμάτων της στέγης. Η τελική διαμόρφωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων έγινε μετά από διαδοχικές διακριτοποιήσεις (εικόνα 70β) με κριτήριο την όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη προσομοίωση του φορέα και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Συνολικά το μοντέλο στην υφιστάμενη κατάσταση αποτελείται από 242.723 στοιχεία (219.327 στερεά και 23.396 γραμμικά στοιχεία).



(α)

(β)

Εικόνα 70: (α) Προσομοίωση του κτιρίου της Πρώην Ιερατικής Σχολής, (β) δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του κτιρίου

Με βάση τους ισχύοντες Κανονισμούς και για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, έγιναν οι παρακάτω αναλύσεις:

- α) Γραμμική, στατική επίλυση, με φόρτιση το ίδιο βάρος της κατασκευής και τα φορτία από τα πατώματα.
- β) Υπολογισμός των κανονικών μορφών της κατασκευής (ιδιομορφική ανάλυση).
- γ) Φασματική ανάλυση της κατασκευής (σεισμική ανάλυση για το φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού). Επαλληλία στατικής και δυναμικής ανάλυσης.
- δ) Δυναμική απόκριση κατασκευής σε καταγεγραμμένο πραγματικό σεισμικό γεγονός

4.2.2. Φορτίσεις

Ως προς τις μόνιμες φορτίσεις, οι μεγάλες διατομές των τοιχοποιιών αποδίδουν αυξημένο ίδιο βάρος. Για αυτόν τον λόγο είναι σημαντική η σωστή αποτύπωση (πχ. πάχη τοιχοποιιών) εφόσον συμβάλει στον ακριβή υπολογισμό του ίδιου βάρους με βάση το ειδικό βάρος του υλικού και τον όγκο των αντίστοιχων στοιχείων. Τα κινητά φορτία αποτελούνται από τις μεταβλητές δράσεις σεισμού, χιονιού και ανέμου που καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα 1 [75].

Φορτία στέγης

Μόνιμα φορτία:

Η επικάλυψη της στέγης λαμβάνεται ότι θα πραγματοποιηθεί με βυζαντινά κεραμίδια τύπου βάρους 3,3kg/τεμ και διαστάσεων 43x26cm. Τα καδρόνια στήριξης των κεραμιδιών θα έχουν διατομή 3x3cm και θα τοποθετηθούν ανά 30cm. Οι επιτεγίδες θα έχουν διατομή 5x5cm και θα τοποθετηθούν ανά 50cm. Το πέτσωμα θα έχει πάχος 2.2cm. Το ειδικό βάρος των ξύλων θα λαμβάνεται ίσο με 6.6kN/m³. Επομένως το μόνιμο φορτίο σε επιφάνεια 1m² της στέγης λαμβάνεται ίσο με 0,55kN/m².

Κινητό φορτίο χιονιού:

Με βάση τον Ευρωκώδικα 1 [75] το φορτίο του χιονιού δίνεται από τη σχέση:

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_k$$

Όπου :

μ_i ο συντελεστής σχήματος του φορτίου του χιονιού

λαμβάνεται ίσος με 0.80

s_k η χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού επί του εδάφους

C_e ο συντελεστής εκθέσεως

C_t ο θερμικός συντελεστής

Η τιμή του φορτίου του χιονιού επί του εδάφους λαμβάνεται από τη σχέση:
[75]

$$s_k = (0.420 \times z - 0.03) \times \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right]$$

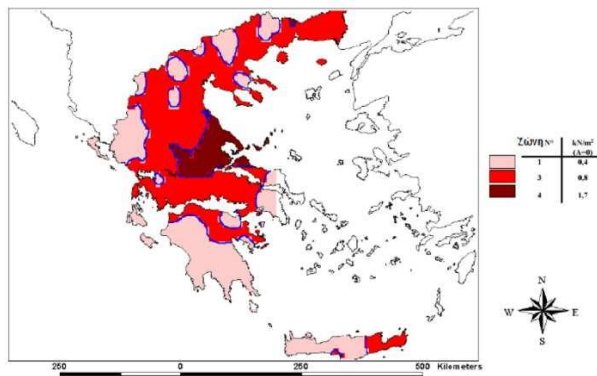
Όπου:

z : η ζώνη στην οποία εντάσσεται η περιοχή και στην περίπτωση αυτή είναι η ζώνη 1 (εικόνα 71)

A : το υψόμετρο της περιοχής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας σε m και αντιστοιχεί σε 85m

Άρα:

$$s_k = (0.420 \times z - 0.03) \times \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right] = 0,39$$



Εικόνα 71 Ζώνες έντασης χιονόπτωσης [75]

Ο συντελεστής εκθέσεως C_e λαμβάνεται από τον πίνακα (πίνακας 5) του Ευρωκώδικα στον οποίο για εδάφη με διαφορετικό τοπογραφικό χαρακτηριστικό εμφανίζονται οι τιμές του C_e .

Πίνακας 5:Τιμές του C_e [75]

Τοπογραφικά χαρακτηριστικά	C_e
Εκτεθειμένο	0.80
Κανονικό	1.00
Προφυλαγμένο	1.20

Ο θερμικός συντελεστής C_t είναι απαραίτητος γιατί συντελεί στην μείωση των φορτίων του χιονιού σε στέγες με υψηλή θερμική διάδοση ($>1\text{W/m}^2\text{K}$), όπως σε ορισμένες γυάλινες στέγες. Για όλες τις άλλες περιπτώσεις, όπως και στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται $C_t = 1.00$

Άρα το φορτίο του χιονιού λαμβάνει την τιμή :

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_k = 0,312\text{KN/m}^2$$

Κινητό φορτίο ανέμου:

Με βάση τον Ευρωκώδικα 1 [75] το φορτίο του ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$w = q_{ref} \cdot C_{ez} \cdot C_p$$

Όπου:

q_{ref} η πίεση αναφοράς $q_{ref} = \rho \cdot v_{ref}^2 / 2$ με

ρ η πυκνότητα αέρα ίση με $1,25\text{KN/m}^2$

v_{ref} η ταχύτητα αναφοράς ανέμου ίση με 30m/sec

C_{ez} ο συντελεστής εκθέσεως

C_p ο συντελεστής πίεσης

Το κτίριο βρίσκεται σε έδαφος III (προάστιο, όχι σε αστική περιοχή) με παραμέτρους :

$KT=0.22$, $Z_0=0,3\text{m}$, $Z_{min}=5\text{m}<15,95\text{ m}$ (ύψος στέγης)

Ο συντελεστής εκθέσεως C_{ez} λαμβάνεται από τη σχέση:

$$C_{ez} = c_{r(z)}^2 \cdot c_{t(z)}^2 \cdot [1 + 2g \cdot I_{v(z)}]$$

Όπου :

$C_{r(z)}$ ο συντελεστής τραχύτητας $= KT \ln(Z_{min}/Z_0) = 0,619$

g ο συντελεστής αιχμής $= 3,5$

$I_{v(z)}$ εισάγει την ένταση των στροβιλισμών $(=KT/(C_{r(z)} \cdot C_{t(z)})$

Ο συντελεστής πίεσεως C_p λαμβάνει τις τιμές:

για δικλινές στοιχείο $c_{pmax}=0.9$ $c_{pmin}=-1$


Οπότε $w=0,676 \text{ KN/m}^2$

Φορτία δαπέδων:

Θεωρήθηκε ότι τα πατώματα αποτελούνται από ξύλινο πέτωμα 2 cm. Ως επιπλέον μόνιμο φορτίο ορίστηκε 0.50 KN/m^2 για τα δάπεδα Συνεπώς το συνολικό μόνιμο φορτίο είναι $G=0,62 \text{ KN/m}^2$.

Σχετικά με το κινητό φορτίο, υπολογίστηκε σύμφωνα με τους πίνακες (πίνακας 6) από τον Ευρωκώδικα EN 1991-1-1 [75].

Πίνακας 6: Δράσεις κινητών φορτίων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN1991-1-1 [75]

Κατηγορία	Παραδείγματα	q_k  (kN/m^2)
A Χώροι για οικιακές δραστηριότητες	δάπεδα	2.0
	σκάλες	3.5
B Χώροι γραφείων	μπαλκόνια	5.0
C Λοιποί χώροι συνάθροισης	C1: Χώροι με τραπέζια, π.χ. σχολεία, καφενεία, εστιατόρια.	3.0
	C2: Χώροι με σταθερά καθίσματα, π.χ. εκκλησίες, θέατρα, χώροι αναμονής.	5.0
	C3: Χώροι χωρίς εμπόδια στη διακίνηση κοινού, π.χ. μουσεία, εκθέσεις. Επίσης, χώροι πρόσβασης σε δημόσια κτίρια, ξενοδοχεία, νοσοκομεία κ.τ.λ.	5.0
	C4: Χώροι σωματικών δραστηριοτήτων, π.χ. αίθουσες γυμναστηρίων, αίθουσες χορού, αίθουσες γυμναστικής.	5.0
	C5: Χώροι επιρρεπείς σε μεγάλα πλήθη, π.χ. κερκίδες γηπέδων, αίθουσες συναυλιών, πλατφόρμες συγκοινωνιακών μέσων.	7.5
D Χώροι σε εμπορικά καταστήματα	D1: Χώροι με καταστήματα λιανικής πώλησης, γενικά.	5.0
	D2: ΑΧώροι σε πολυκαταστήματα.	5.0

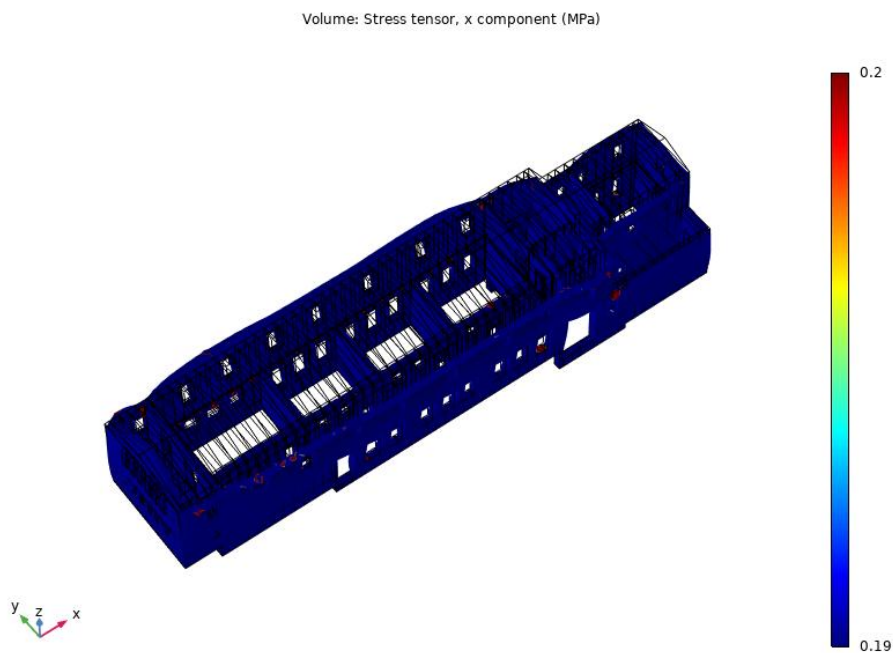
Συγκεντρωτικά, τα κινητά φορτία που χρησιμοποιήθηκαν στα δάπεδα ήταν τα εξής:

- Στον όροφο βόρειου όγκου: $Q=5 \text{ KN/m}^2$.
- Στον όροφο στους χώρους υγιεινής: $Q=3 \text{ KN/m}^2$.
- Στον όροφο του νότιου όγκου: $Q=3 \text{ KN/m}^2$.

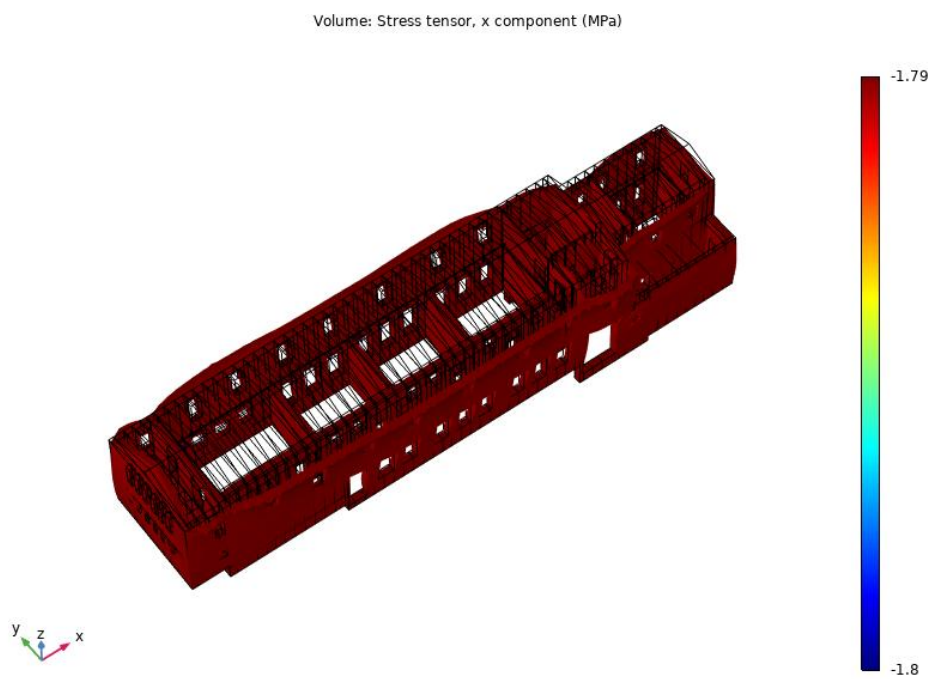
4.3. Αριθμητική ανάλυση

4.3.1. Έλεγχος στατικής επάρκειας

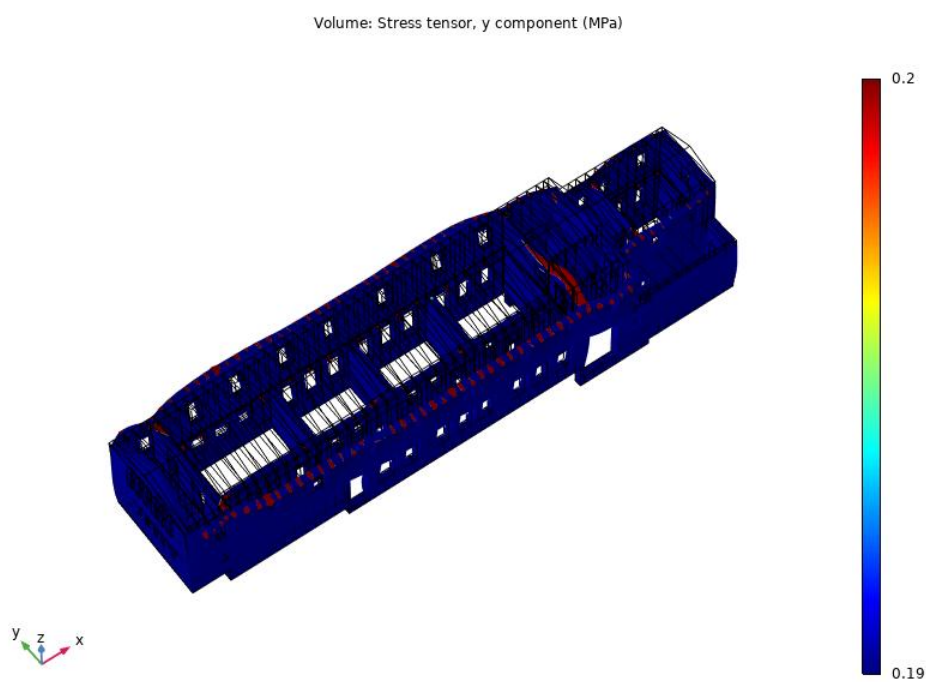
Η στατική μελέτη που πραγματοποιήθηκε ήταν ελαστική και γραμμική. Στις εικόνες 72-77 που ακολουθούν απεικονίζονται οι ορθές τάσεις κατά τον άξονα x,y και z με μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική τάση. Οι περιοχές που υπερβαίνουν την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα πάνω στο μοντέλο.



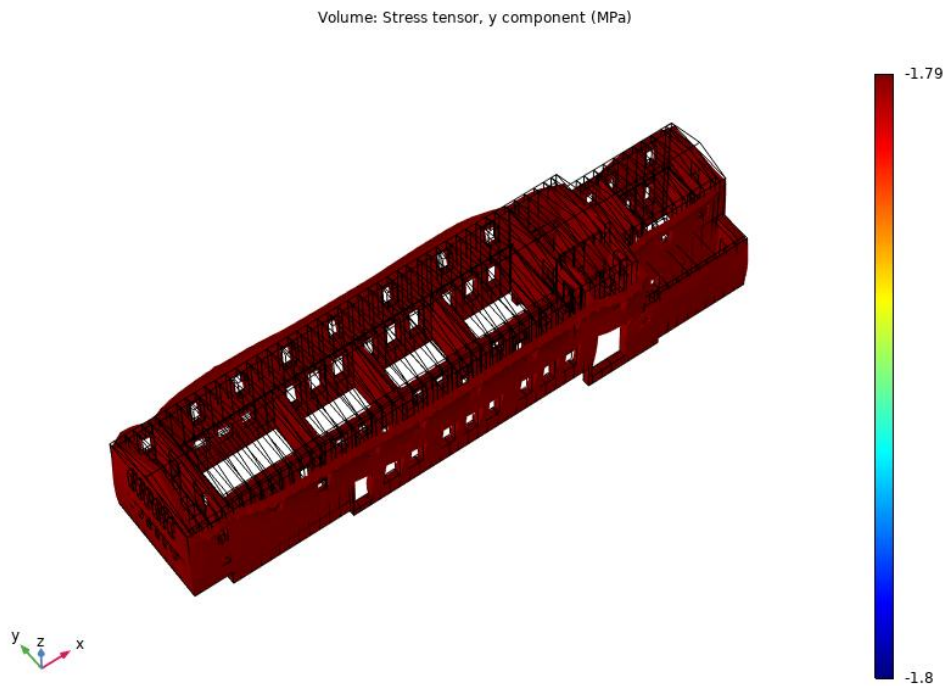
Εικόνα 72: Ορθές τάσεις στον άξονα X με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



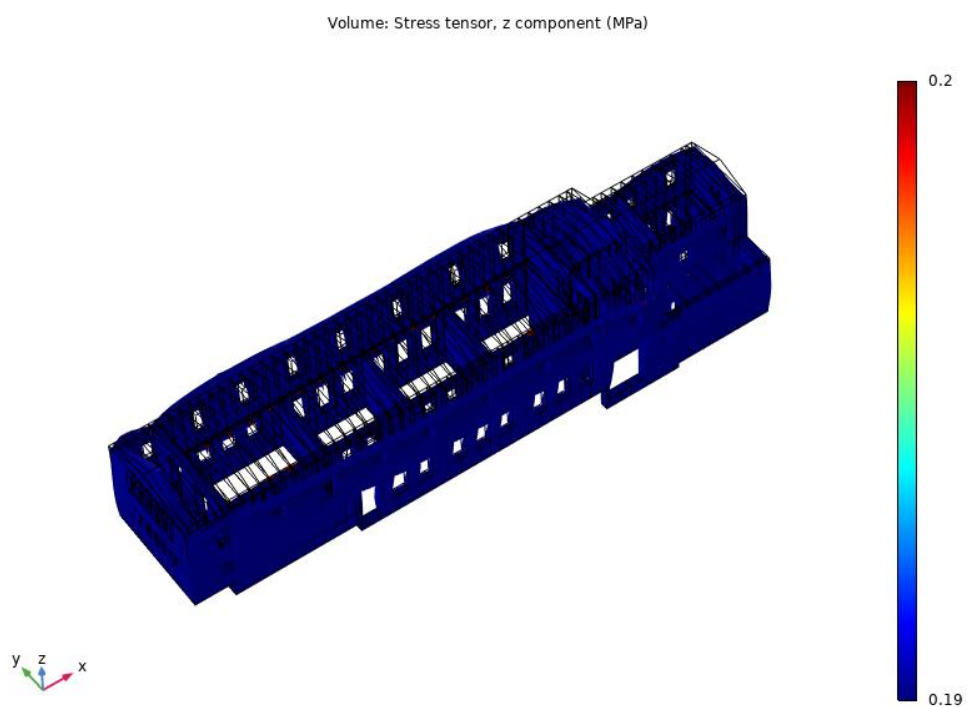
Εικόνα 73 Ορθές τάσεις στον άξονα X με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας



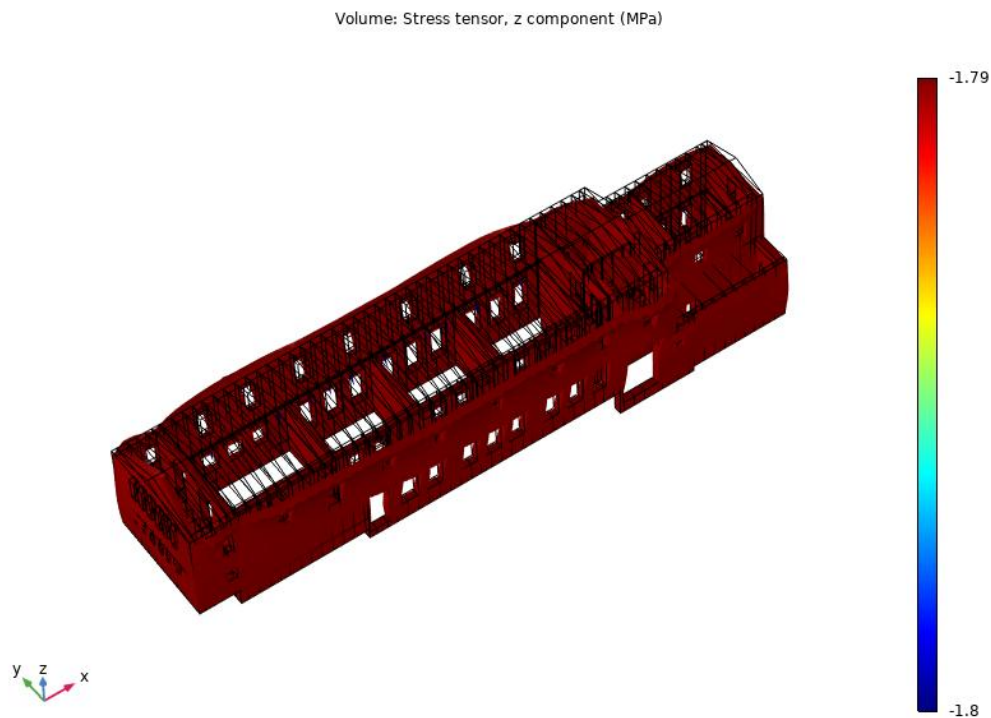
Εικόνα 74 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 75 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 76 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



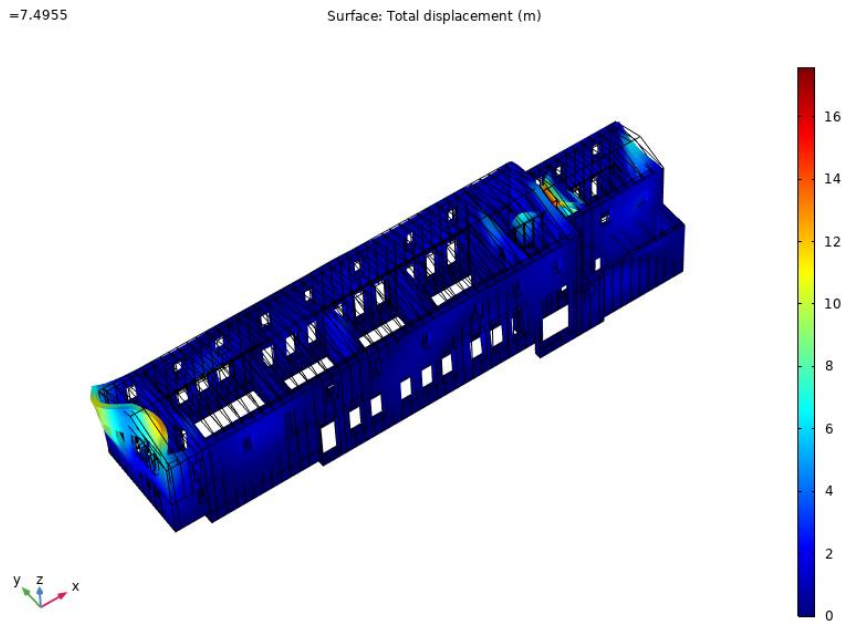
Εικόνα 77 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Μπορεί κανείς να διακρίνει ότι κανένα σημείο δεν υπερβαίνει την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Σχετικά με την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας, παρατηρείται ότι οι περιοχές που συνδέονται οι τοιχοποιίες με τα δοκάρια των ζευκτών και των πατωμάτων, για τον άξονα Y, αποτελούν ευαίσθητες περιοχές του φορέα στις οποίες θα μπορούσαν να αναπτυχθούν αστοχίες.

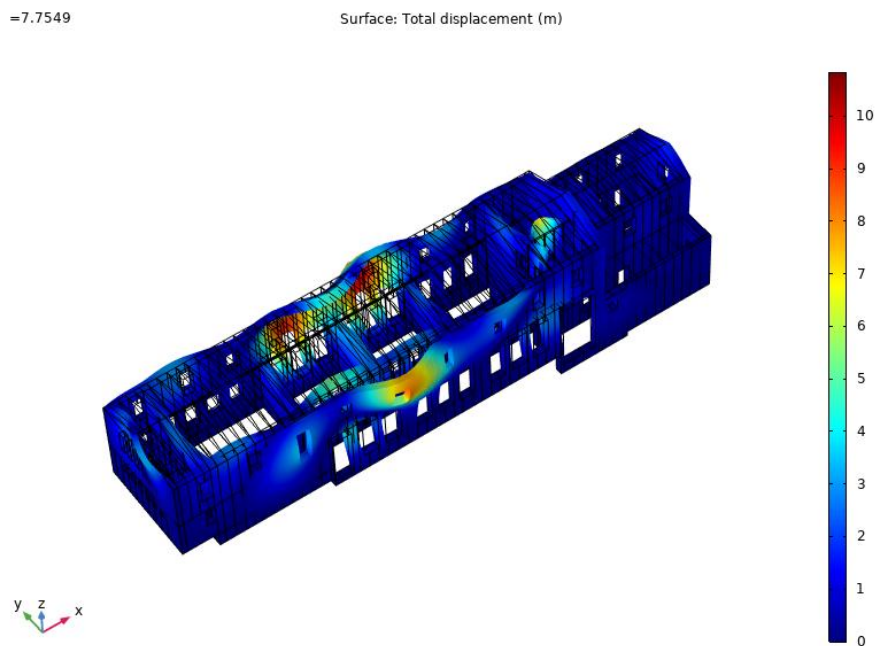
Πρέπει να επισημανθεί ότι, στην υπάρχουσα κατασκευή, δεν υπάρχουν αστοχίες στα σημεία σύνδεσης πατωμάτων και ξύλινων στοιχείων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην σωστή σύνδεση της τοιχοποιίας με τα οριζόντια φέροντα στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η διαφραγματική λειτουργία και η ομαλότερη κατανομή των φορτίων στις τοιχοποιίες.

4.3.2. Ιδιομορφική ανάλυση του φορέα

Η ιδιομορφική ανάλυση αποτελεί το βασικό πρώτο στάδιο της φασματικής ανάλυσης. Στις εικόνες 78-87 που ακολουθούν παρατίθενται οι πρώτες 10 ιδιομορφές της κατασκευής.



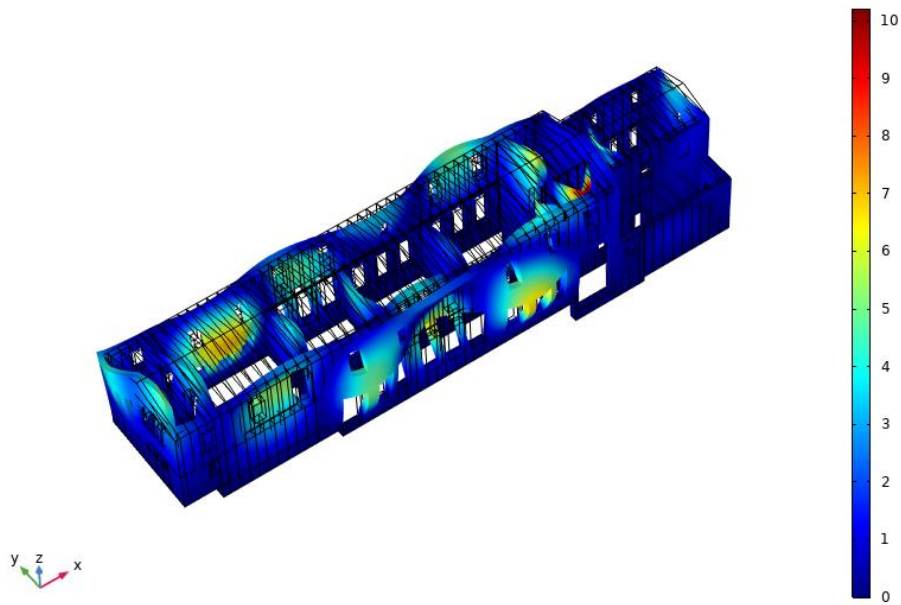
Εικόνα 78: 1^η ιδιομορφή στα 7,49 Hz



Εικόνα 79: 2^η ιδιομορφή στα 7,75 Hz

=7.8707

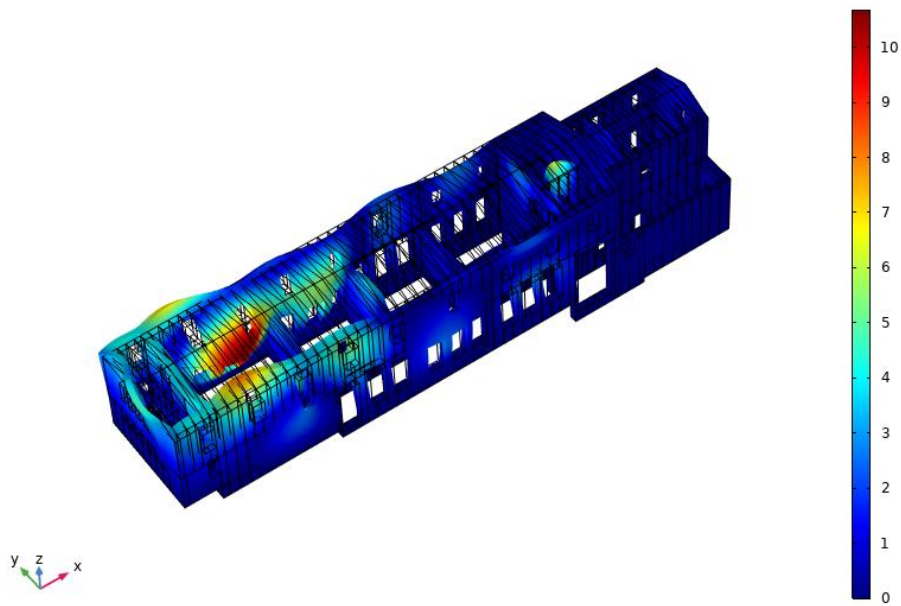
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 80: 3^η ιδιομορφή στα 7,87 Hz

=7.9119

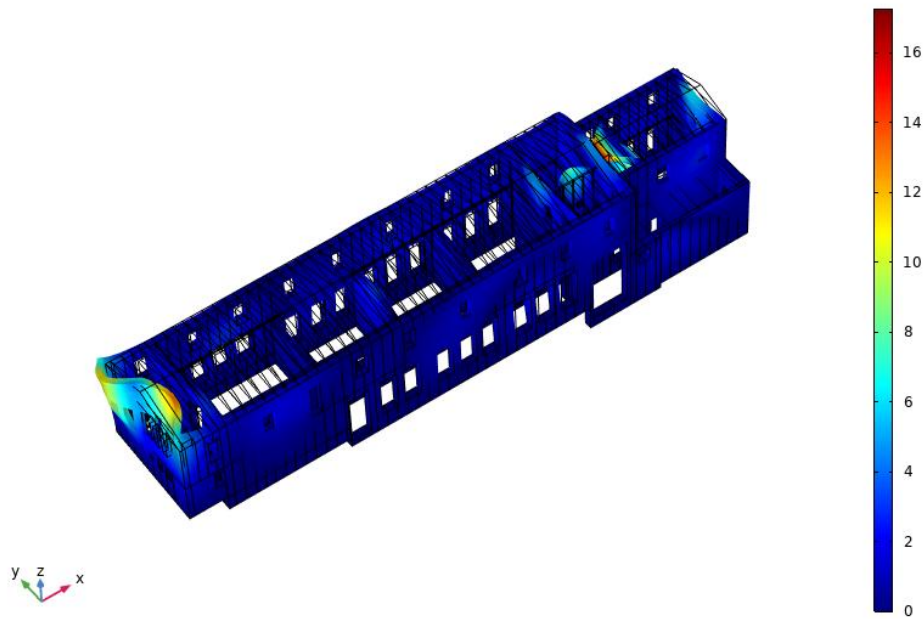
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 81: 4^η ιδιομορφή στα 7,91 Hz

=7.9934

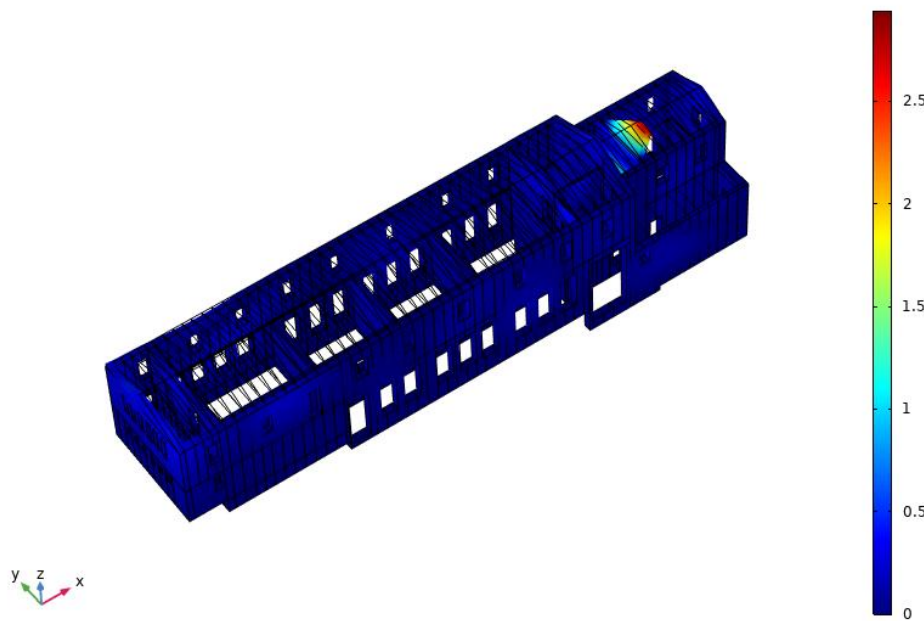
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 82: 5^η ιδιομορφή στα 7,99 Hz

=8.1169

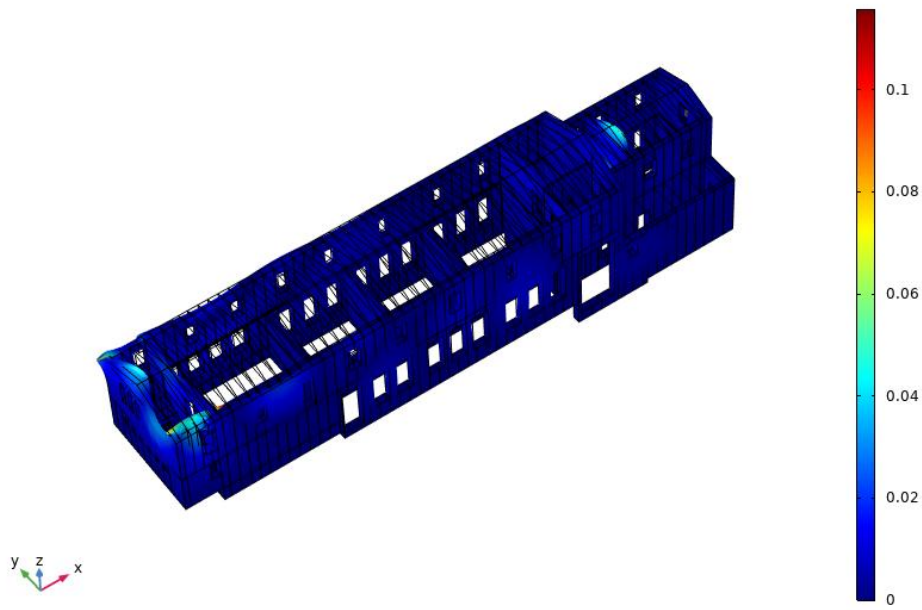
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 83: 6^η ιδιομορφή στα 8,1169Hz

=8.1197

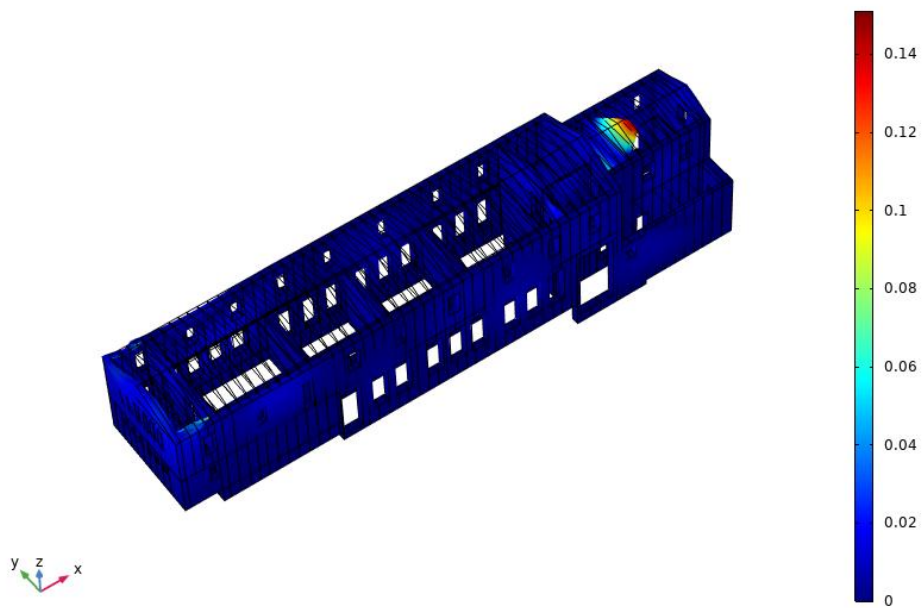
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 84: 7^η ιδιομορφή στα 8,1197Hz

=8.1202

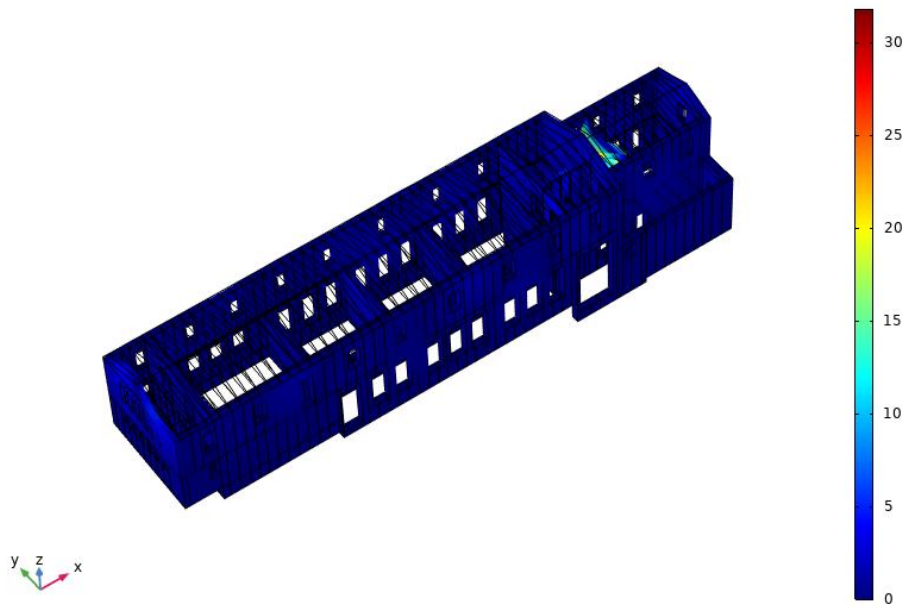
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 85: 8^η ιδιομορφή στα 8,12 Hz

=8.1969

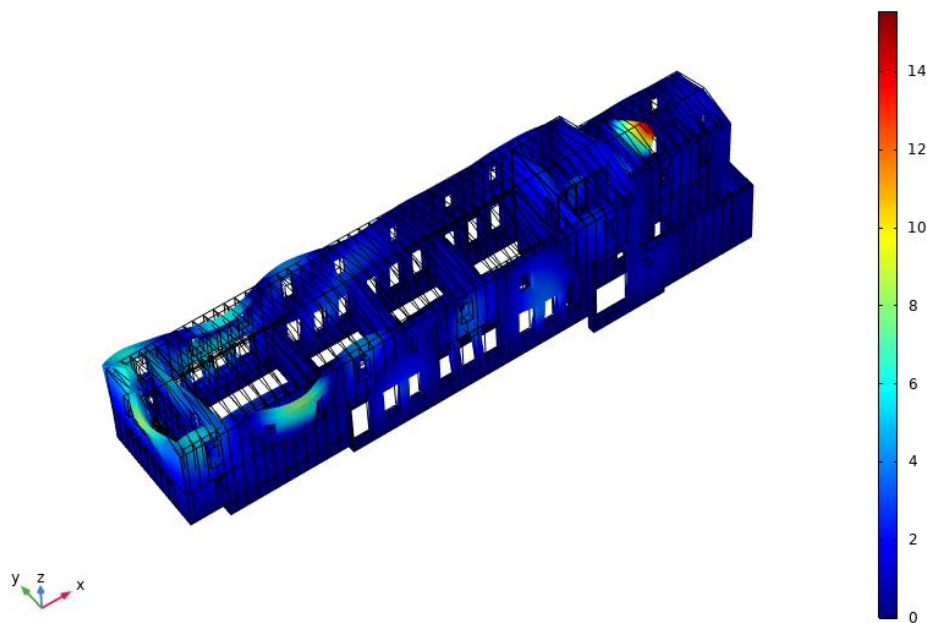
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 86: 9^η ιδιομορφή στα 8,19 Hz

=8.2009

Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 87: 10^η ιδιομορφή στα 8,20 Hz

Παρατηρείται ότι η κατασκευή παρουσιάζει περιοχές με ταλάντωση αρχικά στον όροφο, στην δυτική και ανατολική όψη της κατασκευής και έπειτα επεκτείνονται σε ορισμένες τοιχοποιίες στο ισόγειο. Διαπιστώνεται επίσης ότι η δυτική και ανατολική τοιχοποιία (κατά μήκος του άξονα Χ) οι οποίες περιέχουν μεγάλα ανοίγματα είναι αυτές που εμφανίζουν τις περισσότερες ταλαντώσεις.

4.3.3. Δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής

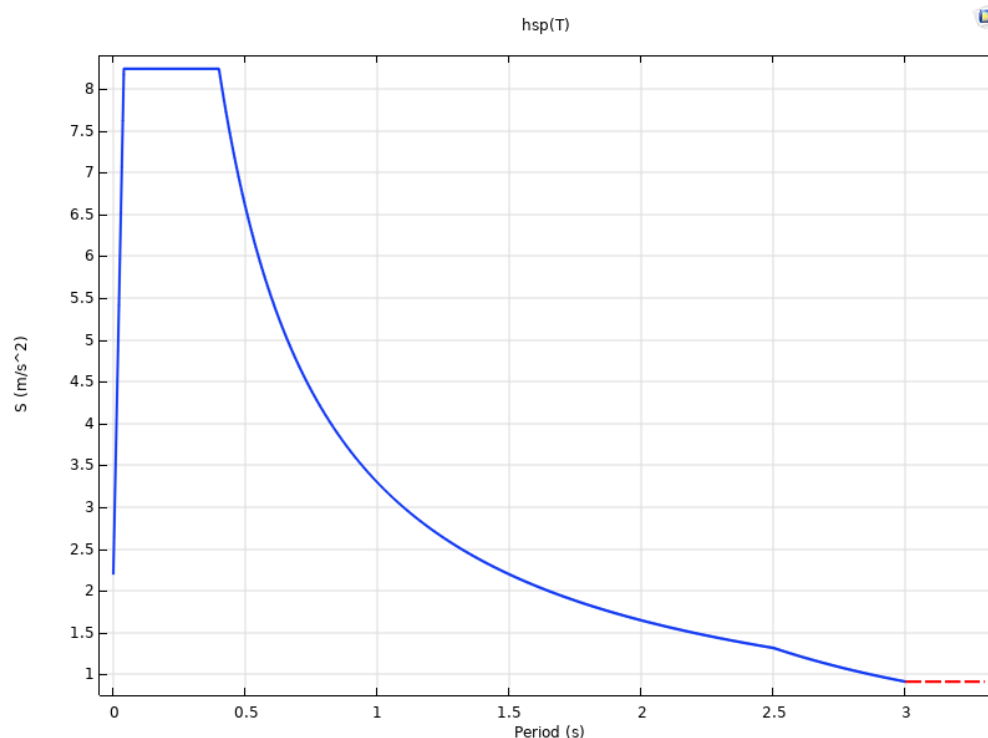
Για την υλοποίηση της φασματικής ανάλυσης, δημιουργήθηκε φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. [76] Για τη δημιουργία του φάσματος επιλέγεται μικρότερη ιδιοπερίοδο T_1 σε σχέση με την τιμή που προτείνει ο κανονισμός, για τη διεύρυνση του πλάτους του φάσματος προς τα αριστερά, εξαιτίας της εμφάνισης χαμηλής $1^{η}$ ς ιδιοπεριόδου στην ανάλυση ιδιομορφών της κατασκευής. Επιλέγεται έτσι, γιατί αν και ίσως υπερεκτιμούνται τα μεγέθη για τις μικρές περιόδους, λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες της μνημειακής αυτής κατασκευής (δυσκαμψία, παθολογία κλπ).

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, τα Χανιά ανήκουν στην δεύτερη σεισμική ζώνη με $a=0,24g$. [76]

Επίσης υιοθετήθηκε τιμή 1 για τον συντελεστή συμπεριφοράς εξαιτίας της σπουδαιότητας του μνημείου που μελετάται.

Επιπρόσθετα, στην ανάλυση ελήφθησαν υπ' όψιν οι ιδιομορφές με ποσοστό συμμετοχής περίπου 85% για τις οριζόντιες διευθύνσεις και 85% για την κατακόρυφη διεύθυνση. Τέλος, οι τιμές του φάσματος πολλαπλασιάστηκαν με συντελεστή 1,4 (σπουδαιότητας), για υλοποίηση της δυσμενέστερης φόρτισης με σεισμό, κατά τον Ευρωκώδικα 1 [75].

Το φάσμα σχεδιασμού και οι βασικές παραδοχές παρατίθεται παρακάτω (εικόνα 88 και πίνακας 7).



Εικόνα 88 Φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8

Πίνακας 7 Δεδομένα δημιουργίας φάσματος σχεδιασμού από Ευρωκώδικα 8

Κατηγορία εδάφους	A
Χαρακτηριστικές περίοδοι φάσματος	
T_B (sec)	0.04
T_C (sec)	0.4
T_D (sec)	2.50
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	II
a	0.24
A	3.2962
Συντελεστής Σπουδαιότητας	$\Sigma 4$
γ_I	1.4
Συντελεστής συμπεριφοράς q	1
Συντελεστής επιρροής θεμελίωσης, θ	1
β_0	2.5
Απόσβεση ζ	5%
Διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης η	1

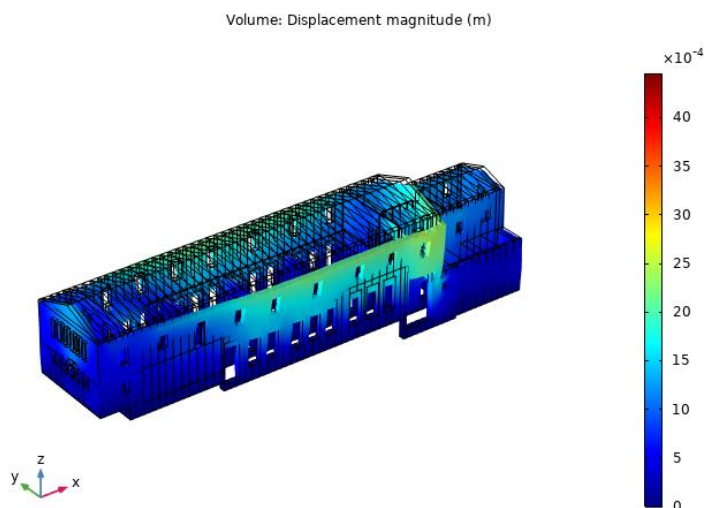
Η σεισμική φόρτιση (φάσμα σχεδιασμού) λήφθηκε υπόψη ότι ασκείται και στις τρεις διευθύνσεις, X, Y και Z και ότι συνδυάζεται με τα μόνιμα φορτία και το μέρος των κινητών έτσι όπως ο κανονισμός καθορίζει.

Ακόμη, θεωρήθηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί ως προς την συμμετοχή του φάσματος στις διάφορες διευθύνσεις και παράλληλα κατάλληλα μειωμένη συμμετοχή (30%) στις άλλες διευθύνσεις. Στον άξονα Z λήφθηκε υπόψη με συμμετοχή 30% σε όλες τις περιπτώσεις. Συνεπώς έχουμε τους ακόλουθους οκτώ συνδυασμούς:

- 1) $S_d = G + 0,3Q + SEX + 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 2) $S_d = G + 0,3Q + SEX - 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 3) $S_d = G + 0,3Q - SEX - 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 4) $S_d = G + 0,3Q - SEX + 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 5) $S_d = G + 0,3Q + SEY + 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 6) $S_d = G + 0,3Q + SEY - 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 7) $S_d = G + 0,3Q - SEY - 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 8) $S_d = G + 0,3Q - SEY + 0.30 SEX + 0,3 SEZ$

Για τον υπολογισμό της τελικής απόκρισης της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SRSS (Square root of the sum of square) για το συνδυασμό των ιδιομορφών.

Στην εικόνα 89 απεικονίζονται ενδεικτικά οι μετακινήσεις για την 1^η περίπτωση σεισμικού συνδυασμού. Οι μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται στην δυτική όψη της κατασκευής όπου υπάρχουν και αρκετά ανοίγματα.



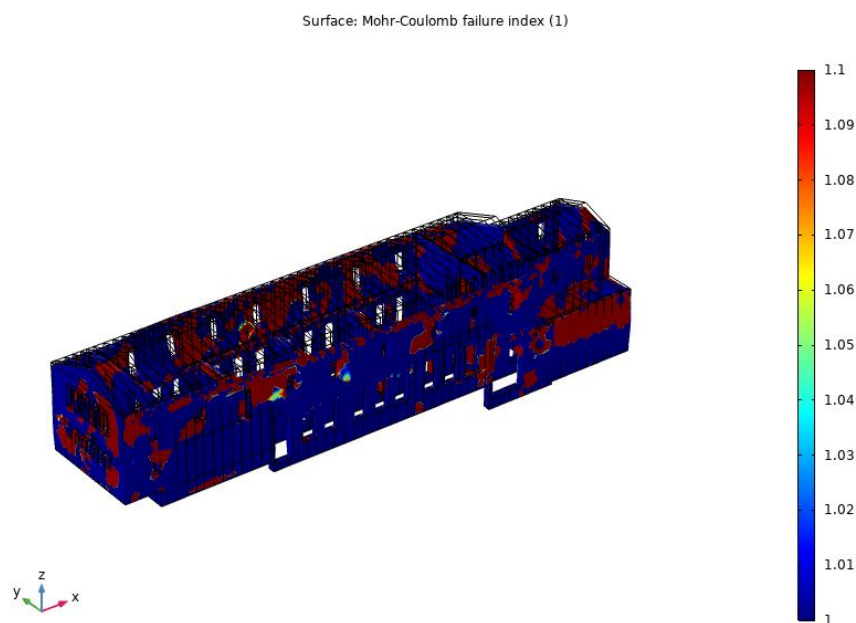
Εικόνα 89: Συνολικές μετακινήσεις για την 1^η περίπτωση συνδυασμού

Για την παρουσίαση αστοχίας της κατασκευής, πραγματοποιήθηκε χρήση κριτηρίου αστοχίας μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης (εφελκυστική και θλιπτική αντοχή) Mohr Coulomb. Το κριτήριο αυτό υποδεικνύει τις περιοχές όπου οι τιμές κύριας τάσης του υλικού κατά την διάρκεια της ανάλυσης υπερβαίνουν τα όρια της αντοχής και συνεπώς τις πιθανές περιοχές αστοχίας.

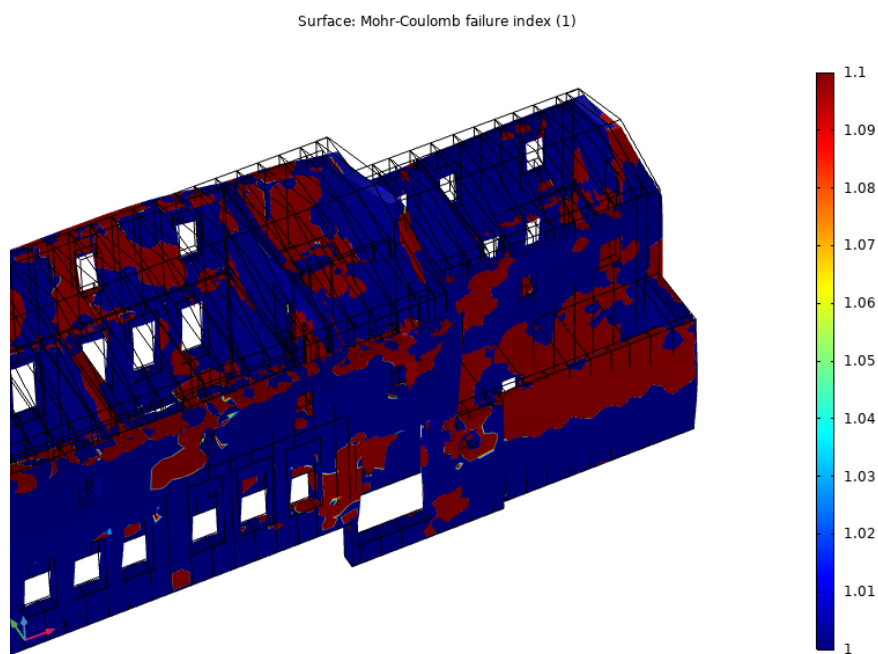
Στο κριτήριο αυτό που χρησιμοποιείται στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1] υπολογίζεται μία συνθετική τάση όπου λαμβάνεται υπόψη τόσο η μέγιστη εφελκυστική τάση όσο και η μέγιστη θλιπτική τάση δημιουργώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο.

Στις εικόνες 90-91 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό και στις εικόνες 92-93 για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει τις περιοχές που η τιμή του κριτηρίου υπερβαίνει την μονάδα και συνεπώς στην περιοχή αυτή θα παρουσιαστεί πιθανή αστοχία. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των υπερβάσεων σε συγκεκριμένες θέσεις τις κατασκευής, συνήθως στις περιοχές των ανοιγμάτων. Ακόμη οι περισσότερες περιοχές αστοχίας είναι στον νότιο όγκο της κατασκευής καθώς και στις ήδη ρηγματωμένες τοιχοποιίες του βόρειου όγκου της κατασκευής.

1^{ος} συνδυασμός: G+0,3Q +SEX +0.30 SEY +0,3SEZ



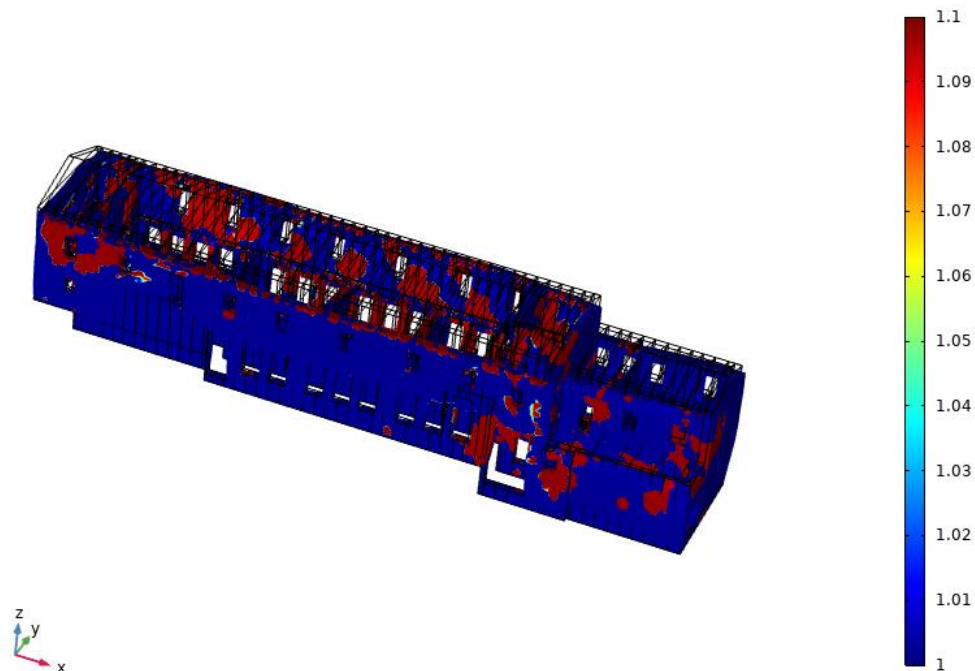
Εικόνα 90: Περιοχές αστοχίας για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό



Εικόνα 91: Περιοχές αστοχίας για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό (λεπτομέρεια στον νότιο όγκο)

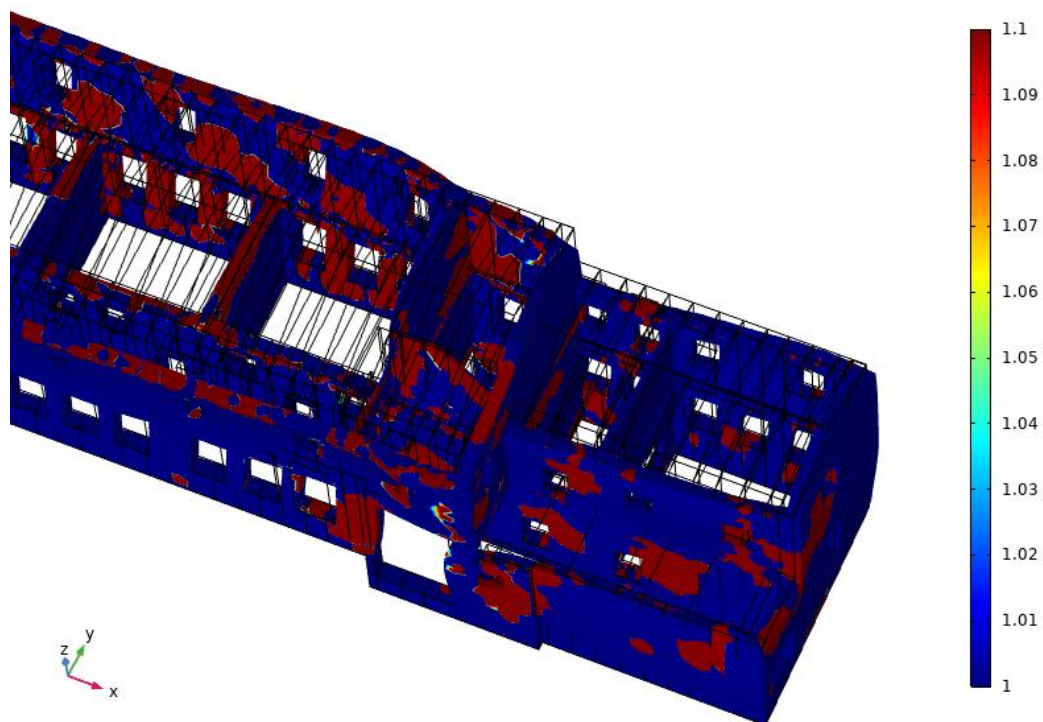
5^{ος} συνδυασμός: $G+0,3Q+0,3SEX+SEY+0,3SEZ$

Surface: Mohr-Coulomb failure index (1)



Εικόνα 92: Περιοχές αστοχίας για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό

Surface: Mohr-Coulomb failure index (1)

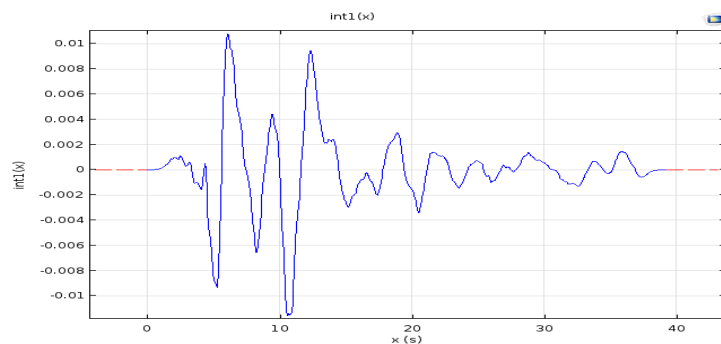


Εικόνα93: Περιοχές αστοχίας για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό (λεπτομέρεια στον νότιο όγκο)

4.3.4. Δυναμική απόκριση κατασκευής σε πραγματικό σεισμικό γεγονός

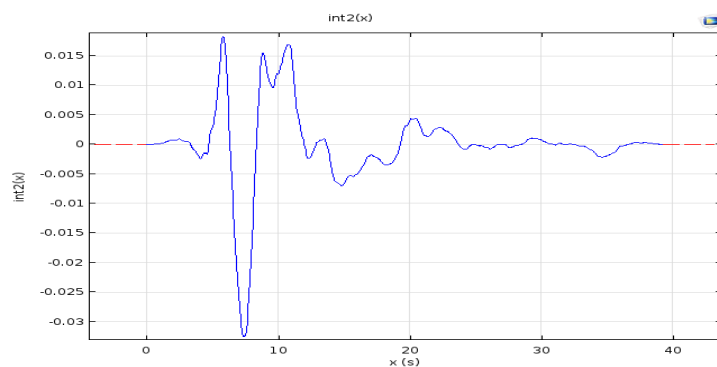
Η εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής ολοκληρώνεται με τη διεξαγωγή δυναμικής απόκρισης σε πραγματικό σεισμικό γεγονός. Χρησιμοποιήθηκαν χρονοϊστορίες μετατόπισης από το σεισμικό γεγονός που συνέβη στην πόλη Irpinia της Ιταλίας το 1980 με σεισμική ένταση 6,69 R. Στην εικόνα 94 απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες κατά X, Y και Z.

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΑΤΑ X



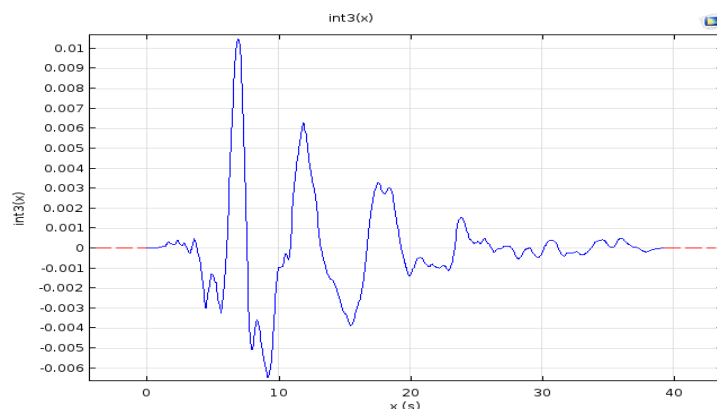
(α)

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΑΤΑ Y



(β)

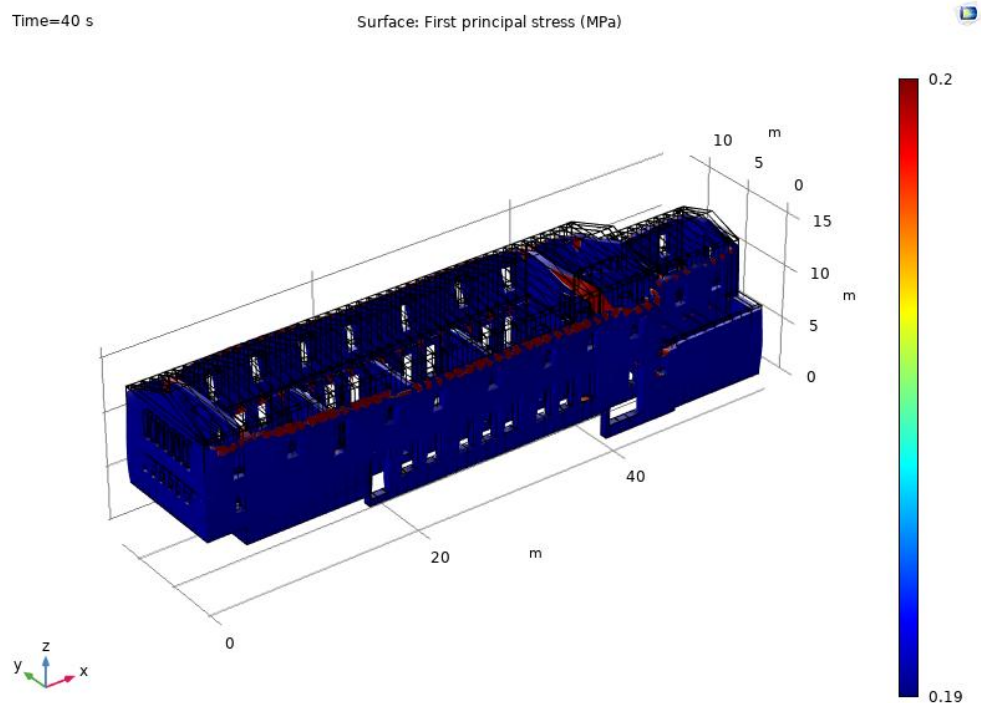
ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΑΤΑ Z



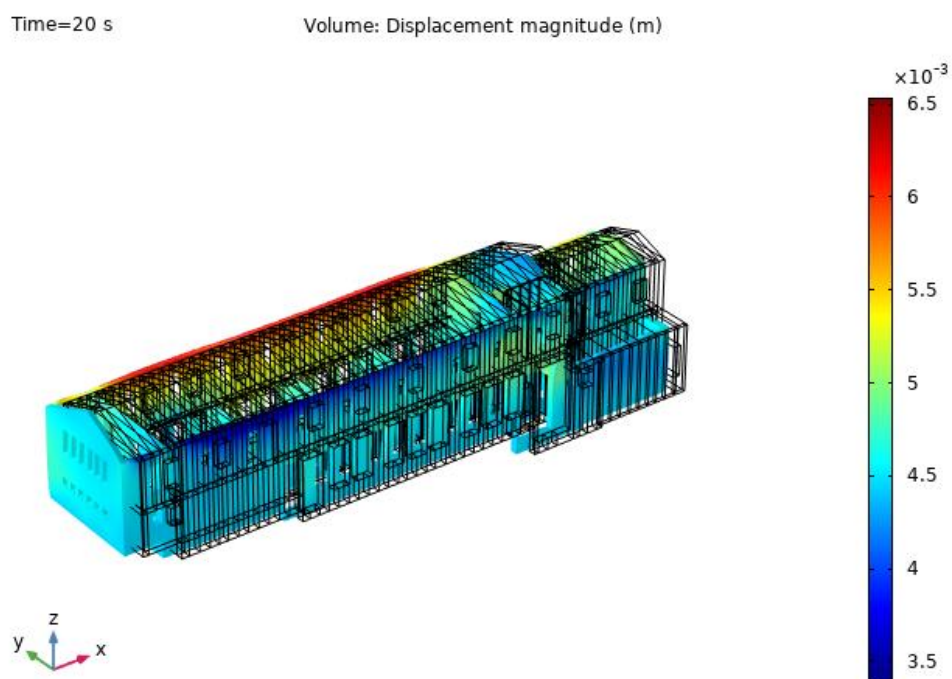
(γ)

Εικόνα 94: Χρονοϊστορίες κατά άξονες X (α) , Y (β) και Z (γ), αντίστοιχα

Στις εικόνες 95-96 παρουσιάζονται αποτελέσματα σε χρόνο 20 sec (με συνολικό χρόνο διέγερσης 39 sec) για τις κύριες ορθές τάσεις και τη συνολική μετατόπιση.

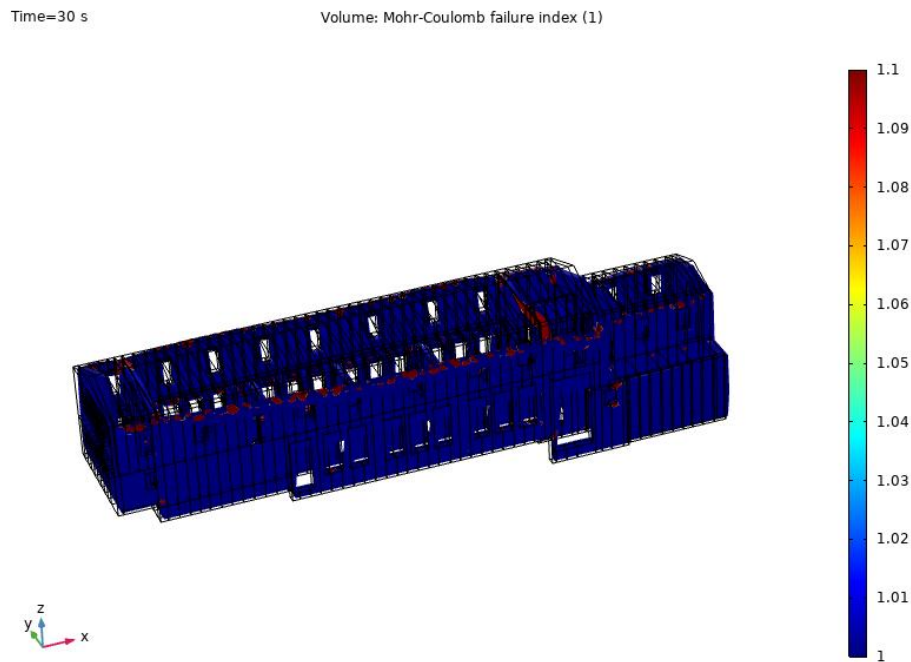


Εικόνα 95: Κύριες ορθές τάσεις στα 20 sec



Εικόνα96: Μετακίνηση στα 20 sec

Στην εικόνα 97 παρουσιάζεται το κριτήριο αστοχίας μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης (εφελκυστική και θλιπτική αντοχή) Mohr Coulomb σε χρόνο 30sec. Οι περιοχές με έντονο χρώμα είναι οι περιοχές αστοχίας που ξεπερνάνε την αντοχή του υλικού. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των υπερβάσεων (μεγαλύτερη τιμή της μονάδας) στις θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με την τοιχοποιία.

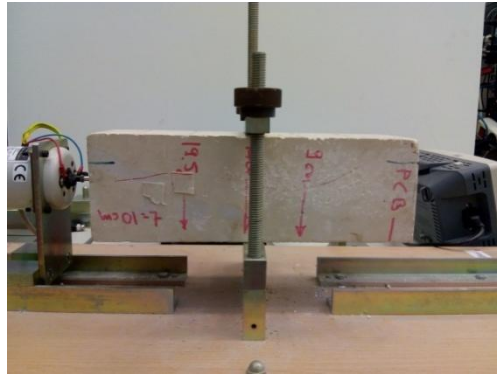
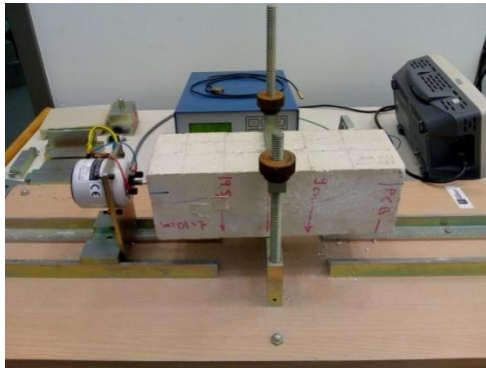


Εικόνα 97: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb στα 30 sec

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Πειραματικές εφαρμογές

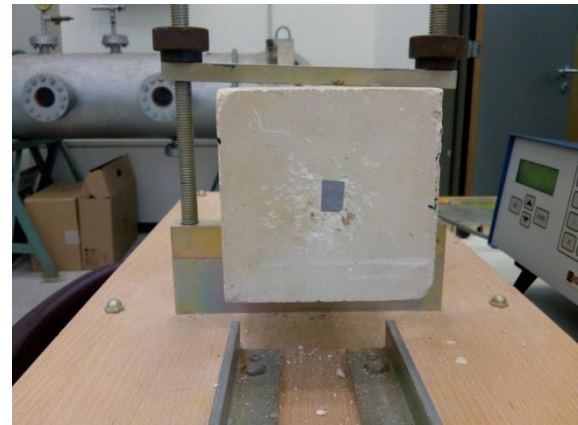
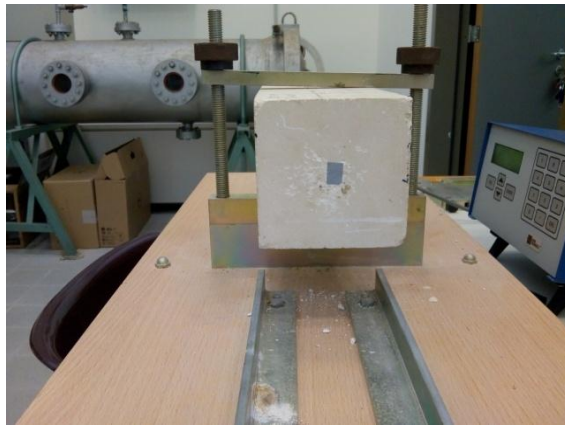
5.1 Πειραματική εφαρμογή σε εργαστηριακές συνθήκες



Εικόνα 98: Πείραμα στο δοκίμιο

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της βελτιστοποίησης με το σύστημα laser PSV-500H (laser vibrometry) σε ένα μεγάλης κλίμακας ιστορικό κτίριο, αρχικά επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί πείραμα σε ένα ασβεστολιθικό δοκίμιο στα πλαίσια εργαστηρίου. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Αντοχής Υλικών στη Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν διαστάσεων 10x10x30cm. Για την διέγερση του δοκιμίου σε μηχανική ταλάντωση είχε τοποθετηθεί στα αριστερά του δοκιμίου όπως φαίνεται και στην εικόνα 98 ένας διεγέρτης ο οποίος είναι ρυθμισμένος να διεγείρει το δοκίμιο από 10Hz έως 12KHz ενώ παράλληλα στο κέντρο το δοκίμιο στηρίζεται.

Το μέτρο ελαστικότητας δόθηκε ως δεδομένο ίσο με 15,99 GPa. Με σκοπό την βελτίωση της ανακλαστικής ικανότητας της επιφάνειας του δοκιμίου έχει τοποθετηθεί επίθεμα ταινίας υψηλής ανακλαστικότητας στο σημείο ελέγχου (εικόνα 99).



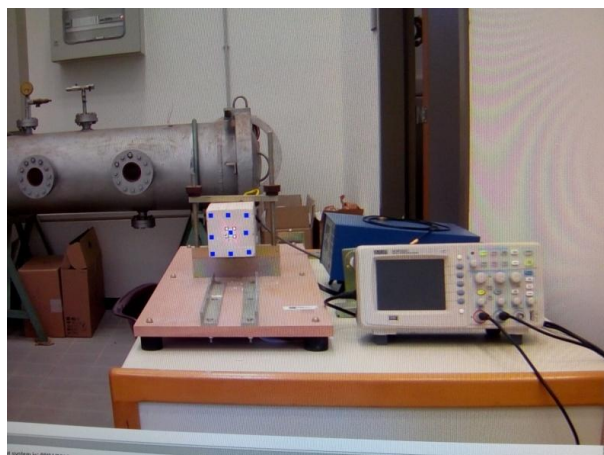
Εικόνα 99: Τοποθέτηση ταινίας ανακλαστικότητας

Η σάρωση της ταχύτητας ταλάντωσης στο δοκίμιο μελέτης πραγματοποιήθηκε με το σύστημα SLDV , PSV 500H της Polytec Inc [2].

Στην εικόνα 100 φαίνεται η κεφαλή Laser η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου στοχεύοντας στα σημεία ελέγχου που διαμορφώνονται από το τριγωνικό πλέγμα σάρωσης (εικόνα 101).



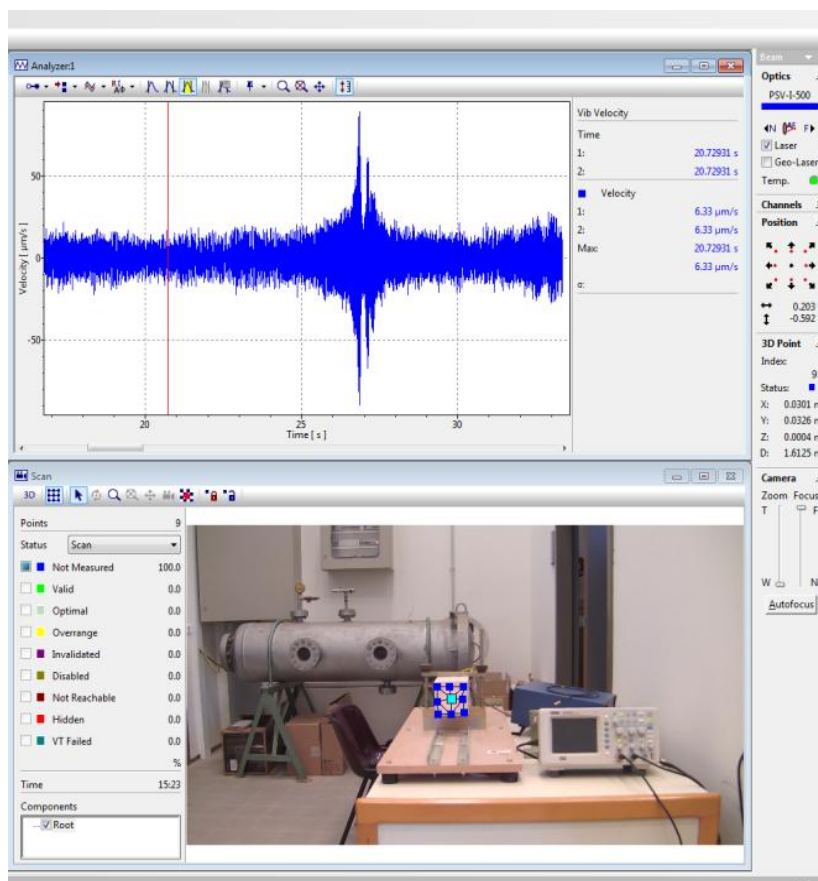
Εικόνα 100: Κεφαλή laser vibrometer



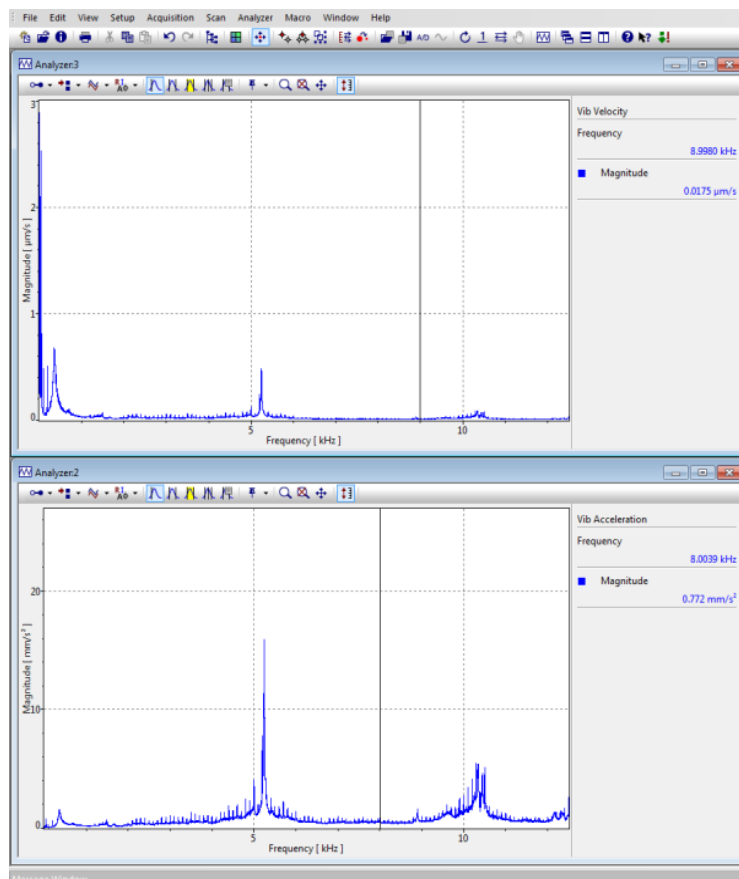
Εικόνα 101: Πειραματική εφαρμογή

Το σύστημα προηγμένης τεχνολογίας laser (laser vibrometry), όπως αναλύθηκε στην θεωρητική επισκόπηση, υπολογίζει την χρονοϊστορία της ταχύτητας ταλάντωσης $v_L(t)$ σε κάθε σημείο του τριγωνικού πλέγματος που δημιουργείται (εικόνα 102). Από τις χρονοϊστορίες ταχύτητας και επιτάχυνσης υπολογίζονται τα φάσματα απόκρισης Fourier $Sv_L(f)=FFT\{v_L\}$, όπου f η συχνότητα υπολογισμού του φάσματος. [57] Στην εικόνα 103 απεικονίζεται η χρονοϊστορία όπως αναδιαμορφώθηκε στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1].

Για την ανάλυση των δεδομένων και τα τελικά φάσματα χρησιμοποιήθηκαν το λογισμικό PSV Scanning Vibrometer Software [77].

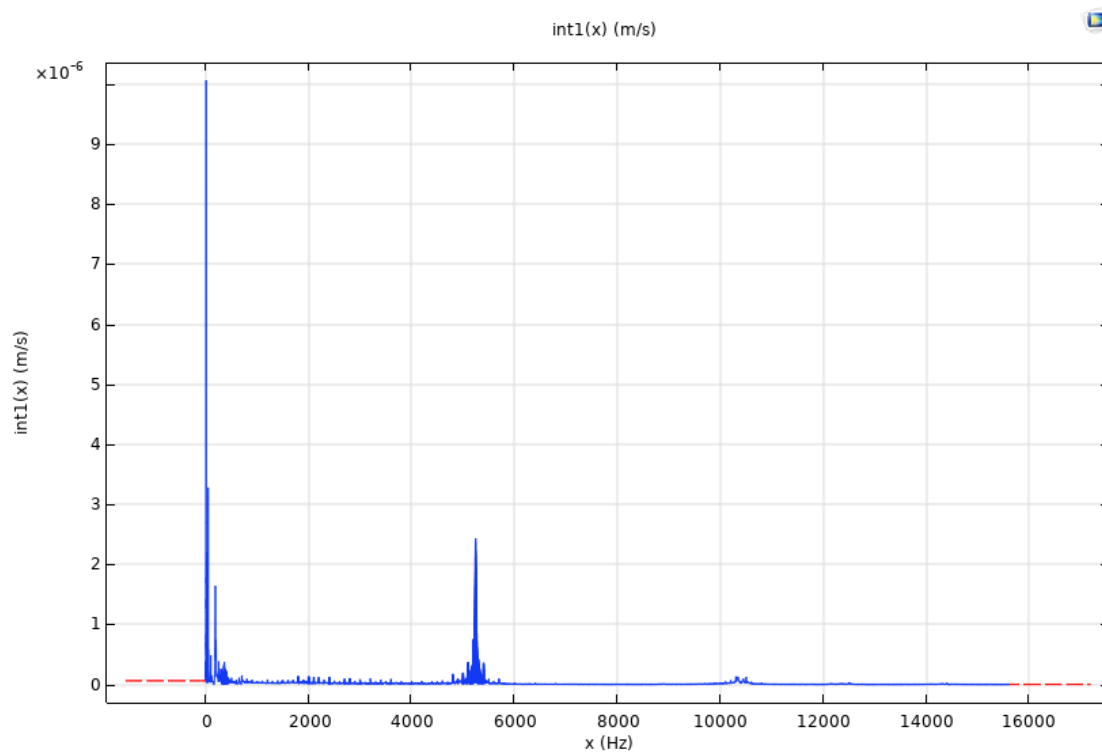


(α)



(B)

Εικόνα 102: Αποτελέσματα από το λογισμικό επεξεργασίας μετρήσεων του laser vibrometer: (α) τριγωνικό πλέγμα και χρονοϊστορία ταχύτητας και (β) φάσμα συχνοτήτων μεταβολής ταχύτητας και επιτάχυνσης



Εικόνα 103: Φάσμα συχνοτήτων στο λογισμικό Comsol Multiphysics

5.2 Πειραματική εφαρμογή στο κτίριο μελέτης



Εικόνα 104: Πειραματική εφαρμογή στην Πρώην Ιερατική Σχολή

Μετά την εφαρμογή της διαδικασίας της βελτιστοποίησης στο εργαστήριο, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της στο πεδίο σε πραγματική κλίμακα και συγκεκριμένα στο κτίριο μελέτης της Πρώην Ιερατικής Σχολής όπου χρησιμοποιήθηκε σε πλήρη ανάπτυξη όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός με κατάλληλες προσαρμογές ως προς τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο. Στο πεδίο, εξ αιτίας της πολυπλοκότητάς του εγχειρήματος αλλά και των διαστάσεων του κτιρίου μελέτης αποφασίσθηκε για τον σκοπό της προτεινόμενης μεθοδολογίας να χρησιμοποιηθούν εκτός του laser vibrometer και ένα σύστημα τριών (3) επιταχυνσιομέτρων της SYSCOM [78].

Τα σημεία στα οποία τοποθετήθηκαν τα επιταχυνσιόμετρα [78] αποτελούσαν τα σημεία μέτρησης και το σημείο που στήθηκε το σύστημα laser PSV-500H (laser vibrometry) ήταν σταθερό και αποτελούσε σημείο αναφοράς. Η κατασκευή λόγω της μεγάλης κλίμακας δεν μπορούσε να διεγερθεί με κάποιο τρόπο και για αυτό επιλέχθηκε η Ιδιομορφική Ανάλυση σε κατάσταση Λειτουργίας (Operational Modal Analysis) κατά την οποία η κατασκευή διεγείρεται από ατμοσφαιρικά αίτια.

Στην εικόνα 104 φαίνεται το στήσιμο του laser vibrometer εξωτερικά του κτιρίου μελέτης, στο σημείο αναφοράς όλων των μετρήσεων. Το laser καταγράφει την ταχύτητα στην κατεύθυνση της ακτίνας και αναλύεται σε συνιστώσες X,Y και Z λαμβάνονται υπόψη την γωνία ως προς αυτούς τους τρεις άξονες που υπολογίζεται αυτόματα από το laser vibrometer.

Η μετρητική διάταξη των επιταχυνσιόμετρων [78] αποτελούνταν από τις εξής συσκευές:

1. Τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο ήταν ενσωματωμένο κατάλληλο λογισμικό διαχείρισης της «συσκευής συντονισμού».
2. Τους τρεις «αισθητήρες επιτάχυνσης MS2005+ («MS»))» (επιταχυνσιόμετρα) σε τρεις άξονες X, Y και Z (εικόνα 105).
3. Τη συσκευή καταγραφικού «MR2002» («MR») (εικόνα 106) στην οποία πραγματοποιήθηκε η λήψη, η αποθήκευση και η μεταφορά του σήματος του αισθητήρα στην «συσκευή συντονισμού»
4. Τη «συσκευή συντονισμού NCC (Network Control Center)» (εικόνα 106) που ήταν συνδεδεμένη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και τα καταγραφικά για να λειτουργούν ταυτόχρονα και συντονισμένα.

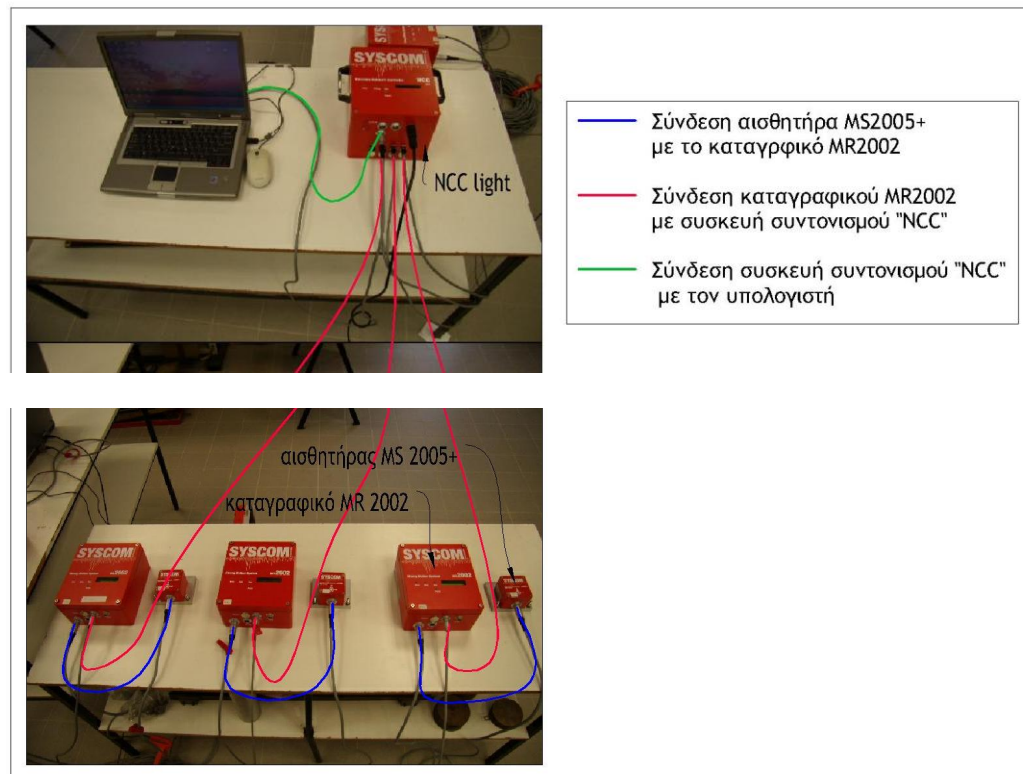


Εικόνα 105: Αισθητήρες επιτάχυνσης MS (επιταχυνσιόμετρα)



Εικόνα 106: Αριστερά η συσκευής καταγραφικού MR, δεξιά συσκευής συντονισμού «NCC light»

Οι αισθητήρες MS (επιταχυνσιόμετρα) αρχικά συνδέθηκαν με το «καταγραφικό MR», την «συσκευή διαχείρισης NCC» και η «συσκευή διαχείρισης» με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στην εικόνα 107 απεικονίζεται η συνδεσμολογία όπως πραγματοποιήθηκε αρχικά στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών. Με τον ίδιο τρόπο έγινε και στην Πρώην Ιερατική Σχολή που είναι το κτίριο μελέτης (εικόνες 108-109).



Εικόνα 107: Συνδεσμολογία συστήματος επιταχυνσιομέτρων



Εικόνα 108: Τοποθέτηση συσκευής επιταχυνσιομέτρων στην Πρώην Ιερατική Σχολή

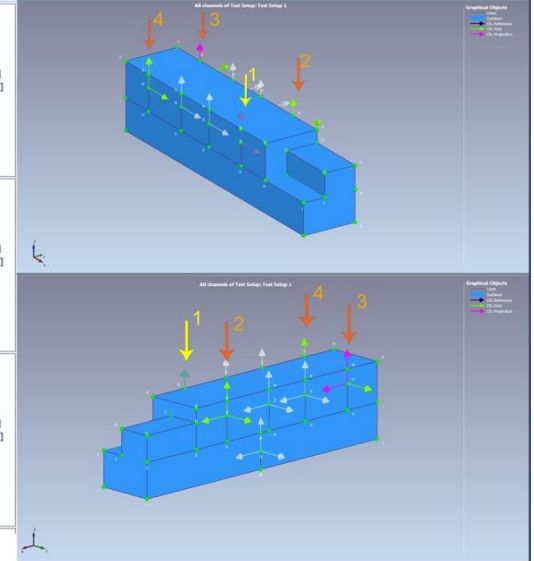
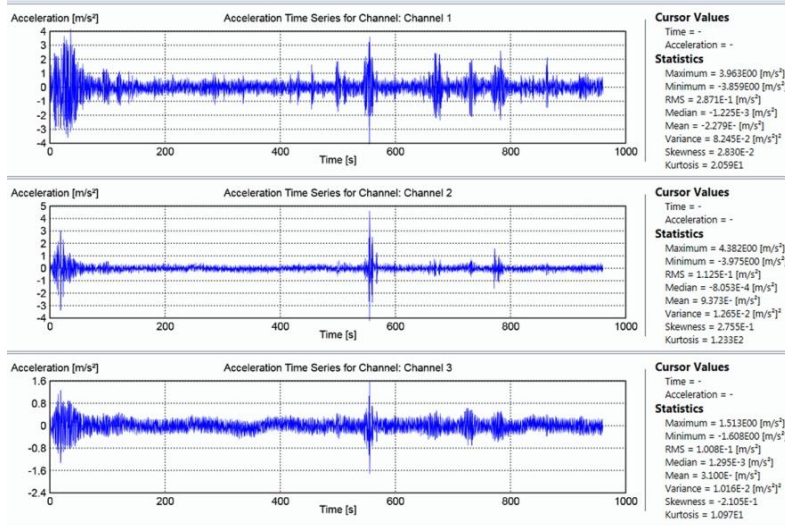


Εικόνα 109: Τοποθέτηση αισθητήρα επιτάχυνσης στην Πρώην Ιερατική Σχολή

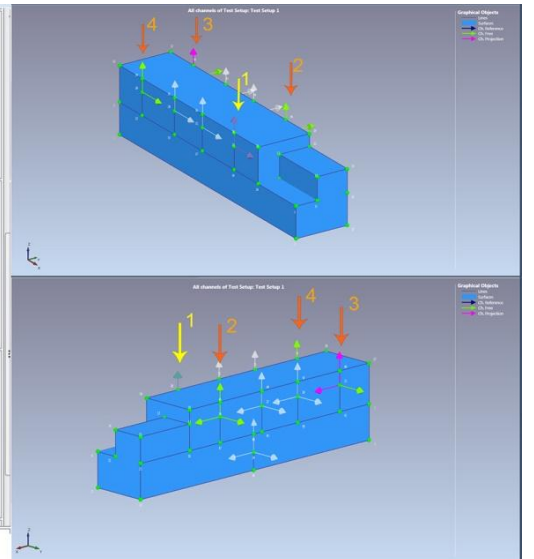
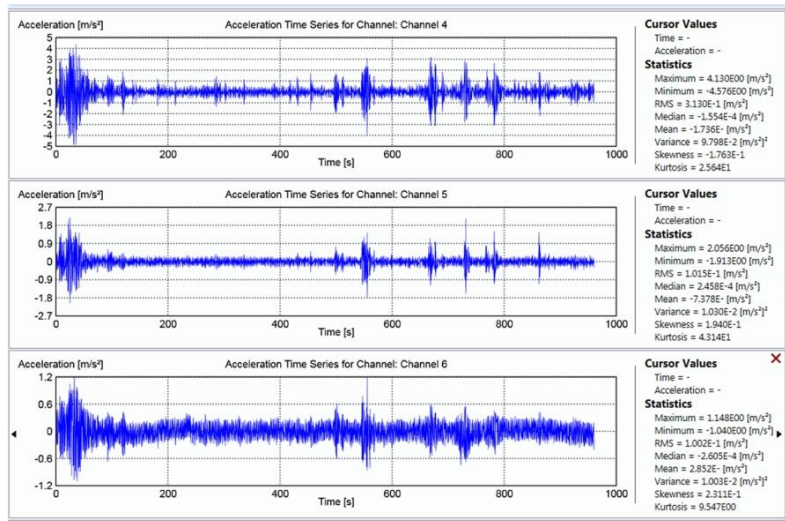
Στο πεδίο, συνολικά επιλέχθηκαν τρεις θέσεις τοποθέτησης των επιταχυνσιομέτρων [78] ενώ το laser vibrometer τοποθετήθηκε σε σταθερό σημείο αναφοράς. Για κάθε εγκατάσταση, τα σημεία (1,2,3,4) που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες φαίνονται στις επόμενες εικόνες (εικόνες 110-121), δεξιά από κάθε αποτέλεσμα.

Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες και το laser vibrometer εισάγονται στο λογισμικό ARTeMIS Modal [6] και στις εικόνες 110-121 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης υπό μορφή γραφήματος όπως προέκυψαν σε τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης των επιταχυνσιομέτρων ενώ το laser vibrometry παρέμεινε σταθερό στη θέση του. Η χρονοϊστορία καταγραφής της ταχύτητας με το laser vibrometer μετατρέπεται και στις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης σε χρονοϊστορία επιτάχυνσης. Έτσι, τελικά, όλα τα κανάλια καταγραφής που επεξεργάζονται στο λογισμικό ARTeMIS Modal [6] περιέχουν κατά σειρά την χρονοϊστορία επιτάχυνσης του laser vibrometer στους άξονες X,Y και Z και εν συνεχεία την χρονοϊστορία επιτάχυνσης των υπολοίπων τριών επιταχυνσιομέτρων στους άξονες X, Y και Z, αντίστοιχα. Το σημείο 1 αποτελεί την θέση στάθμευσης του laser vibrometer και τα σημεία 2, 3 και 4 είναι οι θέσεις τοποθέτησης των επιταχυνσιομέτρων οι οποίες σε κάθε εγκατάσταση εναλλάσσονται.

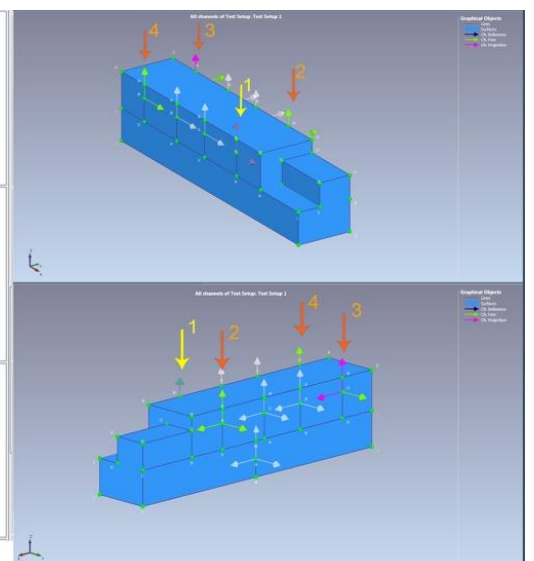
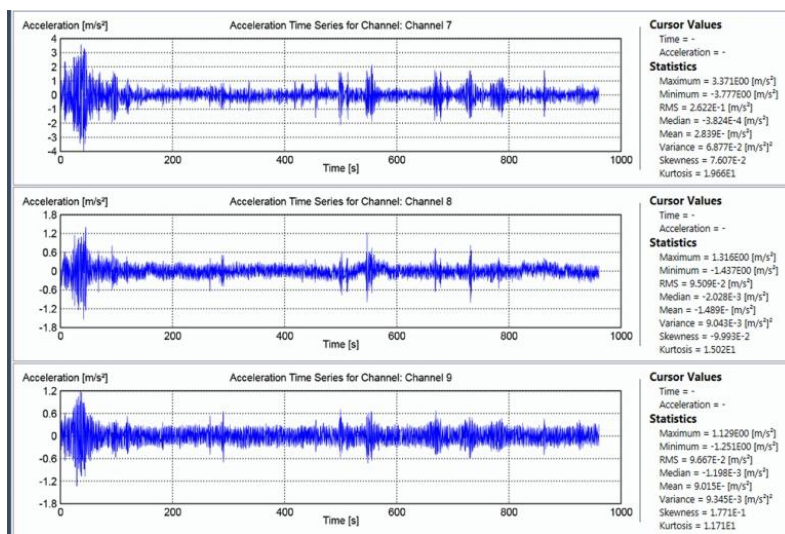
1^η θέση τοποθέτησης (set up 1)



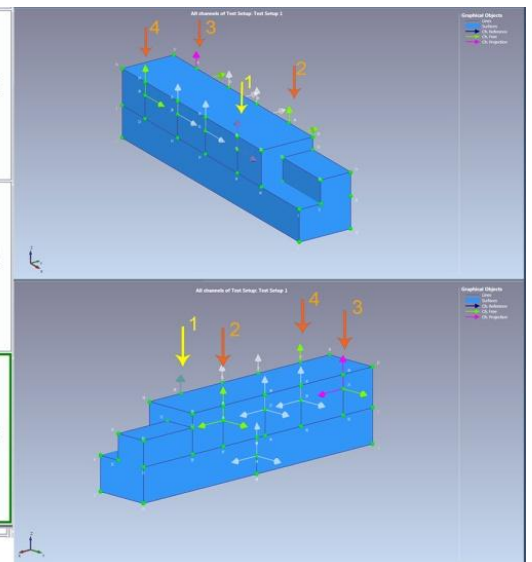
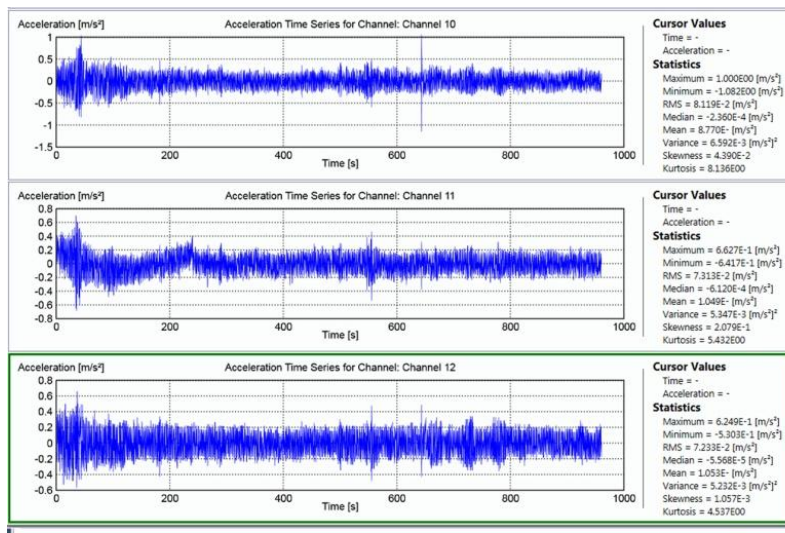
Εικόνα 110: Κανάλια 1-3 για το σημείο 1 - για X, Y και Z, αντίστοιχα



Εικόνα 111: Κανάλια 4-6 για το σημείο 2 -για X, Y και Z, αντίστοιχα

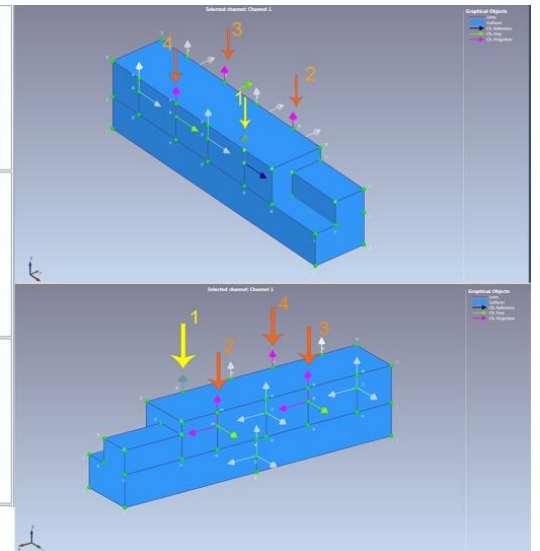
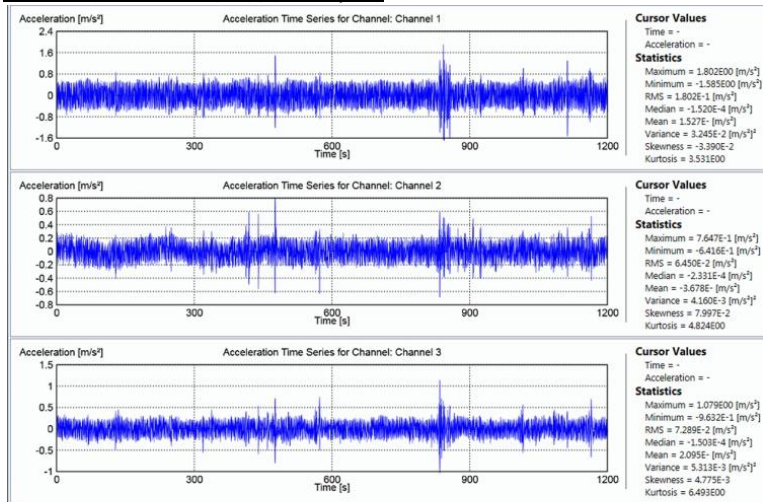


Εικόνα 112: Κανάλια 7-9 για το σημείο 3-για X, Y και Z, αντίστοιχα

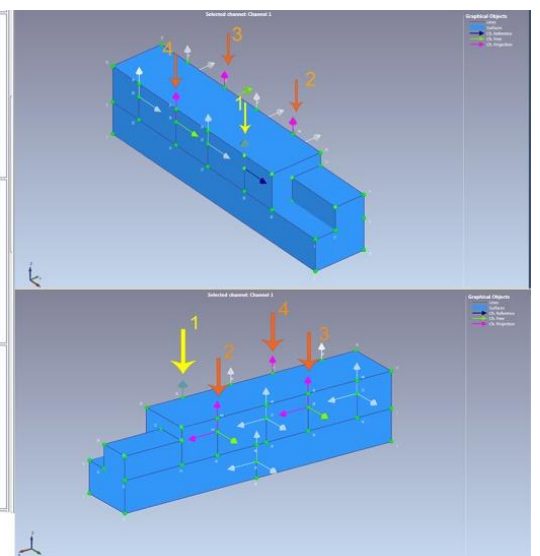
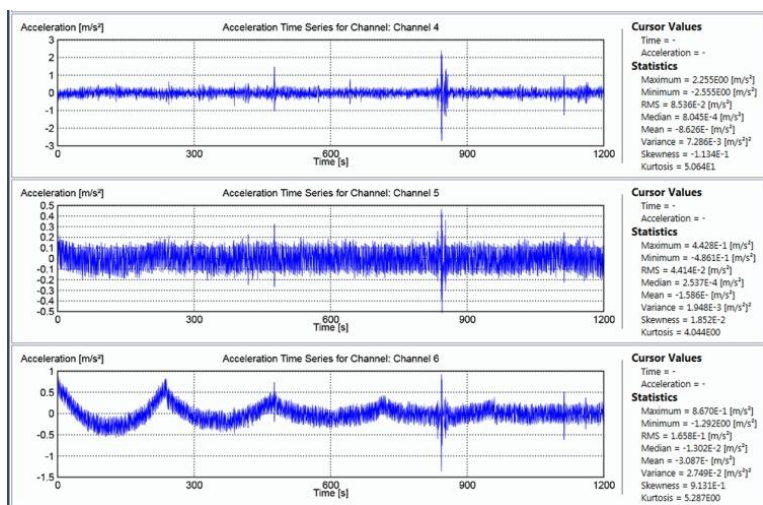


Εικόνα 113: Κανάλια 10-12 για το σημείο 4-για X, Y και Z, αντίστοιχα

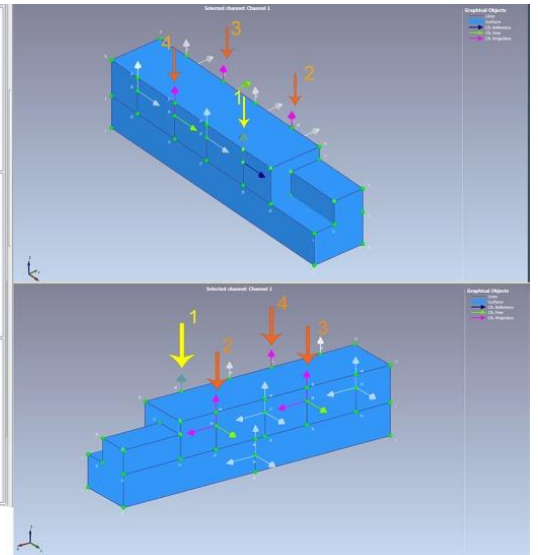
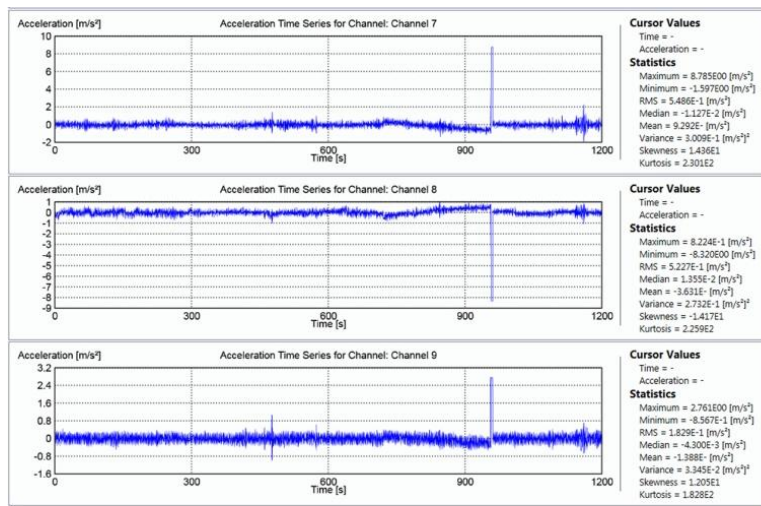
2^η θέση τοποθέτησης (set up 2)



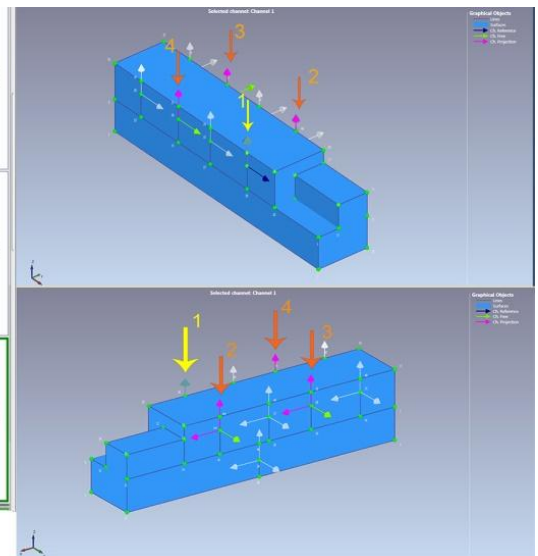
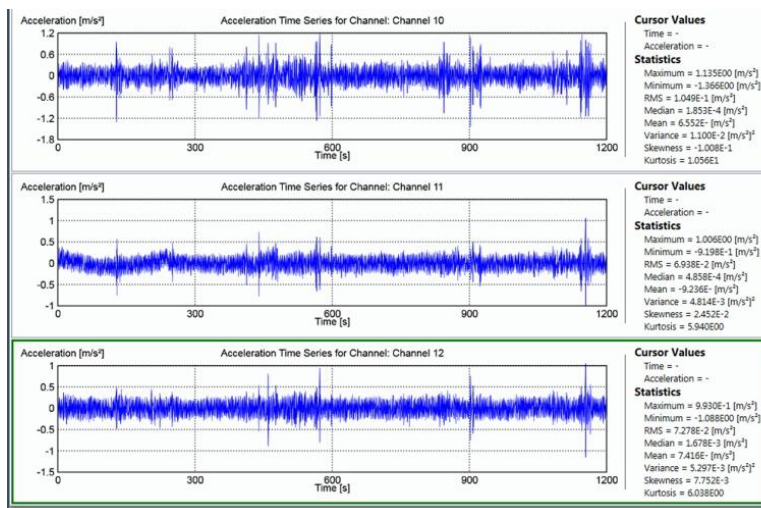
Εικόνα 114: Κανάλια 1-3 για το σημείο 1-για X, Y και Z, αντίστοιχα



Εικόνα 115: Κανάλια 4-6 για το σημείο 2-για X, Y και Z, αντίστοιχα

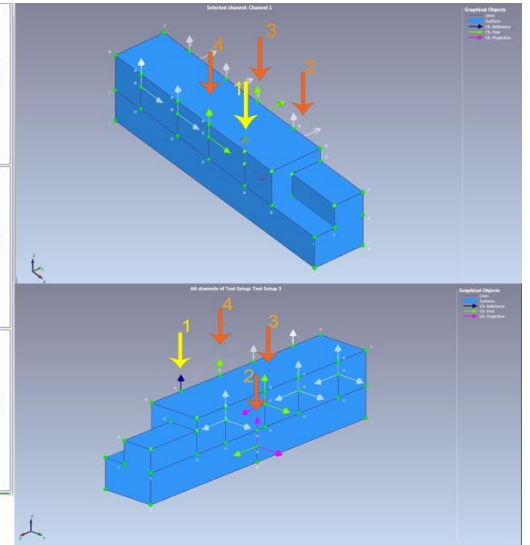
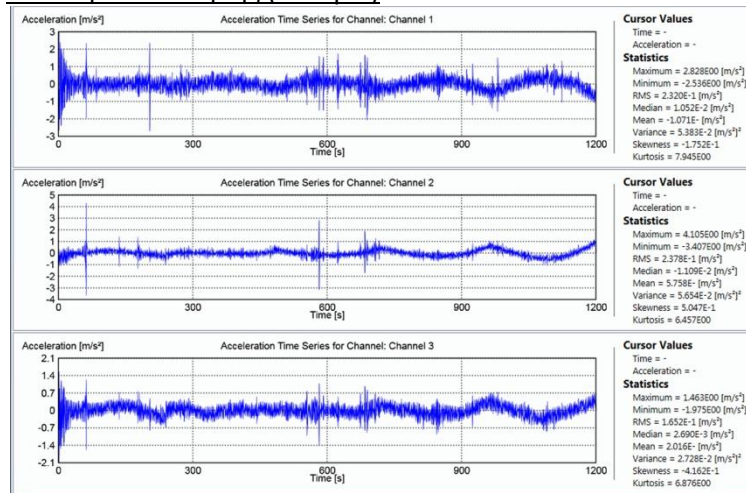


Εικόνα 116: Κανάλια 7-9 για το σημείο 3-για X, Y και Z, αντίστοιχα

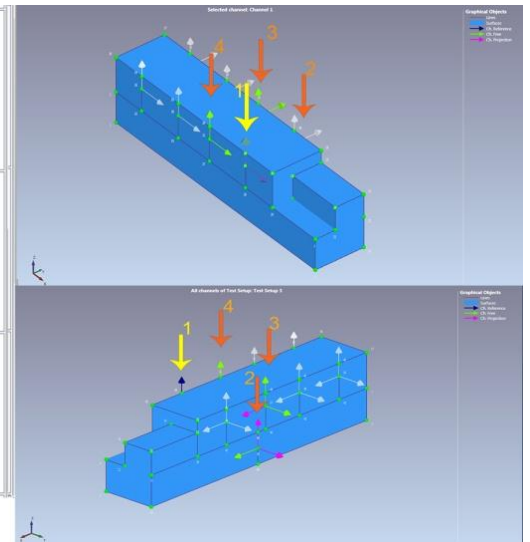
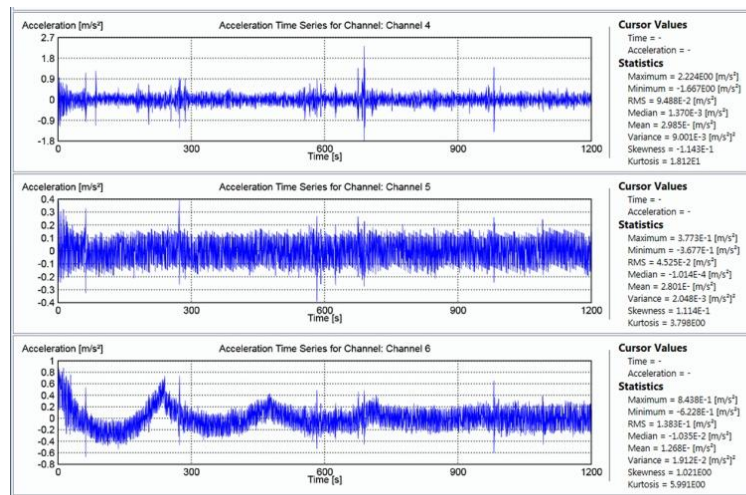


Εικόνα 117: Κανάλια 10-12 για το σημείο 4-για X, Y και Z αντίστοιχα

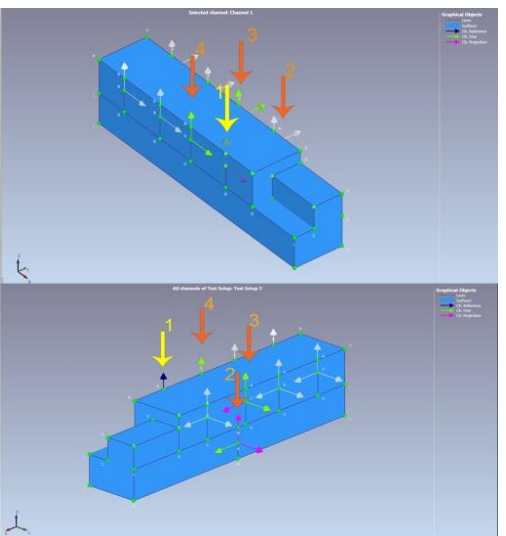
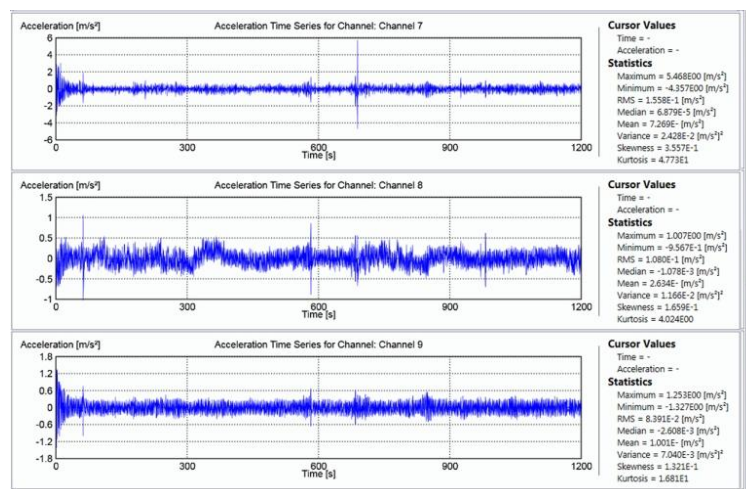
3^η Θέση τοποθέτησης (set up 3)



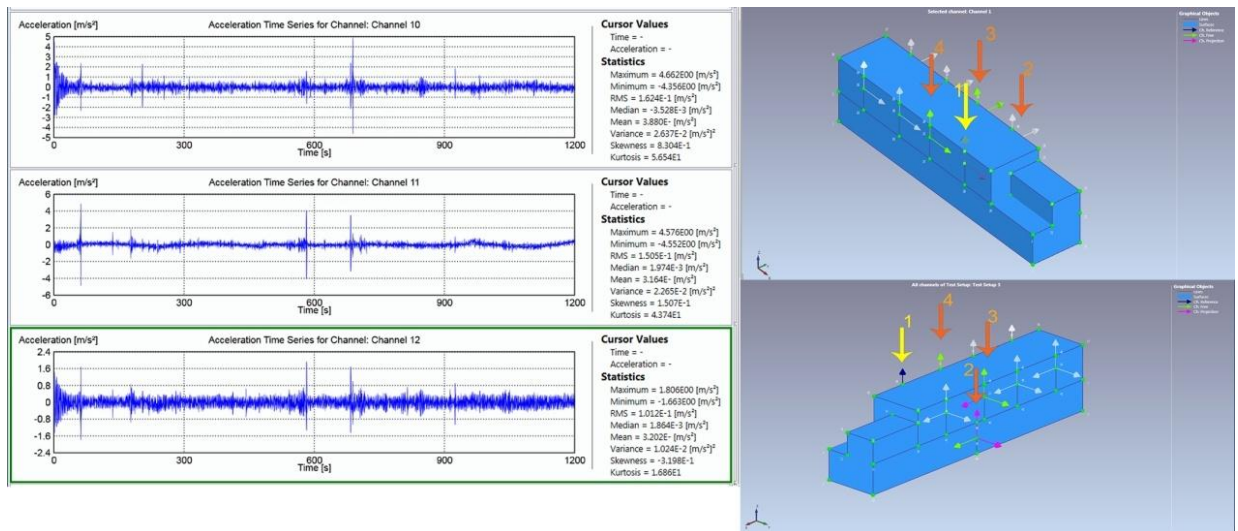
Εικόνα 118: Κανάλια 1-3 για το σημείο 1-για X, Y και Z, αντίστοιχα



Εικόνα 119: Κανάλια 4-6 για το σημείο 2-για X, Y και Z, αντίστοιχα

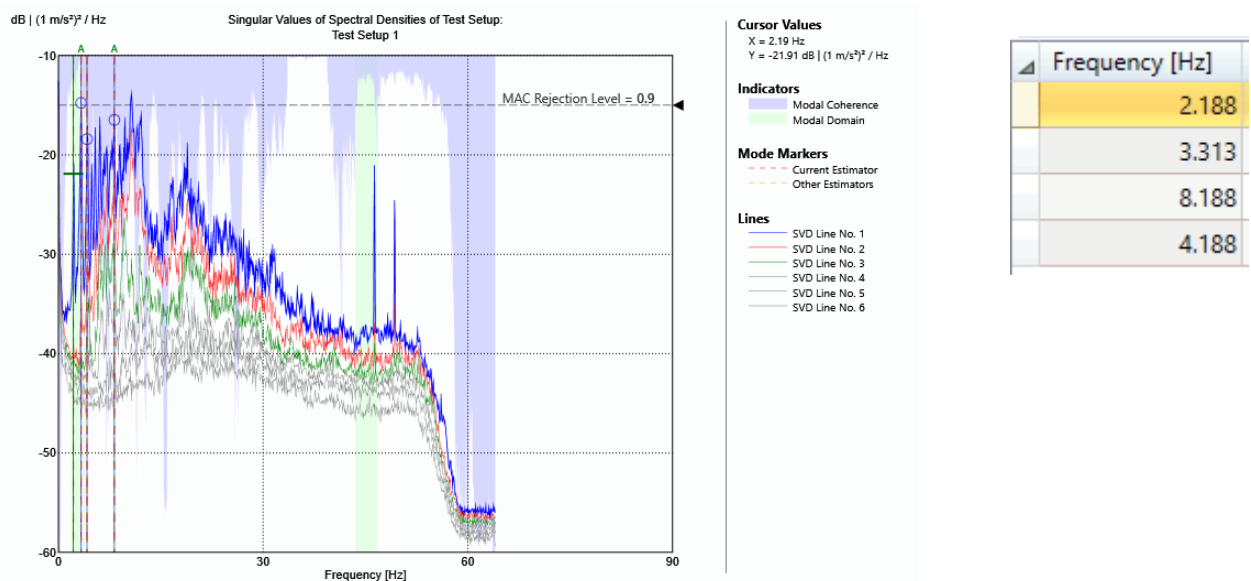


Εικόνα 120: Κανάλια 7-9 για το σημείο 3-για X, Y και Z, αντίστοιχα



Εικόνα 121: Κανάλια 10-12 για το σημείο 4-για X, Y και Z, αντίστοιχα

Παρακάτω, στην εικόνα 122 παρατίθενται τα αποτελέσματα των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής που απεικονίζονται σε μορφή γραφήματος όπως υπολογίστηκαν στο λογισμικό ARTeMIS Modal [6].



Εικόνα 122: Φάσμα συχνοτήτων καναλιών

Οι ιδιοσυχνότητες που εντοπίστηκαν είναι οι εξής:

1. 2,188 Hz
2. 3,313 Hz
3. 4,188 Hz
4. 8,188 Hz

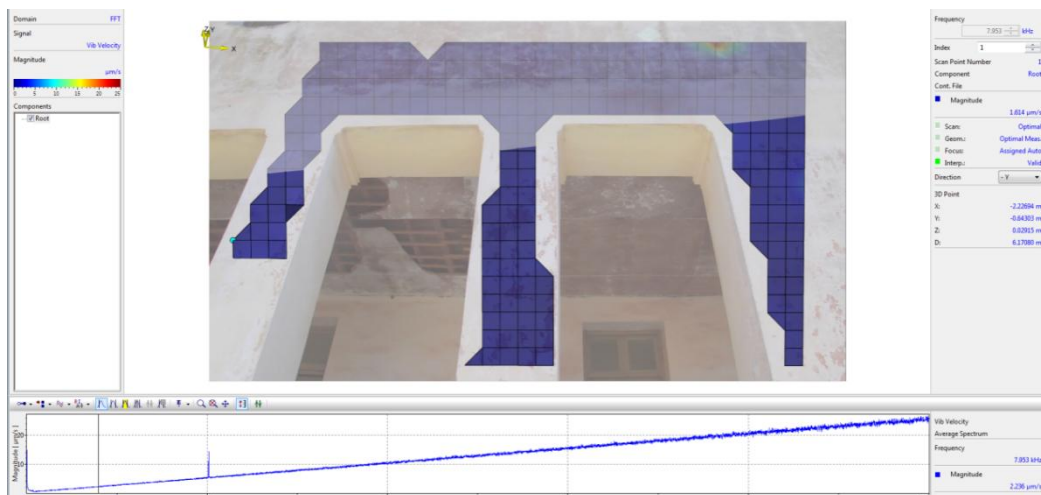
Όπως είχε αναφερθεί στην ανάπτυξη του θεωρητικού υποβάθρου, για κάθε συχνότητα μπορούν να δημιουργηθούν χρωματικοί χάρτες οι οποίοι αποδίδουν την κατανομή του πλάτους της φασματικής ταχύτητας ταλάντωσης στο κτίριο μελέτης. [61]

Έτσι, το laser vibrometer στήθηκε σε διάφορα σημεία εσωτερικά του κτιρίου (εικόνα 123) στοχεύοντας σε αποσαθρωμένες περιοχές της κατασκευής ώστε να διερευνηθούν οι χρωματικοί χάρτες που διεξάγονται με το λογισμικό ARTeMIS Modal [6].

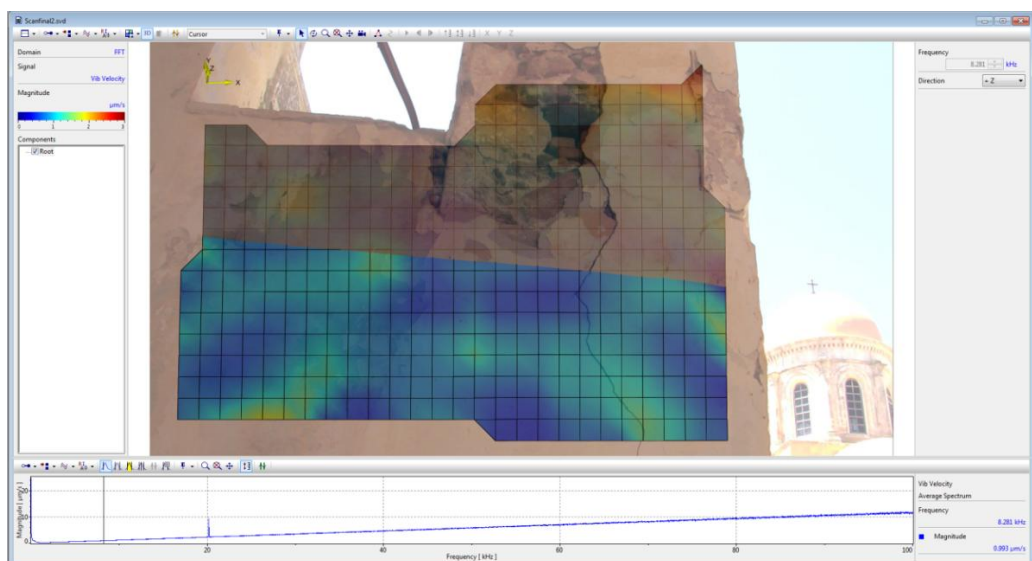


Εικόνα 123: Τοποθέτηση του laser vibrometer εσωτερικά του κτιρίου

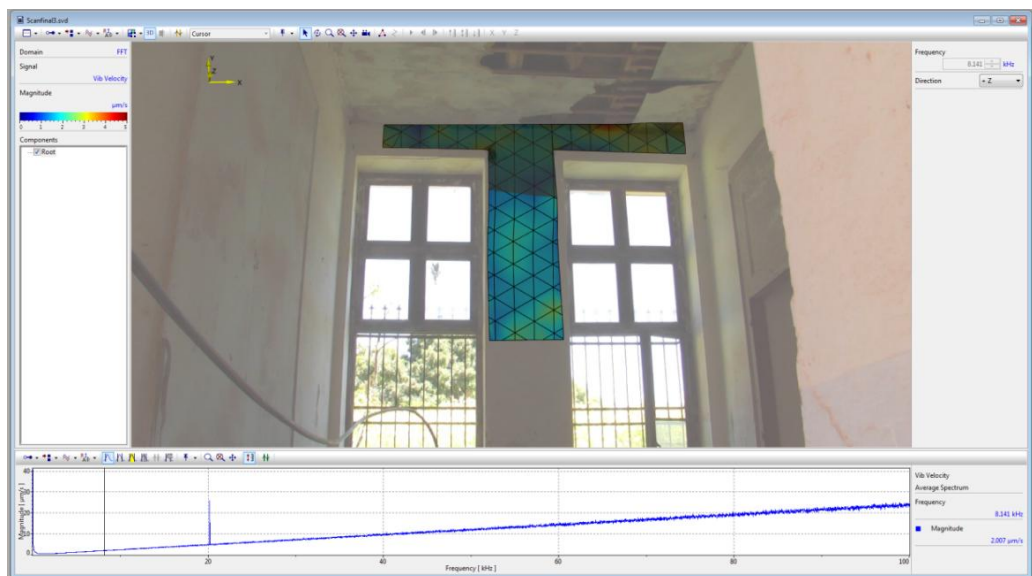
Επισημαίνεται ότι παρατηρώντας τους χρωματικούς χάρτες η κατανομή του πλάτους της φασματικής ταχύτητας που αντιστοιχεί κοντά στην ιδιοσυχνότητα $f=8,188\text{kHz}$ έχει μεγάλες τιμές και πολλά σημεία απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ιδιοσυχνότητα που βρέθηκε από το λογισμικό ARTeMIS Modal [6]. Οι χρωματικοί χάρτες αυτοί φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες (εικόνες 124-126).



Εικόνα 124: Χρωματικός χάρτης στην περιοχή των πεσσών στην δυτική όψη του κτιρίου



Εικόνα 125: Χρωματικός χάρτης σε ρηγματωμένη περιοχή



Εικόνα 126: Χρωματικός χάρτης σε αποσαθρωμένη περιοχή εσωτερικά του κτιρίου

Κεφάλαιο 6^ο

Βελτιστοποίηση

6.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο της παρουσίασης του θεωρητικού υποβάθρου, στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε μία ολοκληρωμένη διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία βασίζεται στη συνεχή αναθεώρηση των παραμέτρων του υπολογιστικού μοντέλου με τα αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται με στόχο το προσομοίωμα της κατασκευής να ανταποκρίνεται περισσότερο στα πειραματικά δεδομένα.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται αυτόματα με ενσωματωμένη δυνατότητα παρόμοιας ανάλυσης που παρέχεται στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1]. Στην εικόνα 127 απεικονίζεται ολόκληρη η διαδικασία της βελτιστοποίησης που ακολουθήθηκε με διαγραμματική απεικόνιση.

Αρχικά, κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, η επιλογή της κατάλληλης **παραμέτρου ευαισθησίας** οι οποία θα εισαχθεί στην ανάλυση με ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών είναι σημαντική και βασίζονται κυρίως στην κρίση του μηχανικού και στην φυσική/μηχανική τους σημασία. Στην συνέχεια, πρέπει να γίνει επιλογή συγκεκριμένων **παραμέτρων** της συμπεριφοράς του κτιρίου μελέτης που επηρεάζονται από την παράμετρο ευαισθησίας και θα μεταβάλλονται έως ότου προσεγγιστούν κατάλληλα με τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν πειραματικά. Η προσέγγιση αυτή γίνεται με την ελαχιστοποίηση κατάλληλης **αντικειμενικής συνάρτησης (objective function)**. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ της δυναμικής μηχανικής συμπεριφοράς ενός δομικού φορέα που εκφράζεται μέσω των ιδιοσυχνοτήτων του με το Μέτρο Ελαστικότητας του υλικού του φορέα, επιλέχθηκε για την διαδικασία βελτιστοποίησης το **μέτρο ελαστικότητας** ως η παράμετρος ευαισθησίας κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι **ιδιοσυχνότητες** που θα βρεθούν από την

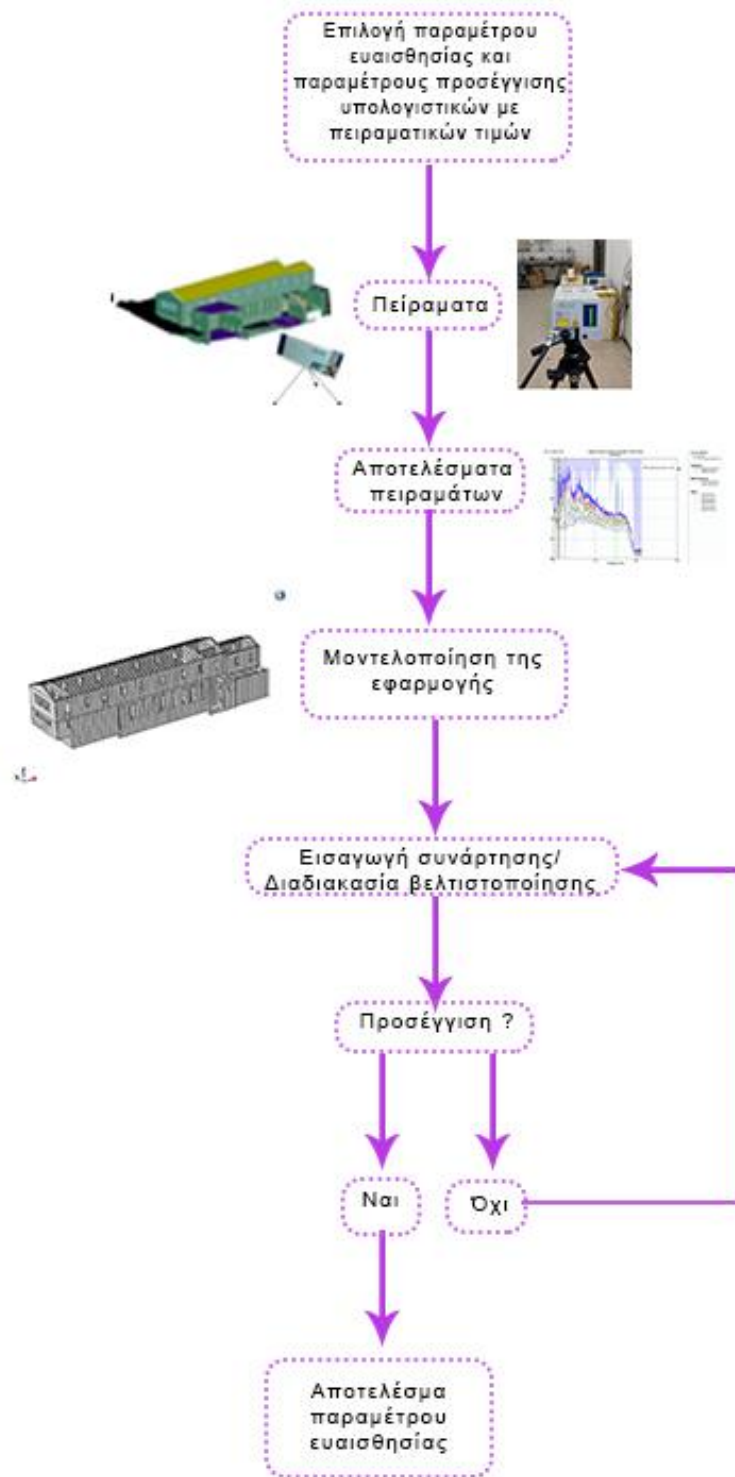
διαδικασία της ιδιομορφικής ανάλυσης να προσεγγιστούν κατά το δυνατόν με τις συχνότητες που μετρήθηκαν πειραματικά με το laser vibrometer.

Αρχικά, για την κατανόηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και την μείωση των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν στο πεδίο επιχειρήθηκε μία δοκιμαστική εφαρμογή της διαδικασίας στο εργαστήριο με το ίδιο δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5.1(ΦΑΣΗ 1) Η εφαρμογή της διαδικασίας της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1] .

Στην συνέχεια (ΦΑΣΗ 2), μετά την εφαρμογή της διαδικασίας στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της διαδικασίας στο πεδίο σε πραγματική κλίμακα και συγκεκριμένα στο κτίριο μελέτης της Πρώην Ιερατικής Σχολής. Τα δεδομένα από τις μετρήσεις εισάγονται στο λογισμικό ARTeMIS Modal [6] και εξάγονται οι πραγματικές ιδιοσυχνότητες του κτιρίου μελέτης. Για την βελτιστοποίηση, επιλέγονται οι κατάλληλες πραγματικές ιδιοσυχνότητες από το λογισμικό ARTeMIS Modal [6] και έπειτα εισάγονται στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1]. Με την κατάλληλη **αντικειμενική συνάρτηση (objective function)** το πρόγραμμα αυτόματα με συνεχείς επαναλήψεις ανιχνεύει την παράμετρο ευαισθησίας (Μέτρο Ελαστικότητας) με την οποία πραγματοποιείται η βέλτιστη προσέγγιση των πειραματικών με των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Μετά την διαδικασία προσέγγισης των παραμέτρων, η διαδικασία καταλήγει στο τελικό αποτέλεσμα παραμέτρου ευαισθησίας που συμβάλλει στην σύγκληση των πειραματικών με υπολογιστικών τιμών.

Για την σύγκριση σε σχέση με τα αρχικά αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ώστε να παρατηρηθεί εάν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων πριν την αλλαγή της παραμέτρου και μετά την αλλαγή.



Εικόνα 127: Διαγραμματική απεικόνιση της βελτιστοποίησης

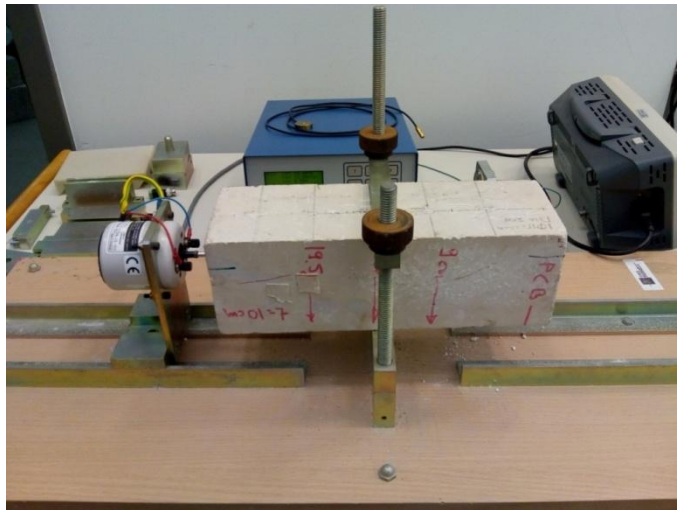
6.2. Βελτιστοποίηση στις εργαστηριακές συνθήκες

Για την διαδικασία της βελτιστοποίησης του προσομοιώματος του δοκιμίου σε συνθήκες εργαστηρίου η διαδικασία πραγματοποιείται με ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων (frequency domain).

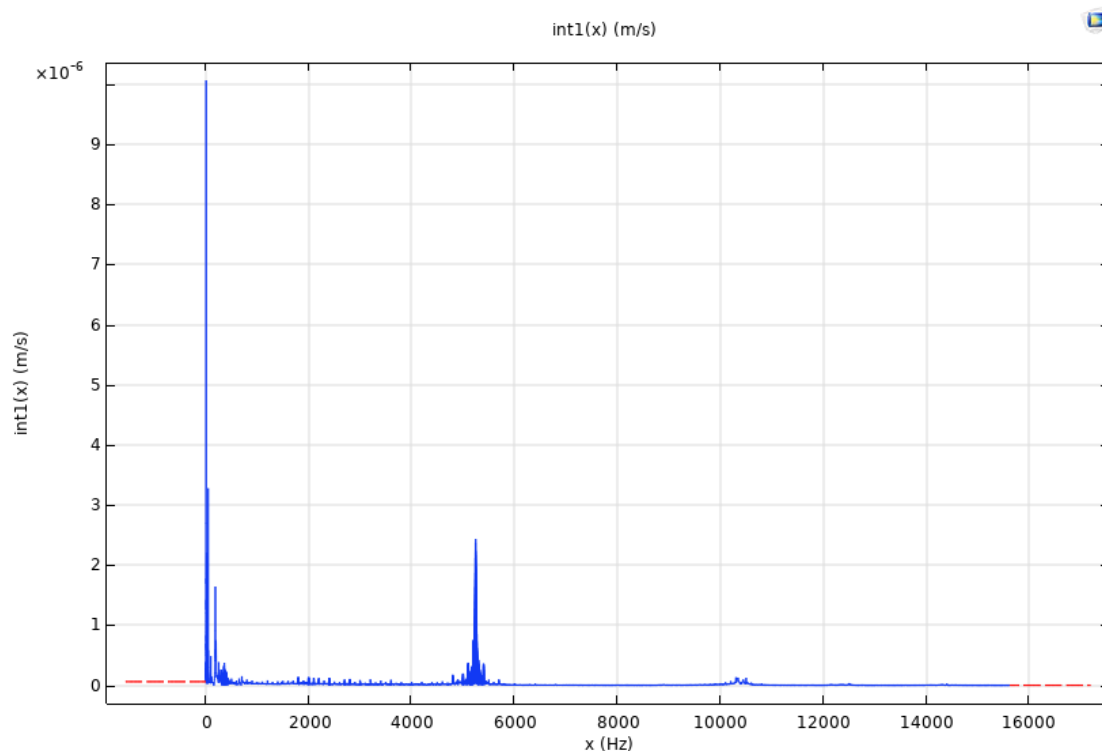
Σε θεωρητικό πλαίσιο, η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόκρισης ενός γραμμικού ή μη γραμμικού μοντέλου που υποβάλλεται σε αρμονική διέγερση για μία ή περισσότερες συχνότητες. Για παράδειγμα, στη μηχανική στερεών, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόκρισης συχνότητας μιας κατασκευής σε συγκεκριμένες κατανομές φορτίων και συχνοτήτων. Ακόμη, κατά την ανάλυση αυτή, λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα όλων των ιδιομορφών που υπολογίζονται από την κατάλληλη διακριτοποίηση και ο τρόπος με τον οποίο οι συχνότητες συνδέονται με τα εφαρμοζόμενα φορτία ή τις διεγέρσεις. [79]

Κατά τη διάρκεια του πειράματος στις εργαστηριακές συνθήκες, στο δοκίμιο εφαρμόζεται εξαναγκασμένη ταλάντωση που προκαλείται από ένα διεγέρτη (actuator) όπως απεικονίζεται στην εικόνα 128 και δημιουργείται διαμήκης μηχανικό κύμα το οποίο κατά την διάδοση του σε όλη την μάζα του δοκιμίου καταφτάνει στην άλλη άκρη του δοκίμου όπου η δόνηση που παράγεται σε όλη την επιφάνεια της άκρης αυτής καταγράφεται σαν μεταβολή της ταχύτητας κίνησης στο σημείο όπου σημαδεύει η ακτίνα laser του laser vibrometer. Η μεταβολή της ταχύτητας μετατρέπεται σε φάσμα συχνοτήτων μεταβολής της ταχύτητας όπως φαίνεται στην εικόνα 129.

Σε κτίριο μελέτης μεγάλης κλίμακας απαιτούνται περισσότερες δοκιμές καθώς για την δημιουργία του φάσματος συχνοτήτων της κατασκευής, η διέγερση της κατασκευής και η μεταφορά κύματος από την μία άκρη του κτιρίου στην άλλη είναι δύσκολη. Γι αυτό τον λόγο η βελτιστοποίηση του προσομοιώματος του κτιρίου μελέτης πραγματοποιείται με την διαδικασία της ιδιομορφικής ανάλυσης με OMA κατά την οποία δεν χρειάζεται διέγερση.



Εικόνα 128: Ταλάντωση δοκιμίου στο πείραμα εφαρμογής στο εργαστήριο



Εικόνα 129: Φάσμα συχνοτήτων μεταβολής ταχύτητας από το πείραμα εφαρμογής στο δοκίμιο

Στην εικόνα 130 φαίνεται η διακριτοποίηση μετά τη μοντελοποίηση του δοκιμίου με εισαγωγή σημειακού φορτίου ως διεγέρτη και στήριξη στο κέντρο. Σημειώνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει ήδη υπολογιστεί με μη καταστροφικούς ελέγχους στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής & Αντοχής Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Ως δεδομένο εισάγεται το φάσμα συχνοτήτων (εικόνα 129) που μετρήθηκε από το πείραμα όπως αναδιαμορφώθηκε στο COMSOL Multiphysics και οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που βρίσκονται από το

φάσμα. Με κατάλληλη εξίσωση (σχ.2), η οποία αναγράφεται παρακάτω, πραγματοποιείται αυτόματα η διαδικασία της προσέγγισης του υπολογιστικού φάσματος συχνοτήτων με το πειραματικό φάσμα συχνοτήτων αλλάζοντας κάθε φορά το μέτρο ελαστικότητας (παράμετρο ευαισθησίας). Όταν το φάσμα συχνοτήτων πλησιάσει τα πειραματικά δεδομένα, οι τιμές του μοντέλου αναθεωρούνται εισάγοντας επιθυμητό μέτρο ελαστικότητας.

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι η εξής [15, 80]:

$$H = \sum_{i=1}^{nf} W_1 \times \left(\frac{f_{i,n} - f_{i,e}}{f_{i,e}} \right)^2 + \sum_{k=1}^{nf} W_2 \times \left(\frac{\varphi_{i,n} - \varphi_{i,e}}{\varphi_{i,e}} \right)^2 \quad \text{σχ.2}$$

Όπου:

$i=1...nf$ πλήθος των ιδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιούμε.

$k=1...nf$ πλήθος των τιμών του φάσματος ταχύτητας που χρησιμοποιούμε

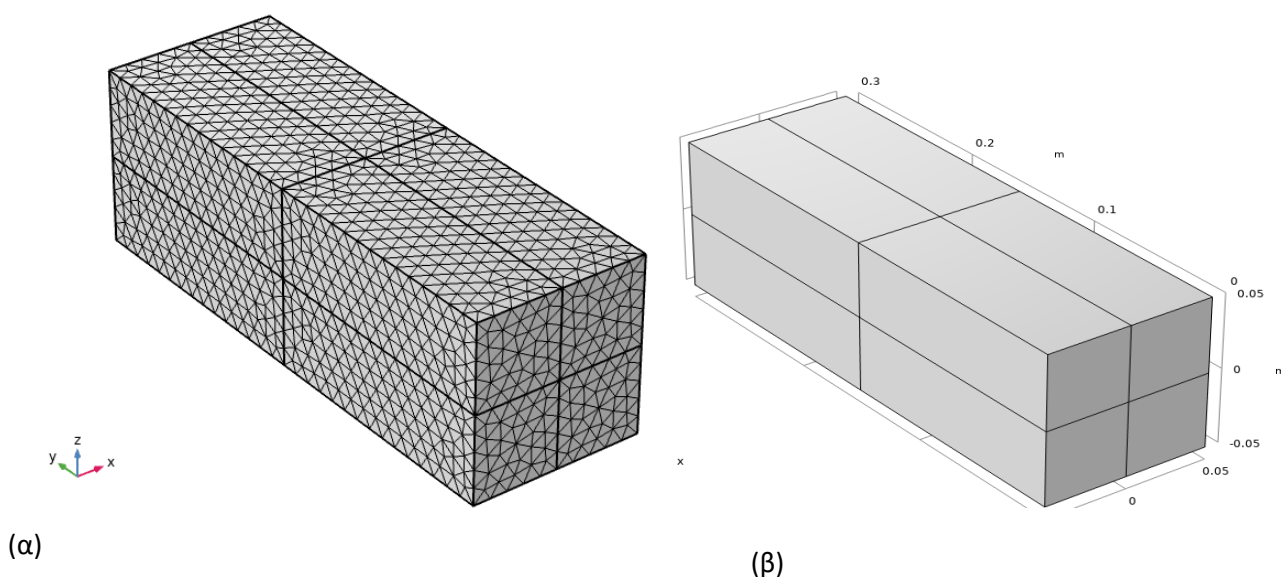
$f_{i,e}$ οι πειραματικές τιμές $1...nf$ ιδιοσυχνοτήτων

$f_{i,n}$ οι υπολογισμένες τιμές $1...nf$ ιδιοσυχνοτήτων από το COMSOL Multiphysics

$\varphi_{i,e}$ οι πειραματικές τιμές του φάσματος ταχύτητας που αντιστοιχούν σε $1...nf$ τιμές ιδιοσυχνοτήτων.

$\varphi_{i,n}$ οι υπολογισμένες τιμές φάσματος ταχύτητας που αντιστοιχούν σε $1...nf$ τιμές ιδιοσυχνοτήτων.

W_1, W_2 = συντελεστές ρύθμισης της τάξης μεγέθους των παραμέτρων



Εικόνα 130: (α) Η διακριτοποίηση του δοκιμίου μετά την προσομοίωση της πειραματικής εφαρμογής και (β) η προσομοίωση της πειραματικής εφαρμογής

6.3. Βελτιστοποίηση στο κτίριο μελέτης

Στο κτίριο μελέτης της Πρώην Ιερατικής Σχολής, η βελτιστοποίηση επιλέγεται να πραγματοποιηθεί με ιδιομορφική ανάλυση (eigenfrequency) σε κατάσταση λειτουργίας (OMA) εφόσον δεν μπορεί να τοποθετηθεί κατάλληλος διεγέρτης στην κατασκευή. Σκοπός είναι να ελεγχθούν κατάλληλες ιδιομορφές που υπολογίζονται με το Comsol Multiphysics [1] μέχρι να προσεγγιστούν οι συγκεκριμένες ιδιοσυχνότητες που βρέθηκαν πειραματικά (εικόνα 132). Ως τελική παράμετρος ευαισθησίας επιλέχτηκε το Μέτρο Ελαστικότητας της κατασκευής.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο, το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων υλοποίησε την διαδικασία με τη μέθοδο Monte Carlo [24]. Σύμφωνα με τους Luengo et al [24] η συγκεκριμένη μέθοδος «αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό τεχνικών στοχαστικής προσομοίωσης που προχωρούν με αρκετές δυννητικές επιθυμητές παραμέτρους αντικαθιστώντας και ενοποιώντας δείγματα μέσου όρου. Αυτές οι τιμές επιλέγονται είτε με φυσική αντιγραφή του επιθυμητού πειράματος ή πιθανολογικά δημιουργώντας ένα σύνολο τυχαίων πραγματοποιήσεων.»

Η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) που χρησιμοποιείται στο κτίριο μελέτης λαμβάνει υπόψη μόνο τα σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες και είναι η εξής: [21]

$$H_{(k)} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{f_{i,n} - f_{i,e}}{f_{i,e}} \right)^2 \quad \text{σχ.1}$$

k = αριθμός των ιδιοσυχνοτήτων

f_{in} =υπολογιστική ιδιοσυχνότητα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

f_{ie} = πειραματική ιδιοσυχνότητα

Στις εικόνες 133-136 φαίνεται το μέτρο ελαστικότητας στο οποίο η διαδικασία της βελτιστοποίησης κατέληξε μετά την βέλτιστη προσέγγιση των ιδιοσυχνοτήτων που υπολογίζονται από το λογισμικό COMSOL Multiphysics [1] με τις ιδιομορφές που βρέθηκαν πειραματικά (εικόνα 132).

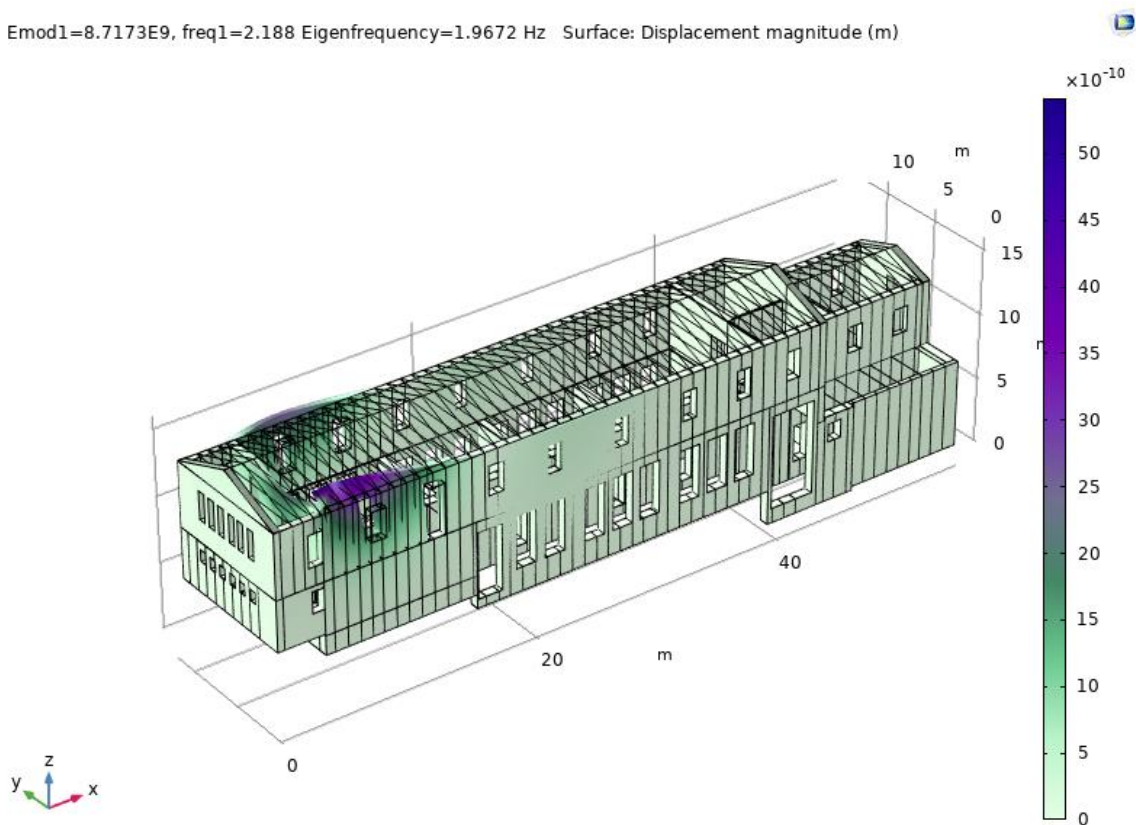
Παρατηρείται ότι το $E = 8,72 \text{ GPa}$ είναι μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας που μετρήθηκε πειραματικά καθώς η γενική δομική κατάσταση της κατασκευής είναι καλύτερη από τις αποσαθρωμένες περιοχές από όπου πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία.

Frequency [Hz]
2.188
3.313
8.188
4.188

Εικόνα 132: Οι ιδιοσυχνότητες που βρέθηκαν με το λογισμικό ARTEMIS Modal

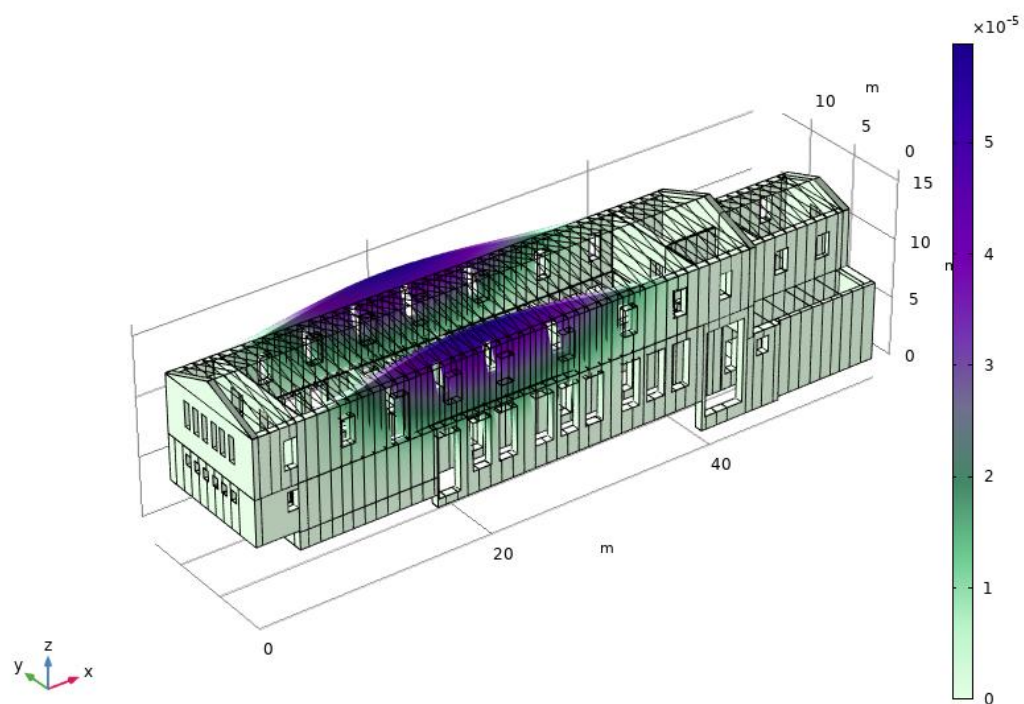
Στις εικόνες 133-136 που ακολουθούν, απεικονίζονται οι υπολογιστικές ιδιοσυχνότητες που συγκλίνουν με τις πειραματικές ιδιοσυχνότητες.

Emod1=8.7173E9, freq1=2.188 Eigenfrequency=1.9672 Hz Surface: Displacement magnitude (m)



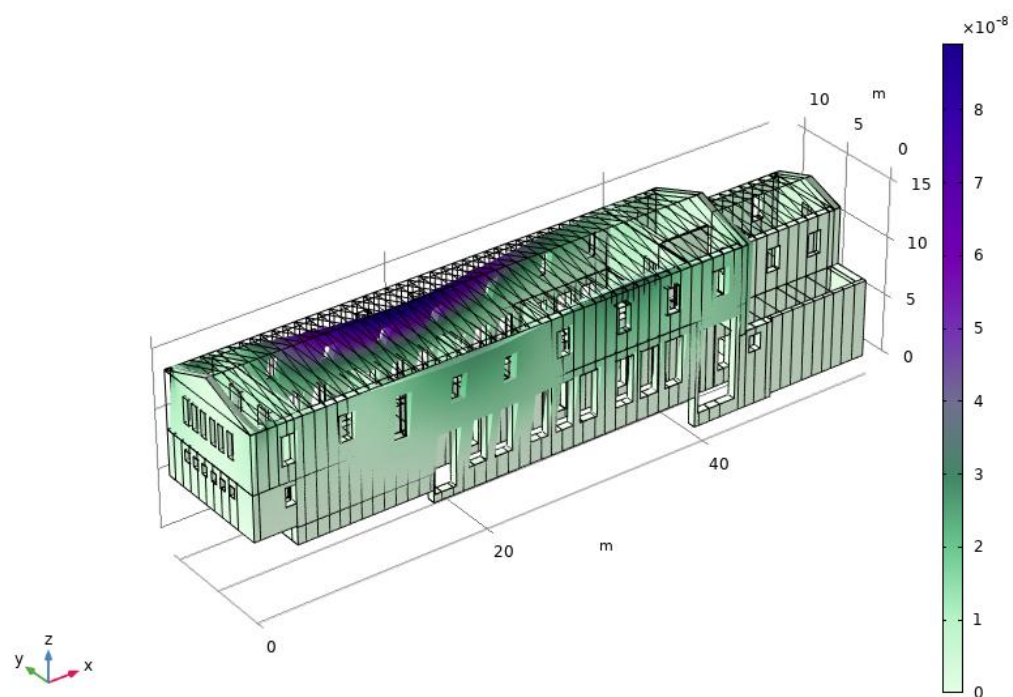
Εικόνα 133: Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (1.9672Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (2.188Hz)

Emod1=8.7173E9, freq1=3.313 Eigenfrequency=3.6349 Hz Surface: Displacement magnitude (m)



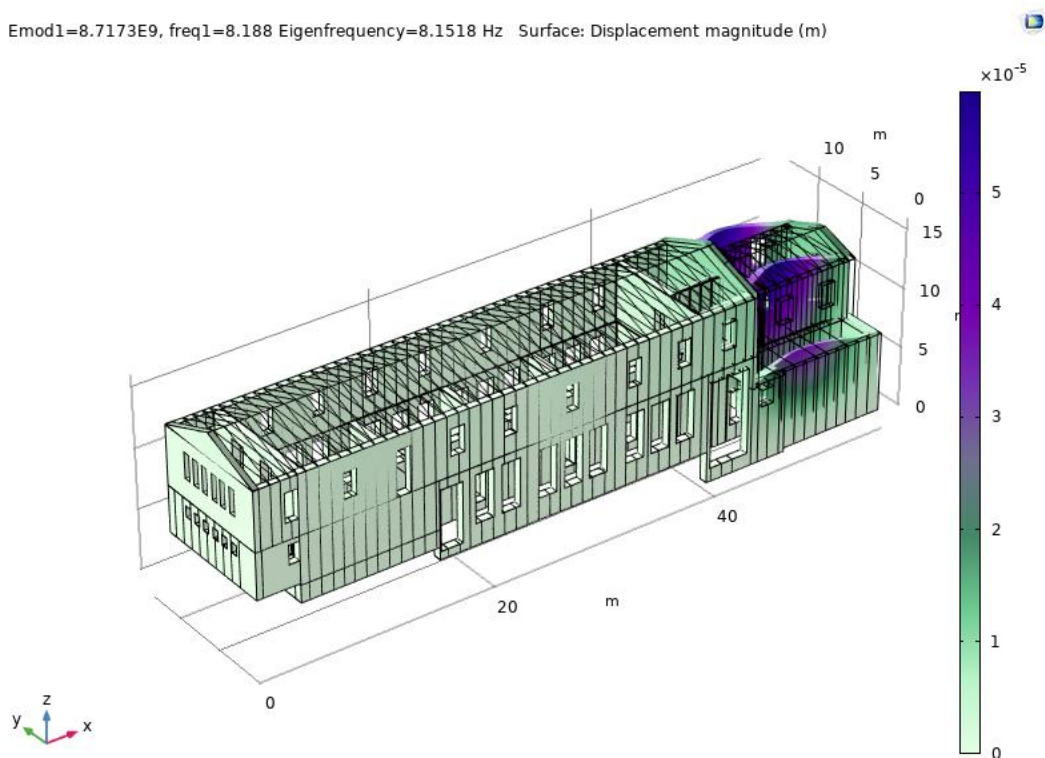
Εικόνα 134 Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (3.635Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (3.313 Hz)

Emod1=8.7173E9, freq1=4.188 Eigenfrequency=4.1192 Hz Surface: Displacement magnitude (m)



Εικόνα 135 Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (4.119Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (4.188 Hz)

Emod1=8.7173E9, freq1=8.188 Eigenfrequency=8.1518 Hz Surface: Displacement magnitude (m)

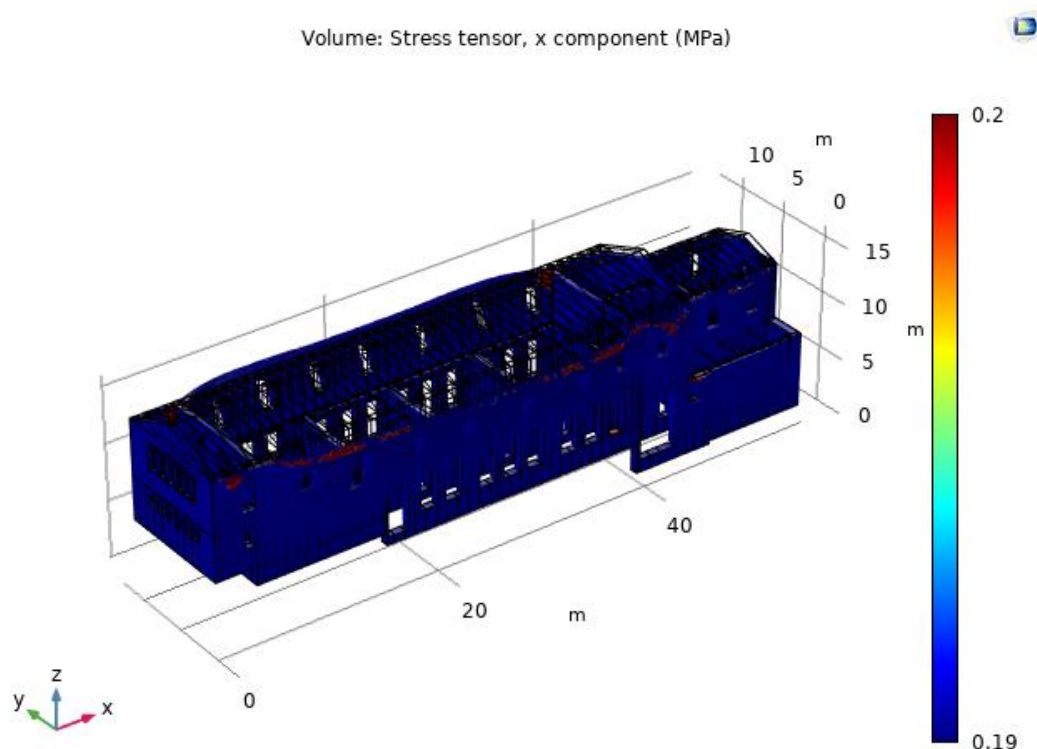


Εικόνα 136 Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση και η τιμή της υπολογιστικής ιδιοσυχνότητας (8.152Hz) που συγκλίνει με την πειραματική ιδιοσυχνότητα (8.188 Hz)

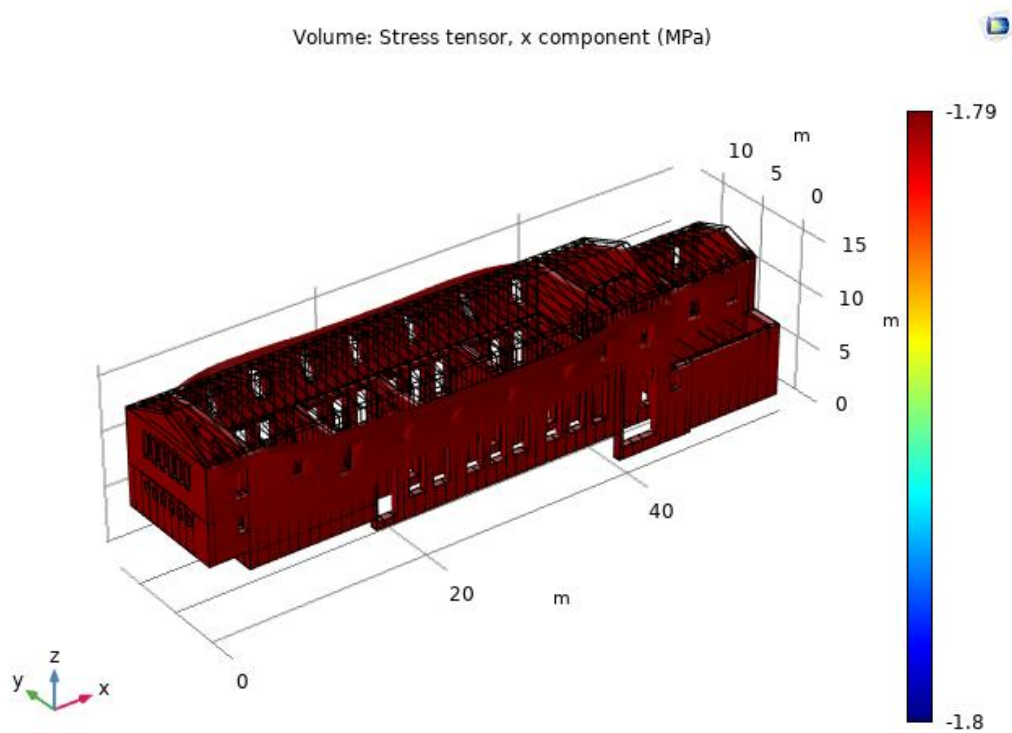
6.4. Αναλύσεις με βέλτιστο μέτρο ελαστικότητας

6.4.1. Έλεγχος στατικής επάρκειας

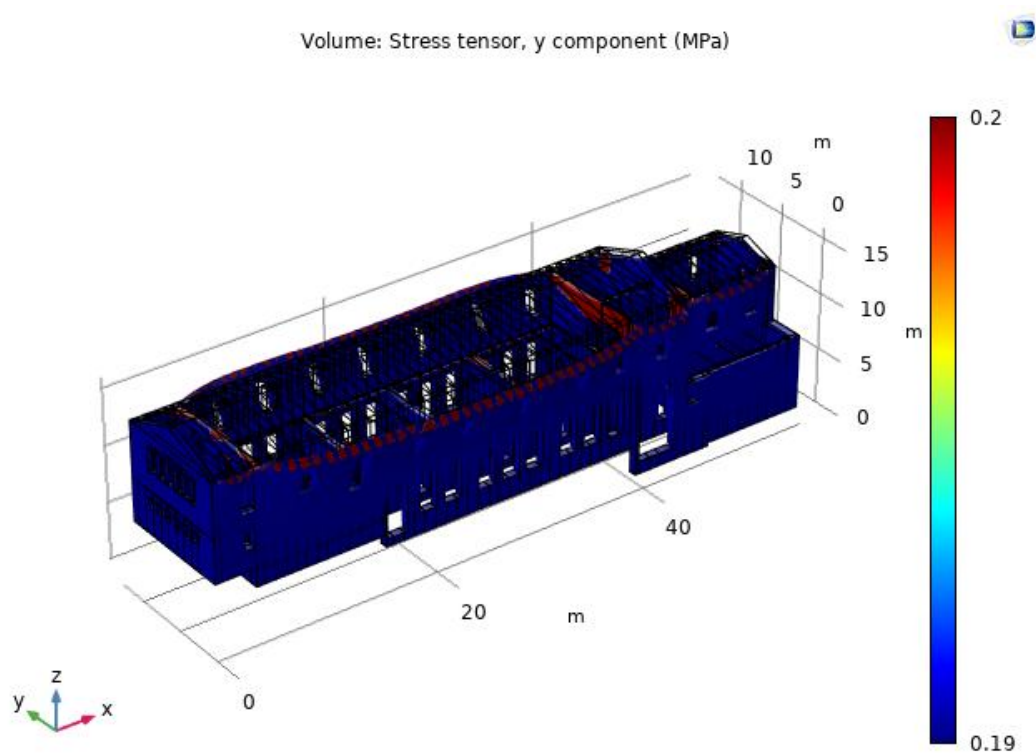
Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με μέτρο ελαστικότητας 8,72 GPa σε όλες τις τοιχοποιίες εκτός από τις αποσαθρωμένες και ρηγματωμένες τοιχοποιίες στις οποίες το μέτρο ελαστικότητας διαμορφώθηκε ίσο με 2GPa, που είναι και το μέτρο ελαστικότητας που εκτιμήθηκε από την μέθοδο της πυρηνοληψίας. Στις εικόνες 137-142 απεικονίζονται οι ορθές τάσεις κατά τον άξονα x,y και z με μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική τάση και οι περιοχές που υπερβαίνουν την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας.



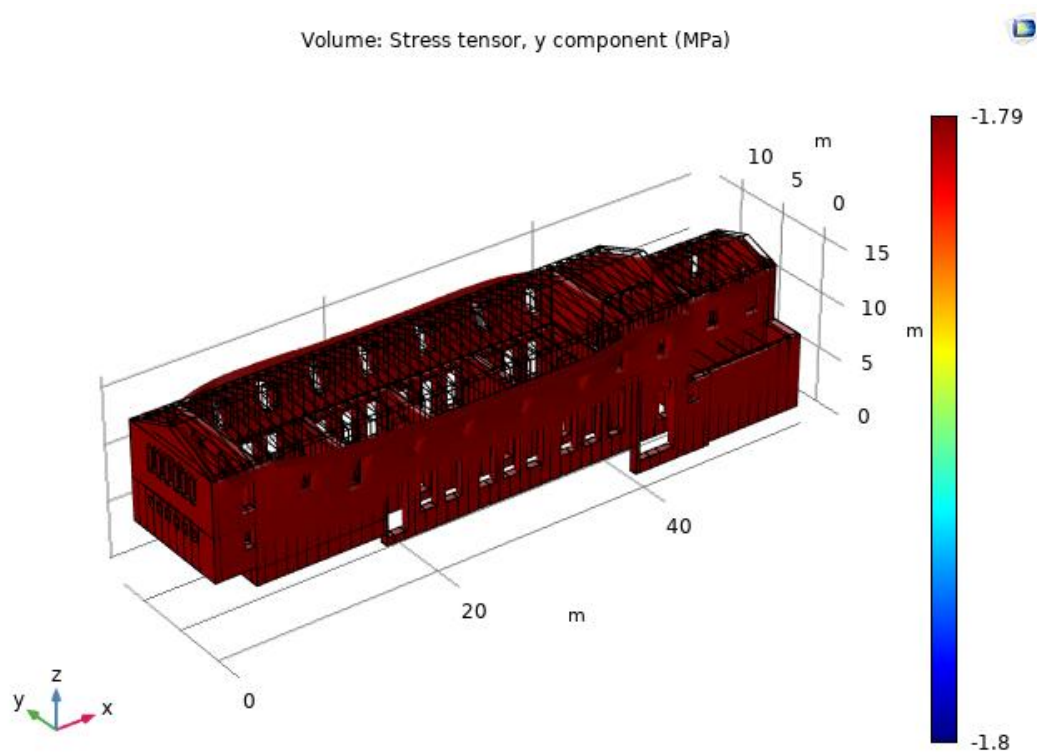
Εικόνα 137: Ορθές τάσεις στον άξονα X με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



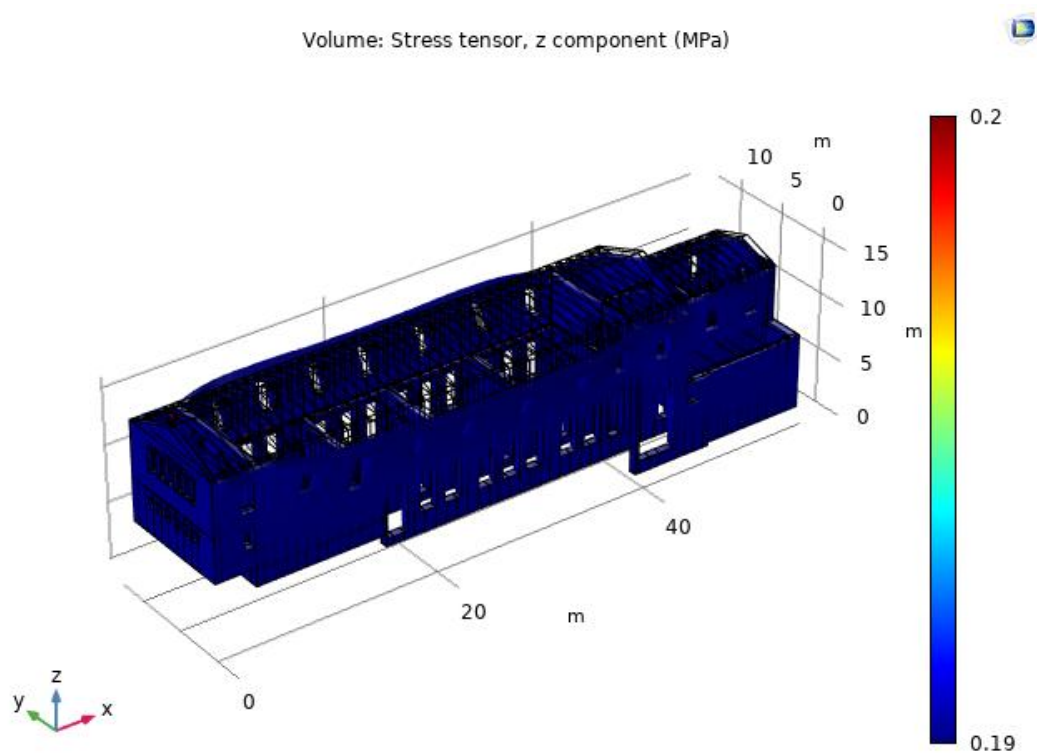
Εικόνα 138 Ορθές τάσεις στον άξονα X με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας



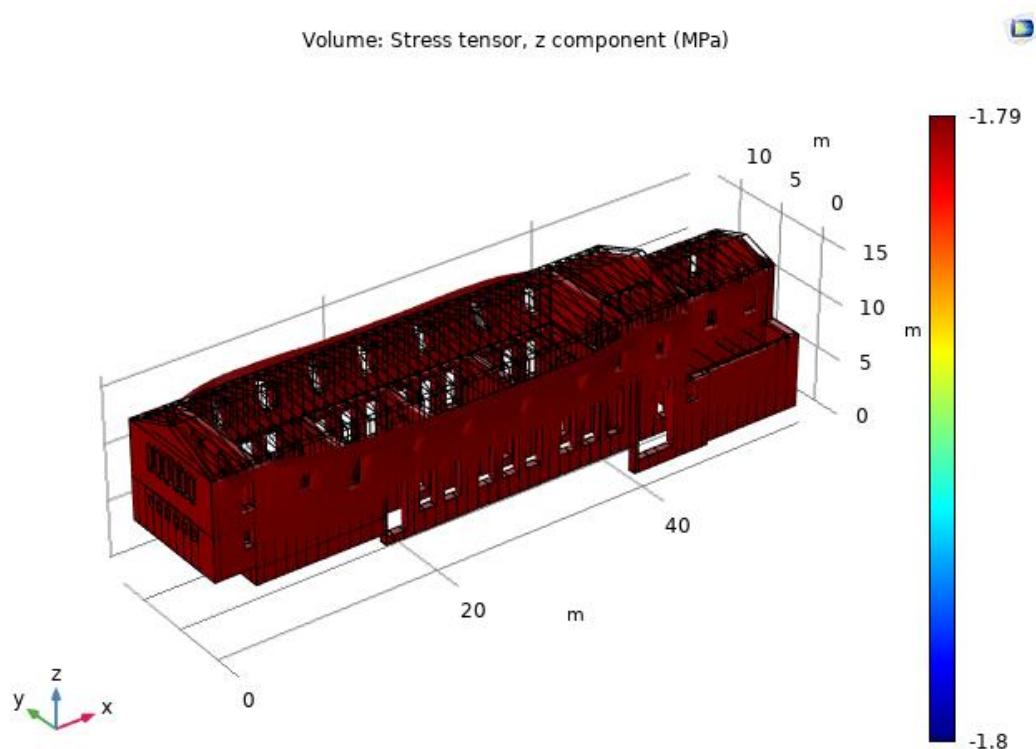
Εικόνα 139 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 140 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 141 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 142 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Φαίνεται να μην υπάρχει σημαντική διαφορά ως προς τις περιοχές με μέγιστες τιμές εφελκυσμού και θλίψης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν πριν την διαδικασία της βελτιστοποίησης (εικόνες 72-77). Παρατηρείται ότι, στον άξονα Y, με μέγιστη την εφελκυστική τάση παρουσιάζονται οι περισσότερες περιοχές που αναπτύσσονται αστοχίες και αυτές είναι στα σημεία σύνδεσης των τοιχοποιιών με τα δοκάρια των ζευκτών.

6.4.2. Δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής

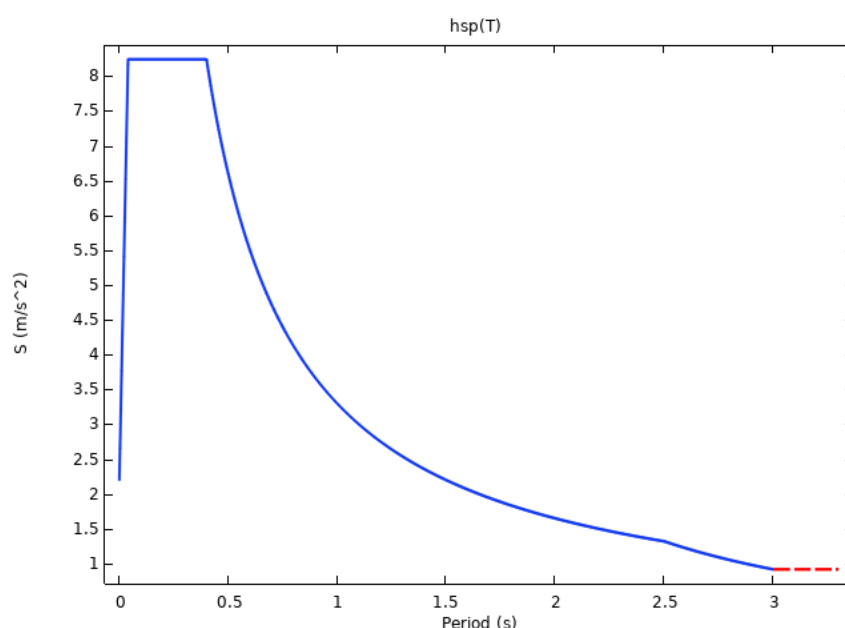
Για τη δημιουργία του φάσματος επιλέγεται μικρότερη ιδιοπερίοδο T_1 σε σχέση με την τιμή που προτείνει ο κανονισμός, για τη διεύρυνση του πλάτους του φάσματος προς τα αριστερά, εξαιτίας της εμφάνισης χαμηλής 1^{ης} ιδιοπεριόδου στην ανάλυση ιδιομορφών της κατασκευής.

Η φασματική ανάλυση (response spectrum analysis) της κατασκευής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. [76]

Επίσης υιοθετήθηκε τιμή 1 για τον συντελεστή συμπεριφοράς εξαιτίας της σπουδαιότητας του μνημείου που μελετάται.

Επιπρόσθετα, στην ανάλυση ελήφθησαν υπ' όψιν οι ιδιομορφές με ποσοστό συμμετοχής περίπου 85% για τις οριζόντιες διευθύνσεις και 85% για την κατακόρυφη διεύθυνση. Τέλος, οι τιμές του φάσματος πολλαπλασιάστηκαν με συντελεστή 1,4 (σπουδαιότητας), για υλοποίηση της δυσμενέστερης φόρτισης με σεισμό, κατά τον Ευρωκώδικα 1 [75].

Το φάσμα σχεδιασμού παρατίθεται παρακάτω (εικόνα 143) και οι βασικές παραδοχές στον πίνακα 7 στο Κεφάλαιο 4.



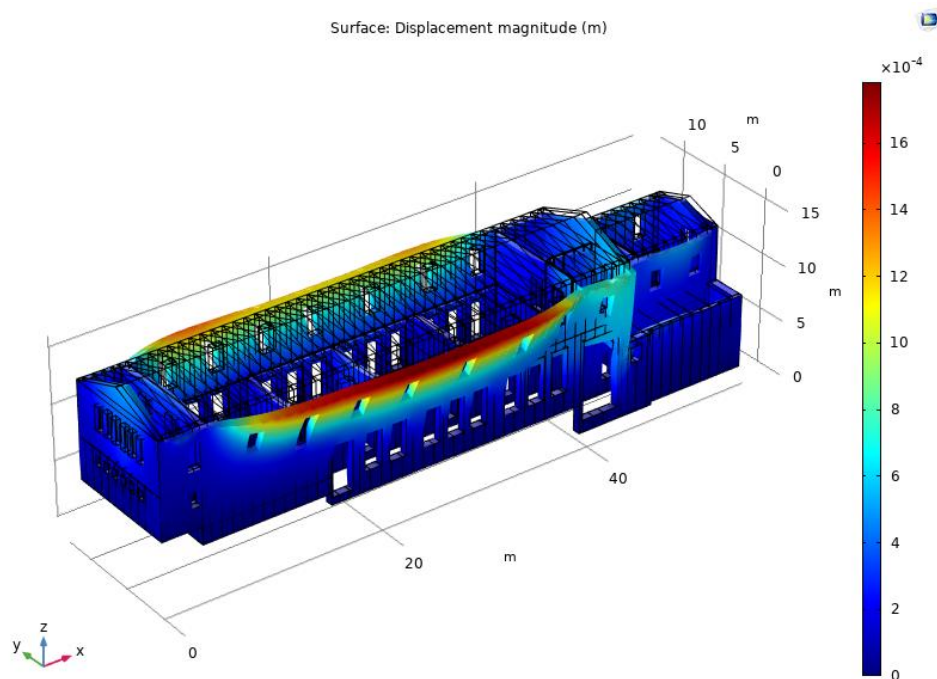
Εικόνα 143:Φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8

Οι σεισμικοί συνδυασμοί που λαμβάνονται είναι οι εξής:

- 1) $S_d = G + 0,3Q + SEX + 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 2) $S_d = G + 0,3Q + SEX - 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 3) $S_d = G + 0,3Q - SEX - 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 4) $S_d = G + 0,3Q - SEX + 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 5) $S_d = G + 0,3Q + SEY + 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 6) $S_d = G + 0,3Q + SEY - 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 7) $S_d = G + 0,3Q - SEY - 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 8) $S_d = G + 0,3Q - SEY + 0.30 SEX + 0,3 SEZ$

Για τον υπολογισμό της τελικής απόκρισης της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SRSS (Square root of the sum of square) για το συνδυασμό των ιδιομορφών.

Στην εικόνα 144 απεικονίζονται οι μετακινήσεις για την 1^η περίπτωση σεισμικού συνδυασμού. Οι μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται στην δυτική όψη της κατασκευής όπου υπάρχουν και μεγάλα ανοίγματα.

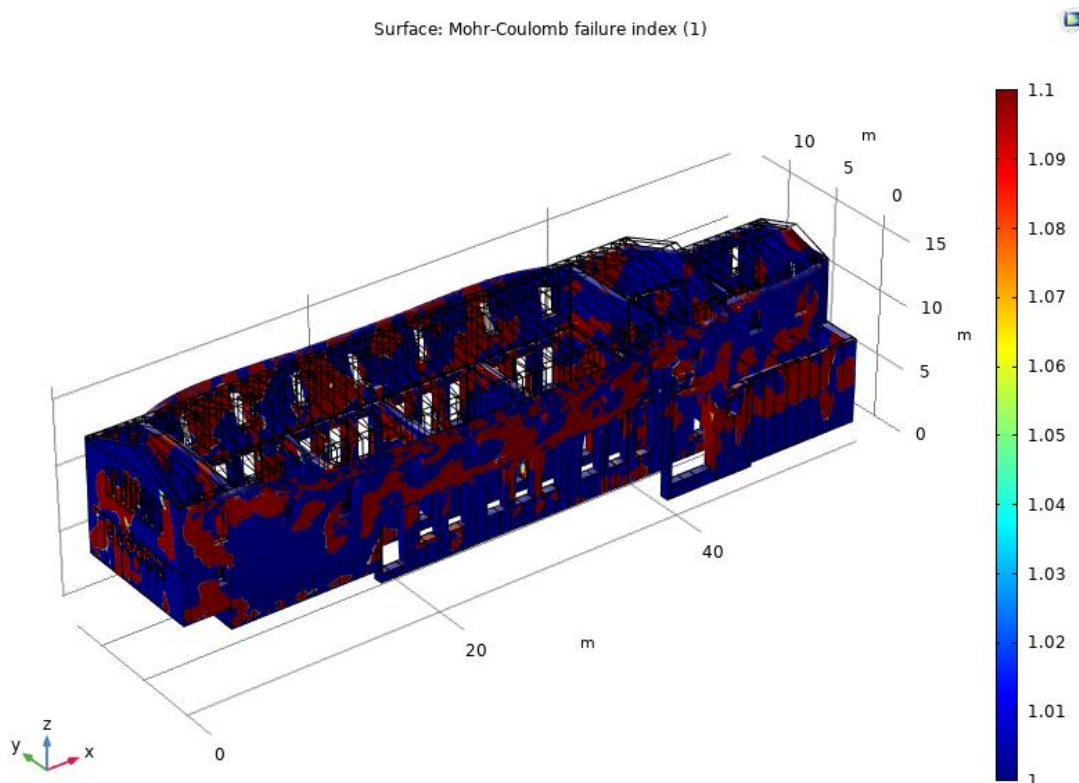


Εικόνα 144: Συνολικές μετακινήσεις για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό

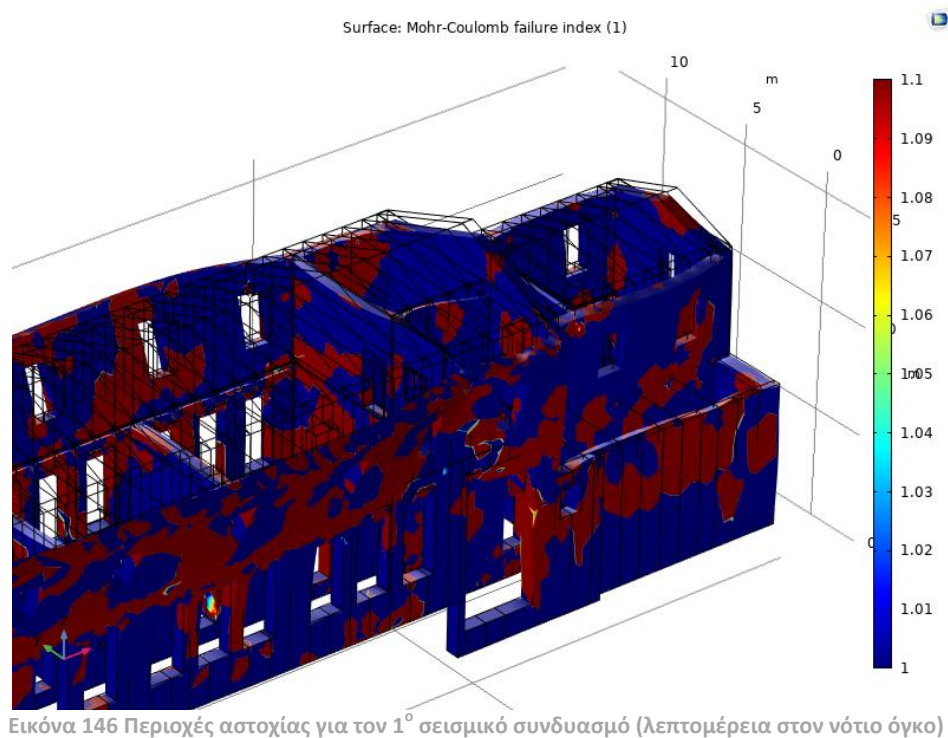
Για τον εντοπισμό των περιοχών όπου η κατασκευή αστοχεί, πραγματοποιήθηκε χρήση κριτηρίου αστοχίας μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης (εφελκυστική και θλιπτική αντοχή) Mohr Coulomb, το οποίο υποδεικνύει τις περιοχές όπου οι τιμές της κύριας τάσης του υλικού υπερβαίνουν τις τιμές της αντοχής του κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Συνεπώς, παρουσιάζονται και οι πιθανές περιοχές αστοχίας.

Στις εικόνες 145-146 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό και στην εικόνα 147 για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει τις περιοχές που η τιμή του κριτηρίου υπερβαίνει την μονάδα και συνεπώς στην περιοχή αυτή θα παρουσιαστεί πιθανή αστοχία. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των υπερβάσεων στα ανοίγματα.

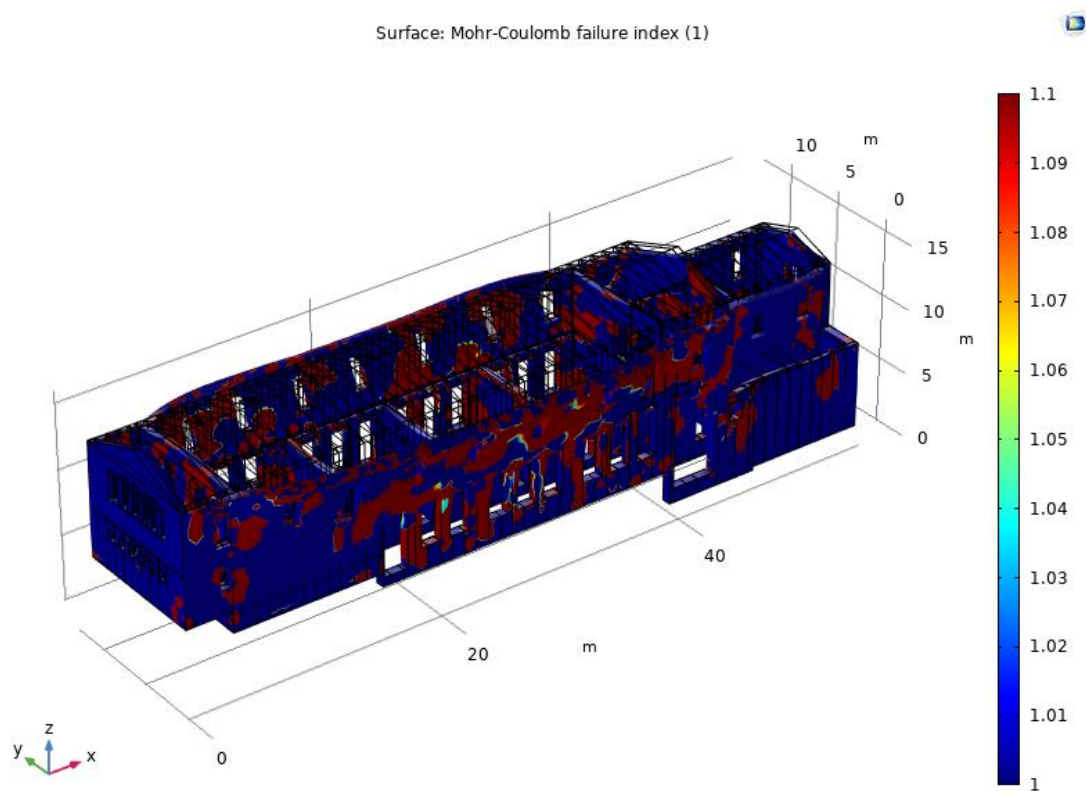
1^{ος} συνδυασμός: G+0,3Q +SEX +0.30 SEY +0,3SEZ



Εικόνα 145 Περιοχές αστοχίας για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό



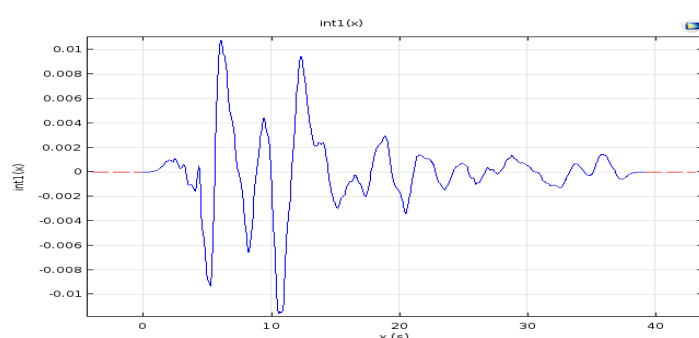
5^{ος} συνδυασμός: $G+0,3Q+0,3SE_X+SE_Y+0,3SE_Z$



6.4.3. Δυναμική απόκριση κατασκευής σε πραγματικό σεισμικό γεγονός

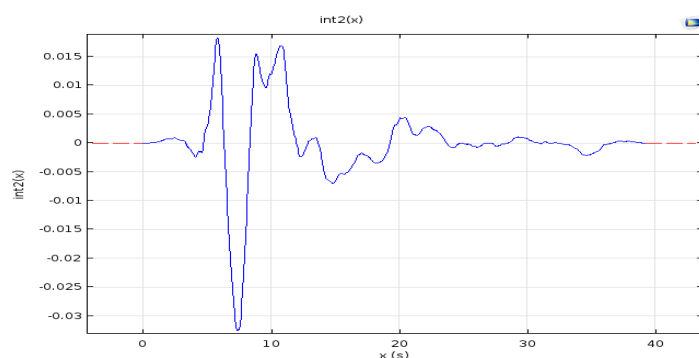
Οι αναλύσεις μετά αναθεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών ολοκληρώνονται με τη διεξαγωγή δυναμικής απόκριση σε πραγματικό σεισμικό γεγονός. Χρησιμοποιήθηκαν χρονοϊστορίες μετατόπισης από το σεισμικό γεγονός που συνέβη στην πόλη Irpinia της Ιταλίας το 1980 με σεισμική ένταση 6,69 R. Στην εικόνα 148 απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες κατά X, Y και Z.

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΑΤΑ Χ



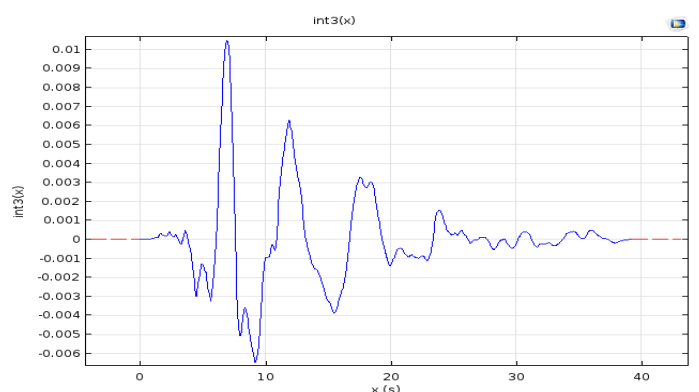
(α)

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΑΤΑ Υ



(β)

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΑΤΑ Ζ

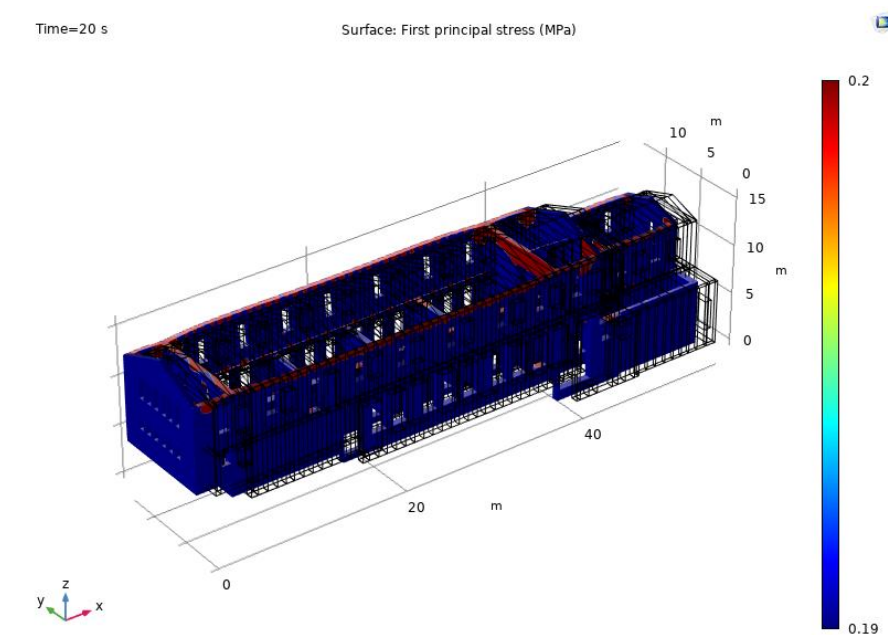


(γ)

Εικόνα 148: Χρονοϊστορίες κατά (α) X, (β) Y και (γ) Z, αντίστοιχα

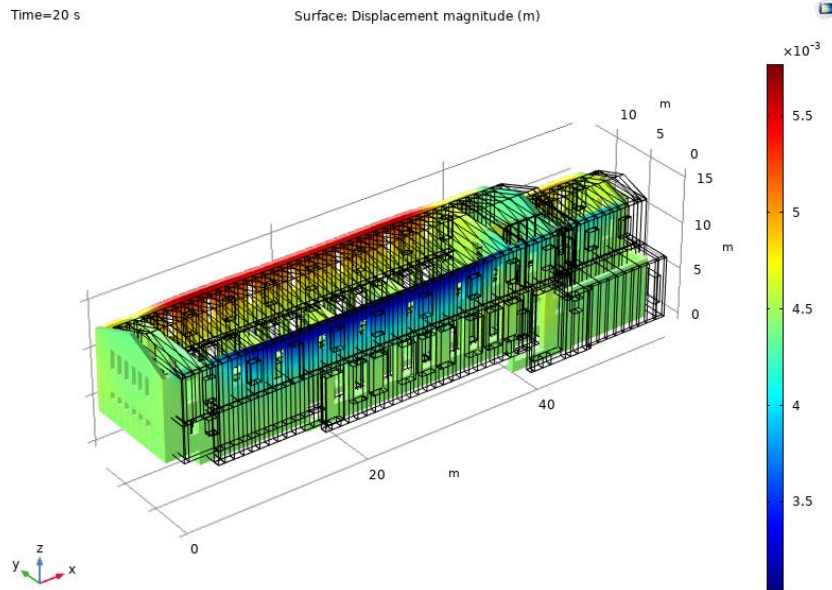
Στις εικόνες 149-150 παρουσιάζονται αποτελέσματα σε χρόνο 20 sec (με συνολικό χρόνο διέγερσης 39 sec) για τις κύριες ορθές τάσεις και τη συνολική μετατόπιση. Στην χρωματική απεικόνιση μεταβολής της κύριας τάσης απεικονίζονται και οι περιοχές που ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή. Αυτές οι περιοχές είναι στην θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με τα δάπεδα και τα ζευκτά της στέγης καθώς και η εσωτερική τοιχοποιία που οδηγεί στο κεντρικό κλιμακοστάσιο.

Κύριες ορθές τάσεις



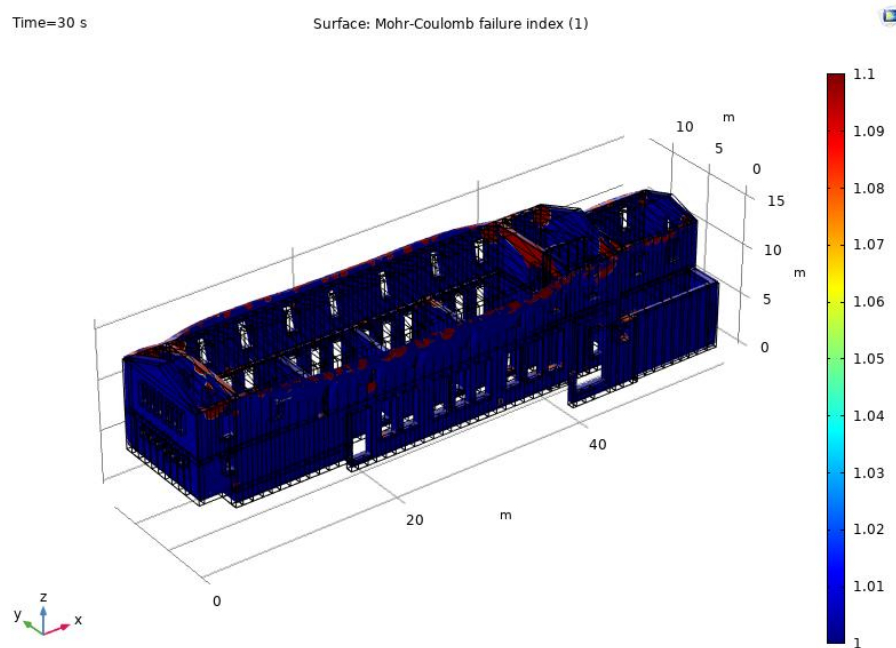
Εικόνα 149 Κύριες ορθές τάσεις στα 20 sec

Μετακινήσεις



Εικόνα 150 Μετακίνηση στα 20 sec

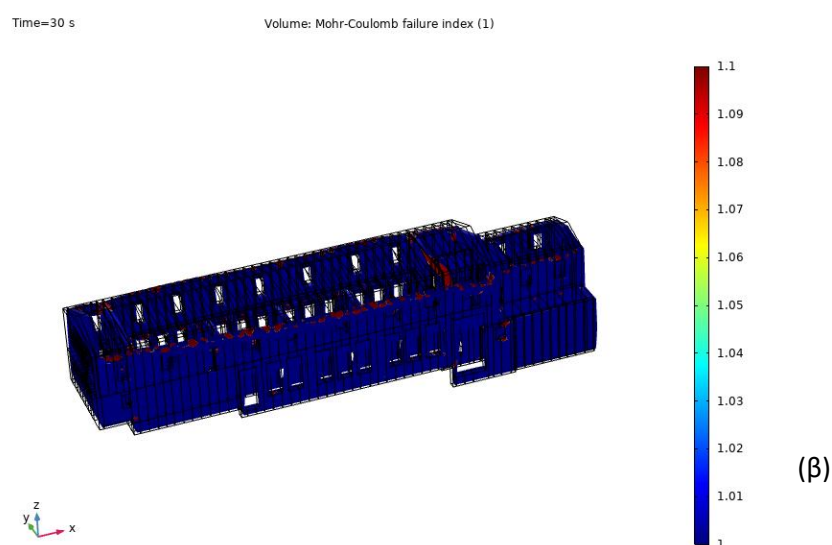
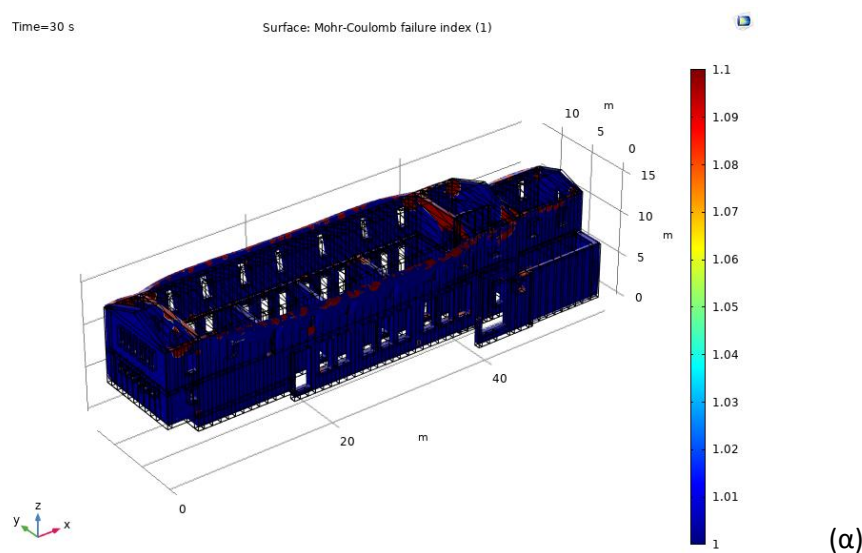
Στην εικόνα 151 παρουσιάζεται το κριτήριο αστοχίας μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης (εφελκυστική και θλιπτική αντοχή) Mohr Coulomb σε χρόνο 30sec. Οι περιοχές με έντονο χρώμα είναι οι περιοχές αστοχίας. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των υπερβάσεων (μεγαλύτερη τιμή της μονάδας) στις θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με την τοιχοποιία.



Εικόνα 151: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb

6.4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων του μοντέλου πριν την βελτιστοποίηση με τα αποτελέσματα του μοντέλου μετά την βελτιστοποίηση

Στην εικόνα 152 παρατίθενται η δυναμική απόκριση της κατασκευής πριν την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας (εικόνα 152β) συγκριτικά με την δυναμική απόκριση με χρονοϊστορία μετά την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας(εικόνα 152α). Συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις αναλύσεις μεταξύ τους και συνεπώς η μελέτη μπορεί να προχωρήσει με το αξιόπιστο πλέον μέτρο ελαστικότητας που η διαδικασία της βελτιστοποίησης κατέληξε.



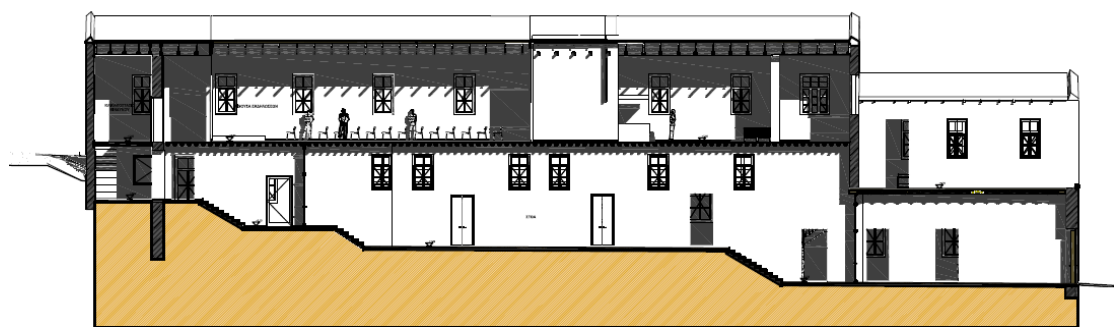
Εικόνα 152: Σύγκριση αποτελεσμάτων (α) μετά την βελτιστοποίηση, (β) πριν την βελτιστοποίηση

Κεφάλαιο 7

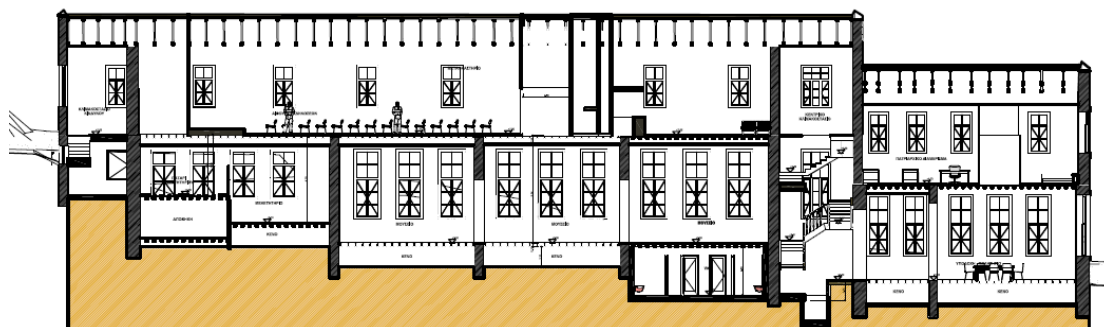
Διερεύνηση ειδικών επεμβάσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση των αλλαγών που περιλαμβάνονται στις αρχιτεκτονικές προτάσεις σύμφωνα με την νέα χρήση του κτιρίου της Πρώην Ιερατικής Σχολής στην μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής. Στην αρχιτεκτονική πρόταση αναφέρονται συνοπτικά τα εξής (εικόνες 153-155): [5]

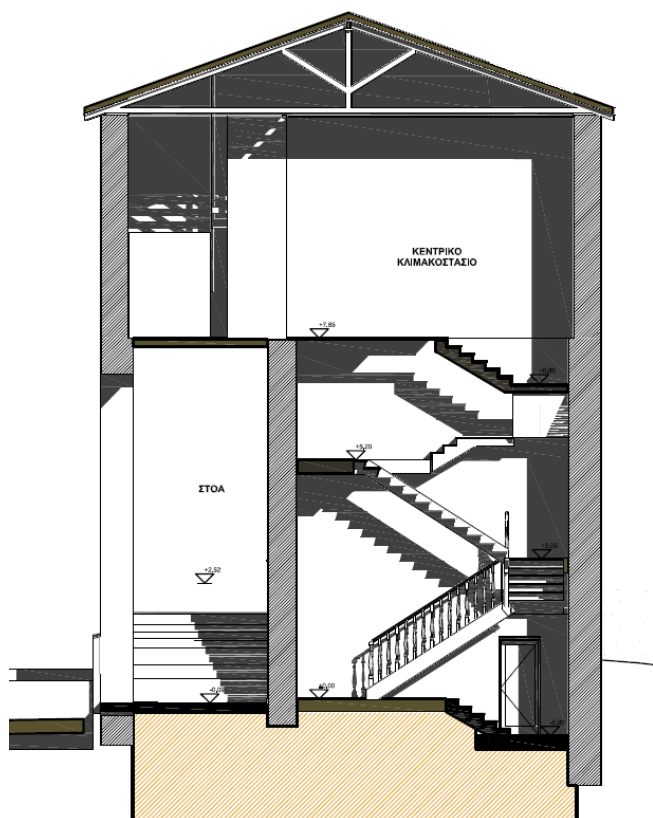
- Καθαίρεση τοιχοποιιών στο δωμάτιο του επιτηρητή θαλάμου στον όροφο και στον όροφο του νότιου όγκου της Πρώην Ιερατικής Σχολής.
- Αντικατάσταση ή ενίσχυση ξύλινων στοιχείων στα δάπεδα και στη στέγη.
- Προσθήκη υπογείου ανεξάρτητου από την φέρουσα τοιχοποιία.
- Προσθήκη ξύλινου παταριού για πρόσθετους βοηθητικούς χώρους της αίθουσας συνεδριάσεων της νέας χρήσης και των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων.
- Προσθήκη ξύλινων δοκών στην οροφή ισογείου για την παραλαβή των πρόσθετων φορτίων παταριού καθώς και στην στέψη των τοίχων για την ανάρτηση μέρους των φορτίων που προκύπτουν από τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις



Εικόνα 153: Διαμήκης τομές κατά μήκος της στοάς [5]



Εικόνα 154: Διαμήκης τομή κατά μήκος των δωματίων του ισόγειου [5]



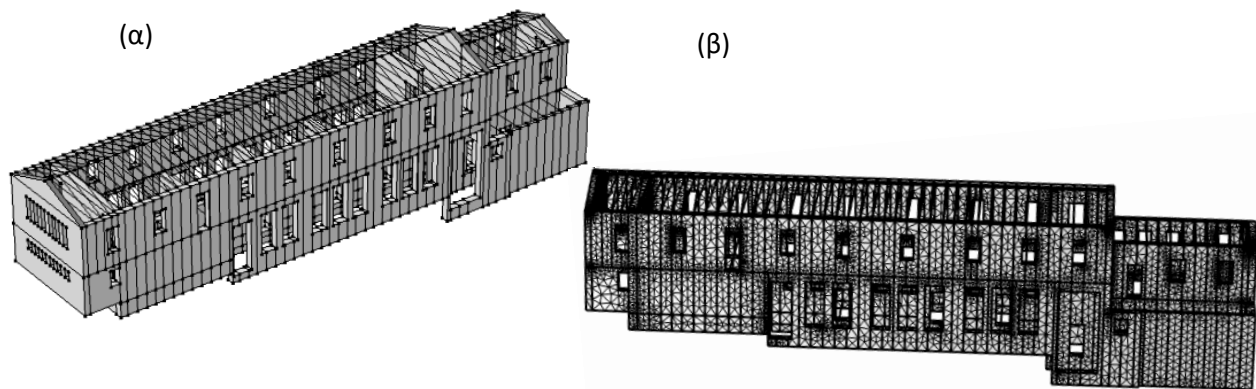
Εικόνα 155: Εγκάρσια τομή [5]

Στο Παράρτημα Γ' απεικονίζονται οι προτάσεις δομικών επεμβάσεων στα αρχιτεκτονικά σχέδια του ερευνητικού προγράμματος [5].

Εκτός από τις παραπάνω αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις στην προσομοίωση των μοντέλου, έχει πραγματοποιηθεί αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας (**8,72 GPa**) σύμφωνα με αυτό που βρέθηκε από την διαδικασία της βελτιστοποίησης. Εισάγεται το συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας σε όλες

της τοιχοποιίας εφόσον προτείνεται αρμολόγηση και αύξηση της αντοχής των αποσαθρωμένων τμημάτων των τοιχοποιιών.

Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε στο λογισμικό Comsol Multiphysics [1] απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 156α). Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων με τις διαδοχικές διακριτοποιήσεις απεικονίζεται στην εικόνα 156β.



Εικόνα 156: (α) Προσομοίωση της Πρώην Ιερατικής Σχολής και (β) δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων μετά τις αρχιτεκτονικές προτάσεις

Συνολικά το μοντέλο με τις προτεινόμενες επεμβάσεις αποτελείται από 221.088 στοιχεία (202.290 στερεά και 18.798 γραμμικά στοιχεία).

Με βάση τους ισχύοντες Κανονισμούς και για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, έγιναν οι παρακάτω αναλύσεις:

- α) Γραμμική, στατική επίλυση, με φόρτιση το ίδιο βάρος της κατασκευής και τα φορτία από τα πατώματα.
- β) Υπολογισμός των κανονικών μορφών της κατασκευής (ιδιομορφική ανάλυση).
- γ) Φασματική ανάλυση της κατασκευής (σεισμική ανάλυση για το φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού). Επαλληλία στατικής και δυναμικής ανάλυσης.
- δ) Δυναμική απόκριση κατασκευής σε καταγεγραμμένο πραγματικό σεισμικό γεγονός

Φορτίσεις

Ως προς τις μόνιμες φορτίσεις, υπολογίστηκε το ίδιο βάρος του κτιρίου το οποίο λαμβάνεται αυτόματα από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics [1] για την στατική και δυναμική ανάλυση μέσω των στερεών τρισδιάστατων στοιχείων (solid). Τα κινητά φορτία αποτελούνται από τις μεταβλητές δράσεις σεισμού, χιονιού και ανέμου που καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα 1 [75].

Φορτία στέγης

Μόνιμα φορτία:

Η επικάλυψη της στέγης λαμβάνεται ότι θα πραγματοποιηθεί με βυζαντινά κεραμίδια τύπου βάρους 3,3kg/τεμ και διαστάσεων 43x26cm. Τα καδρόνια στήριξης των κεραμιδιών θα έχουν διατομή 3x3cm και θα τοποθετηθούν ανά 30cm. Οι επιτεγίδες θα έχουν διατομή 5x5cm και θα τοποθετηθούν ανά 50cm. Το πέτσωμα θα έχει πάχος 2.2cm. Το ειδικό βάρος των ξύλων λαμβάνεται ίσο με 6.6kN/m³. Επομένως το μόνιμο φορτίο σε επιφάνεια 1m² της στέγης λαμβάνεται ίσο με 0,55kN/m².

Κινητό φορτίο χιονιού:

Το φορτίο του χιονιού, όπως και στην υφιστάμενη κατάσταση, λαμβάνει την τιμή :

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_k = 0,312 \text{ kN/m}^2$$

Κινητό φορτίο ανέμου:

Το κινητό φορτίο ανέμου, όπως και στην υφιστάμενη κατάσταση, λαμβάνει την τιμή:

$$w = 0,676 \text{ kN/m}^2$$

Φορτία δαπέδων:

Θεωρήθηκε ότι τα πατώματα αποτελούνται από ξύλινο πέτσωμα 2 cm. Ως επιπλέον μόνιμο φορτίο ορίστηκε 0.50 kN/m² για τα δάπεδα. Συνεπώς το συνολικό μόνιμο φορτίο είναι G=0,62kN/m².

Σχετικά με το κινητό φορτίο, υπολογίστηκε σύμφωνα με τους πίνακες (πιν.6) από τον Ευρωκώδικα EN 1991-1-1 [75].

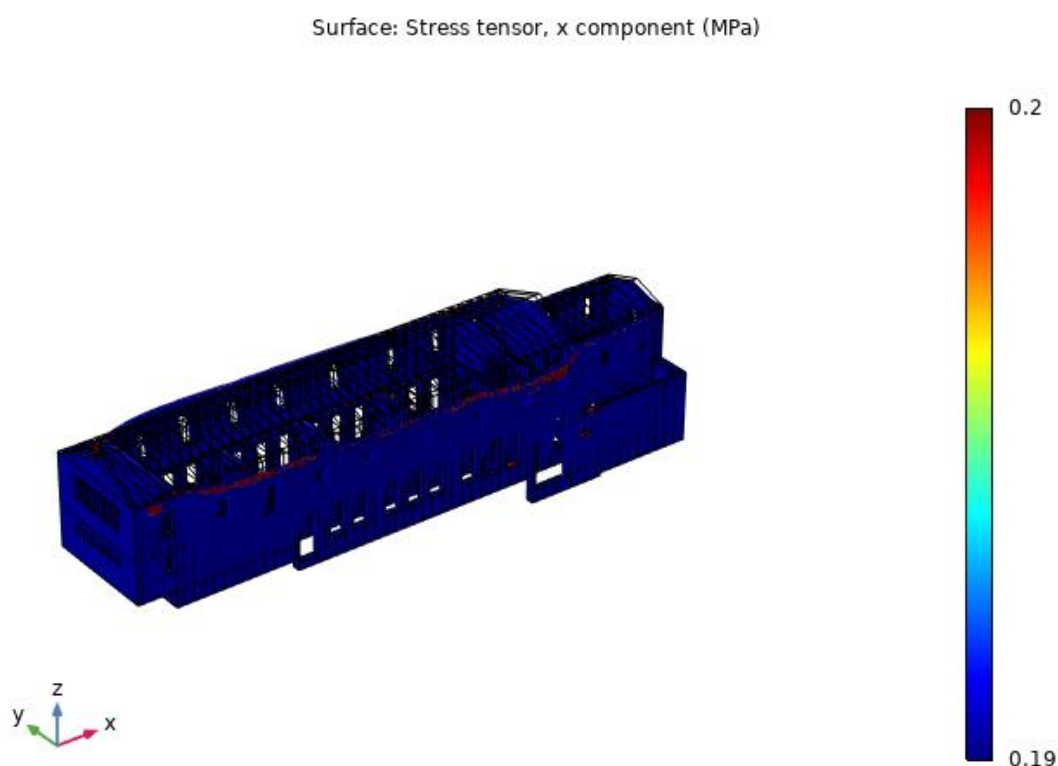
Τα κινητά φορτία που χρησιμοποιήθηκαν, λοιπόν, στα δάπεδα ήταν τα εξής:

- Όροφος βόρειου όγκου: $Q=5 \text{ KN/m}^2$.
- Όροφος δωματίου στο βόρειο κλιμακοστάσιο: $Q=3 \text{ KN/m}^2$.
- Όροφος νότιου όγκου: $Q=2 \text{ KN/m}^2$.
- Ισόγειο νότιου όγκου: $Q=3 \text{ KN/m}^2$.

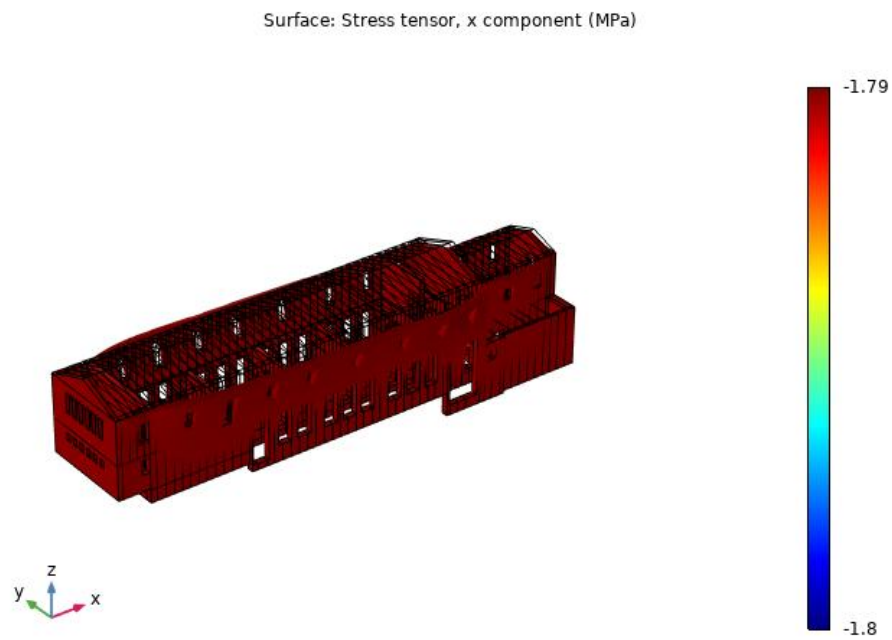
Ακόμη, στα ξύλινα δοκάρια του ορόφου του βόρειου όγκου προστέθηκαν τα φορτία του ξύλινου παταριού. Επίσης, ένα ακόμη οριζόντιο ξύλινο δοκάρι προσομοιώθηκε στη στέγη το οποίο παραλαμβάνει μέρος των φορτίων από τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις που προτείνονται να τοποθετηθούν στο ξύλινο πατάρι.

7.1 Έλεγχος στατικής επάρκειας

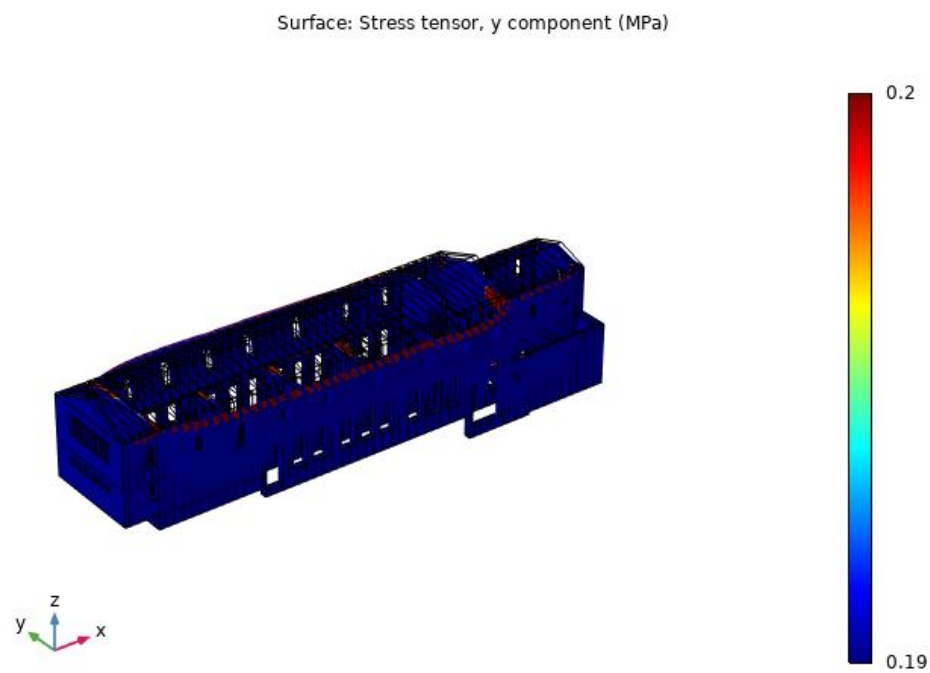
Το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις με την προσθήκη των αρχιτεκτονικών προτάσεων και δομικών επεμβάσεων ήταν 8,72 GPa. Στις εικόνες 157-169 που ακολουθούν απεικονίζονται οι ορθές τάσεις κατά τον άξονα x , y και z με μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική τάση και οι περιοχές που υπερβαίνουν την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας.



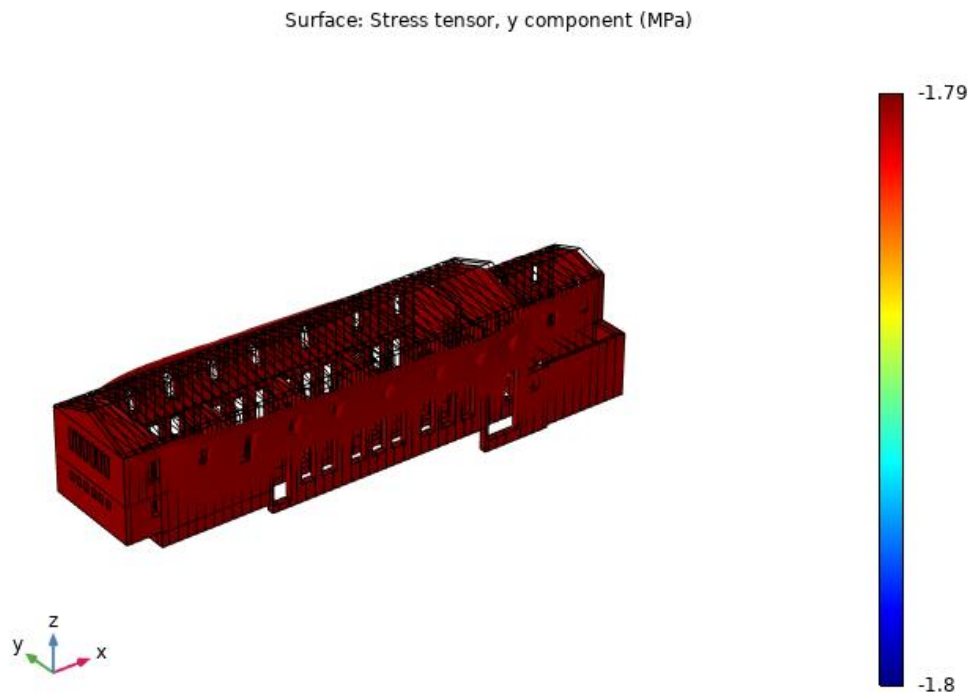
Εικόνα 157: Ορθές τάσεις στον άξονα X με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



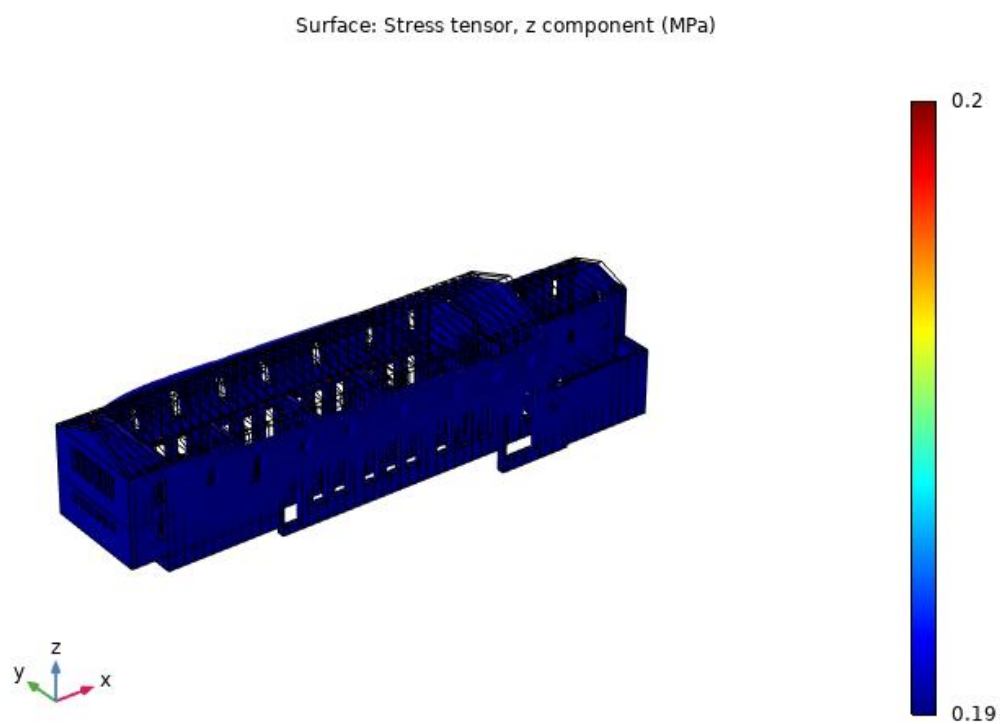
Εικόνα 158 Ορθές τάσεις στον άξονα X με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας



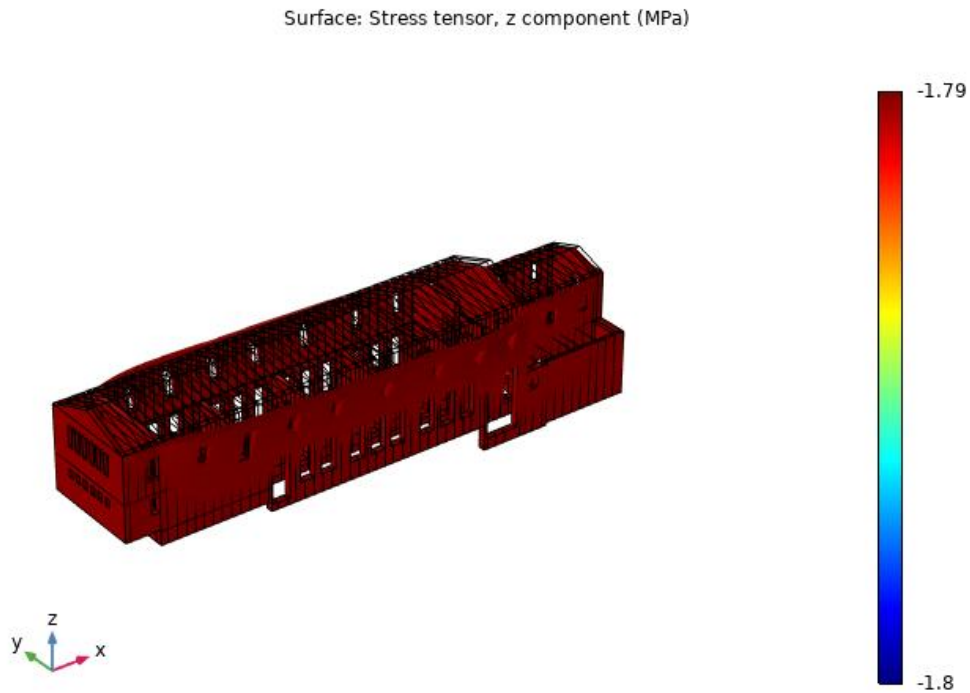
Εικόνα 159 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 160 Ορθές τάσεις στον άξονα Y με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας



Εικόνα 161 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με ελάχιστη την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

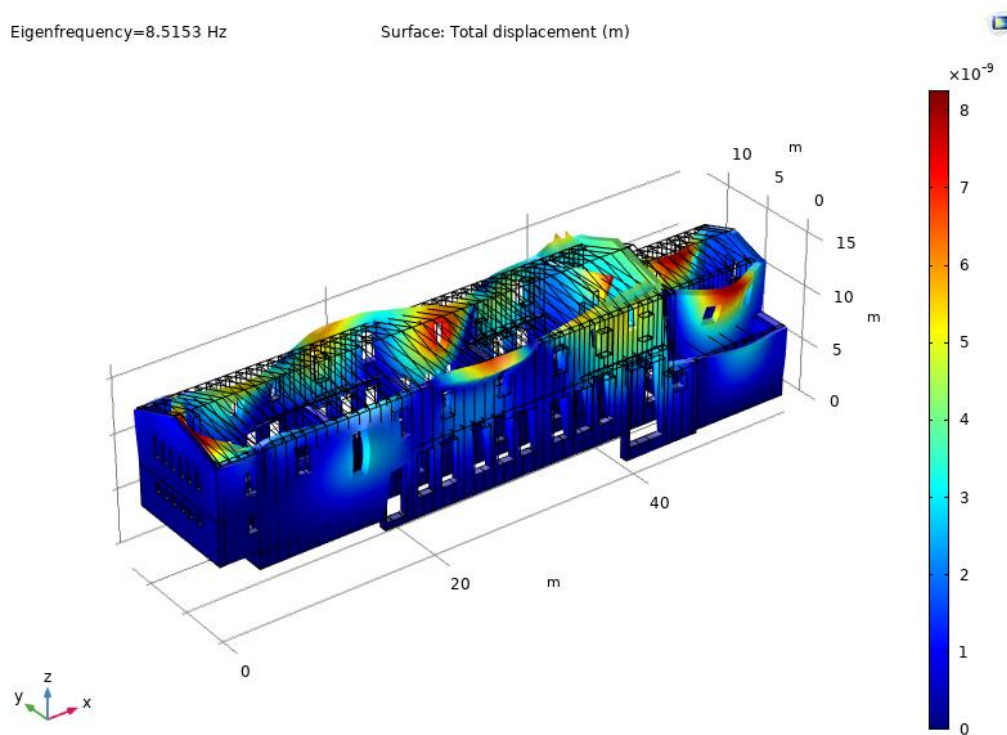


Εικόνα 162 Ορθές τάσεις στον άξονα Z με μέγιστη την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Μπορεί κανείς να διακρίνει ότι κανένα σημείο δεν υπερβαίνει την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Σχετικά με την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας, όμως, παρατηρείται ότι οι περιοχές που συνδέονται με τα δοκάρια των ζευκτών, για τον άξονα X και Y, αποτελούν ευαίσθητες περιοχές του φορέα στις οποίες θα μπορούσαν να αναπτυχθούν αστοχίες. Στην εικόνα 159 φαίνεται μικρή μείωση των περιοχών αστοχίας (τιμή μικρότερη της μονάδας) συγκριτικά με την εικόνα 139, συνεπώς βελτιώνεται η μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής με τις αρχιτεκτονικές προτάσεις και δομικές επεμβάσεις.

7.2. Ιδιομορφική ανάλυση του φορέα

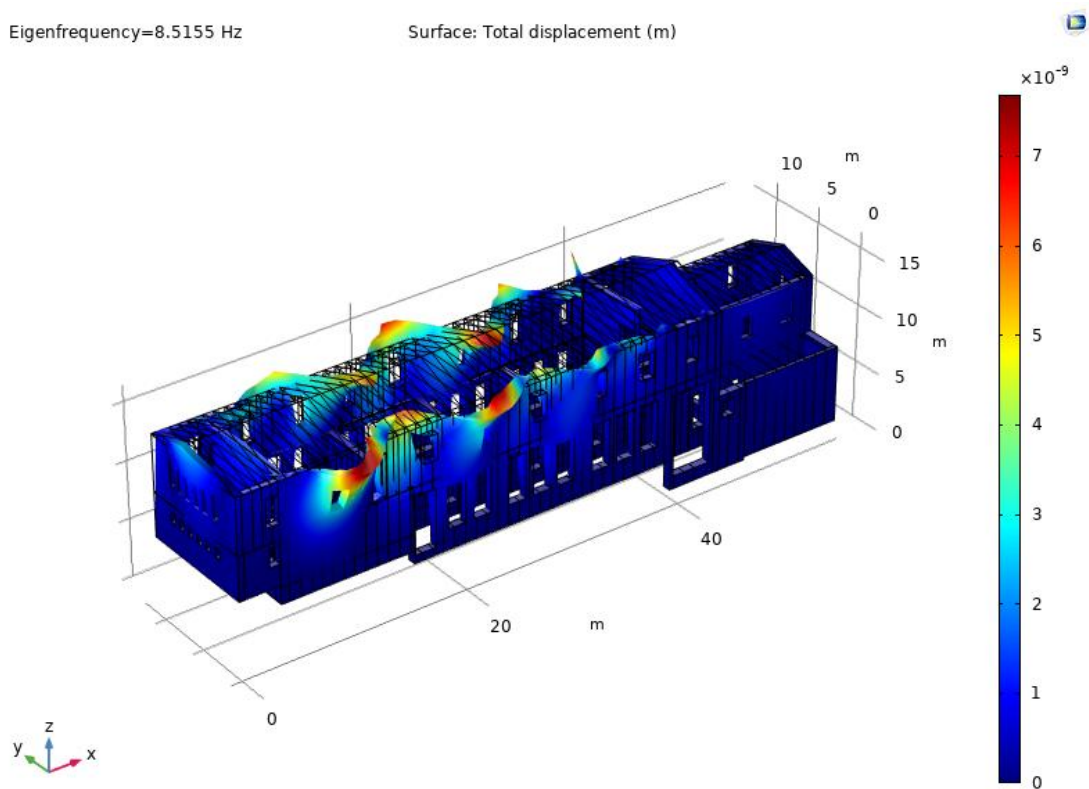
Στις εικόνες 163-172 που ακολουθούν παρατίθενται οι πρώτες 10 ιδιομορφές της κατασκευής.



Εικόνα 163: 1^η ιδιομορφή στα 8,5153 Hz

Eigenfrequency=8.5155 Hz

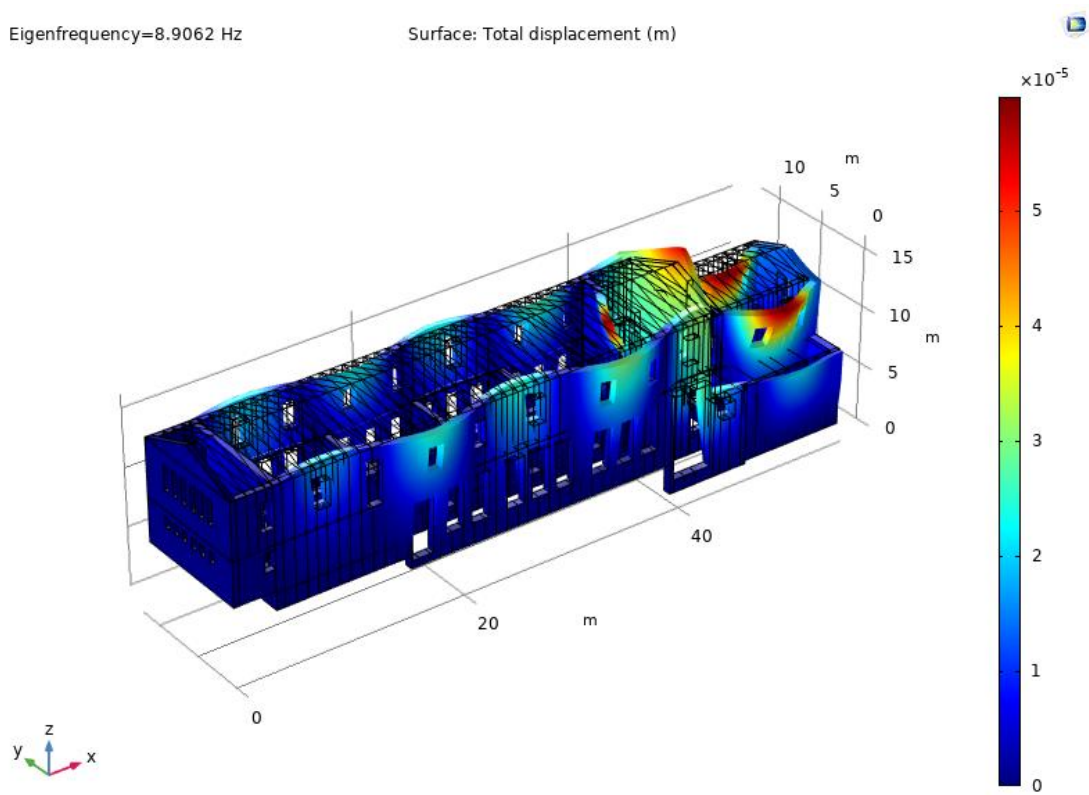
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 164: 2^η ιδιομορφή στα 8,5155 Hz

Eigenfrequency=8.9062 Hz

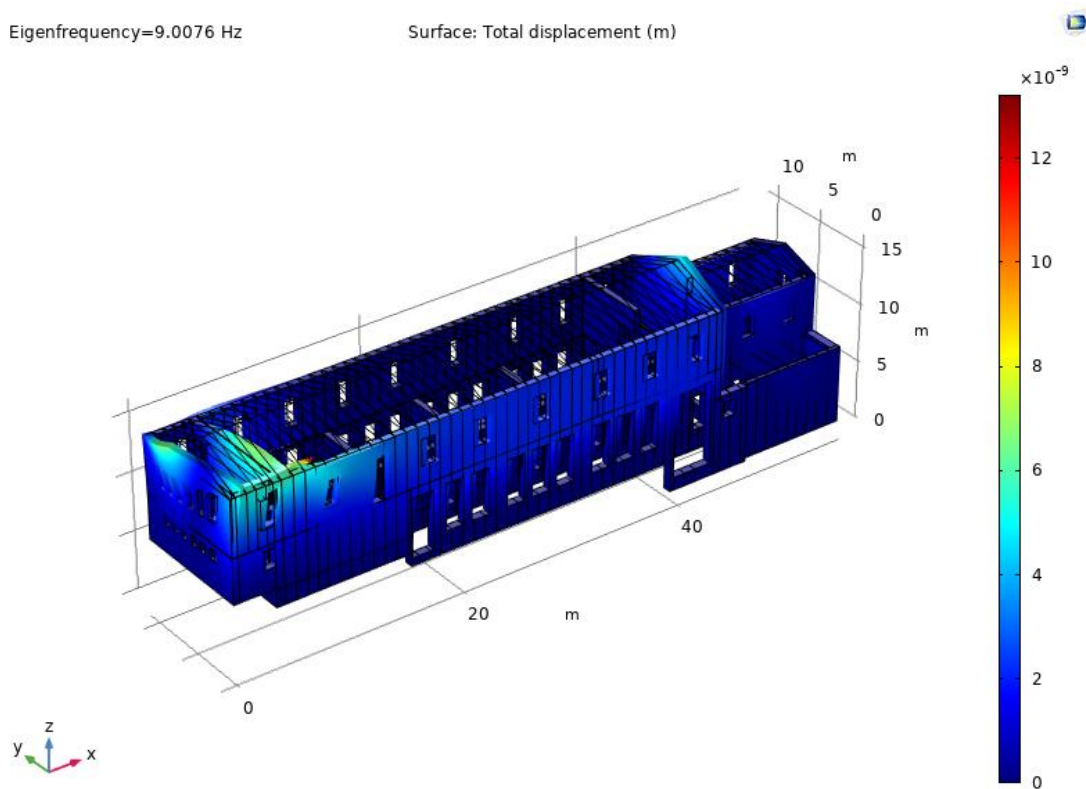
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 165: 3^η ιδιομορφή στα 8,9 Hz

Eigenfrequency=9.0076 Hz

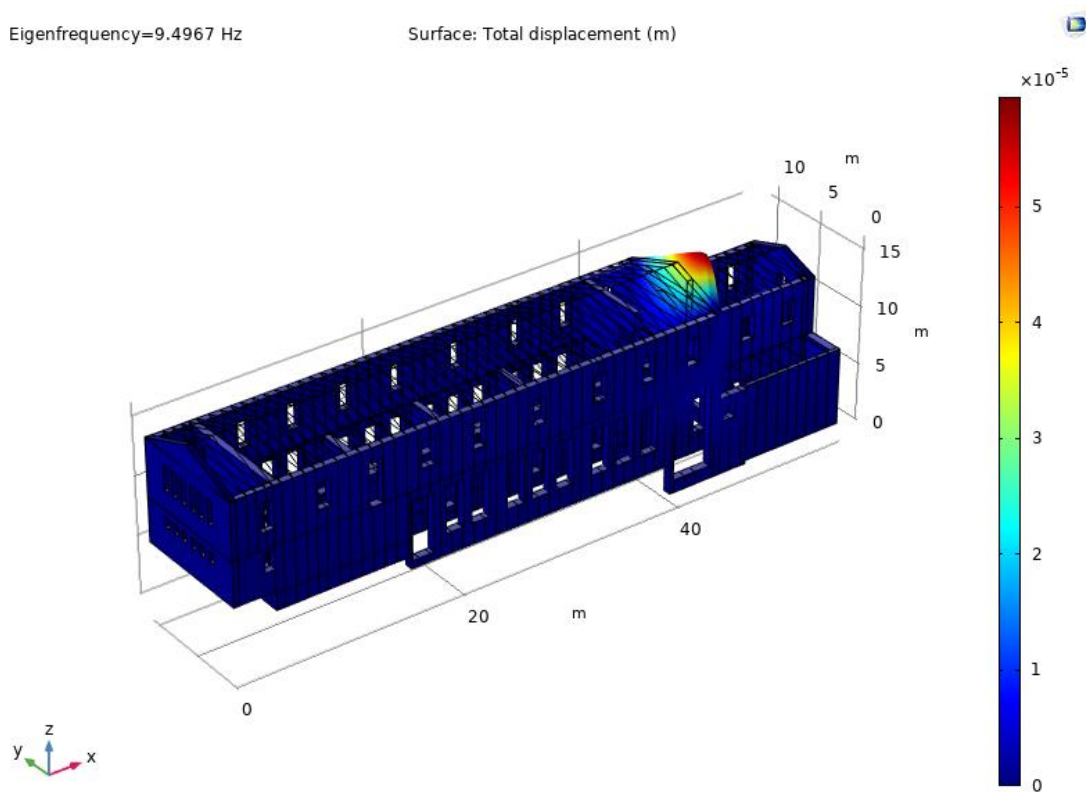
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 166: 4^η ιδιομορφή στα 9,0076 Hz

Eigenfrequency=9.4967 Hz

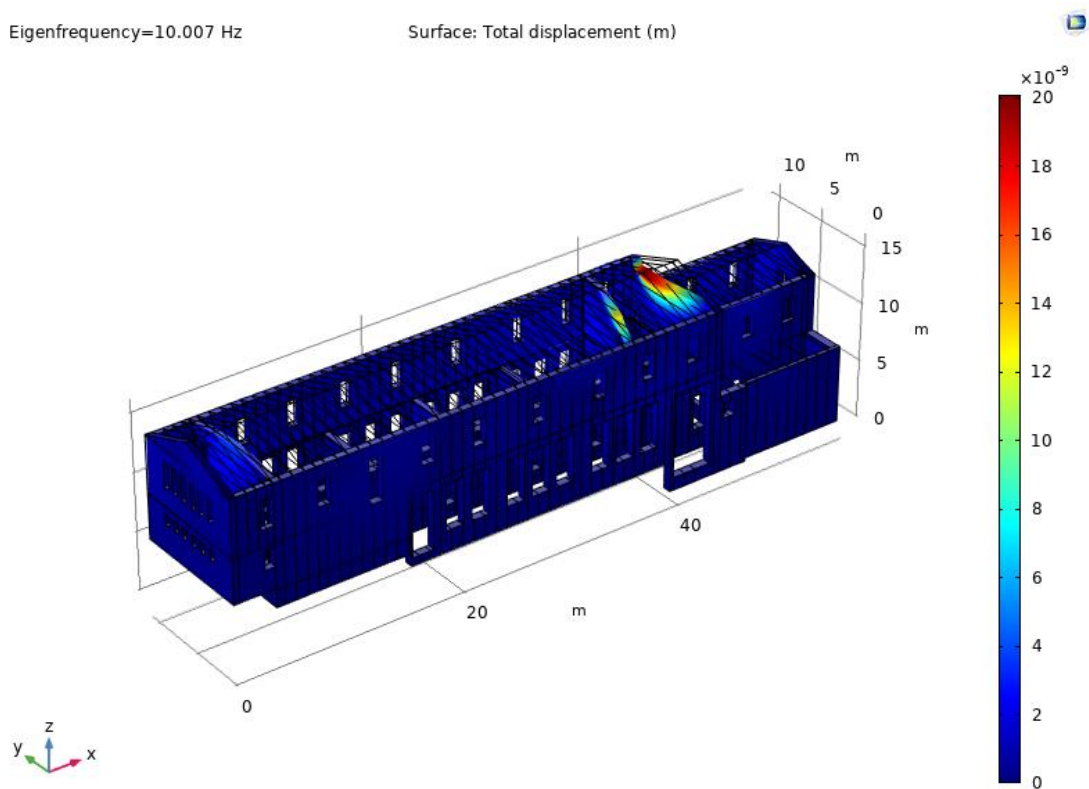
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 167: 5^η ιδιομορφή στα 9,4967 Hz

Eigenfrequency=10.007 Hz

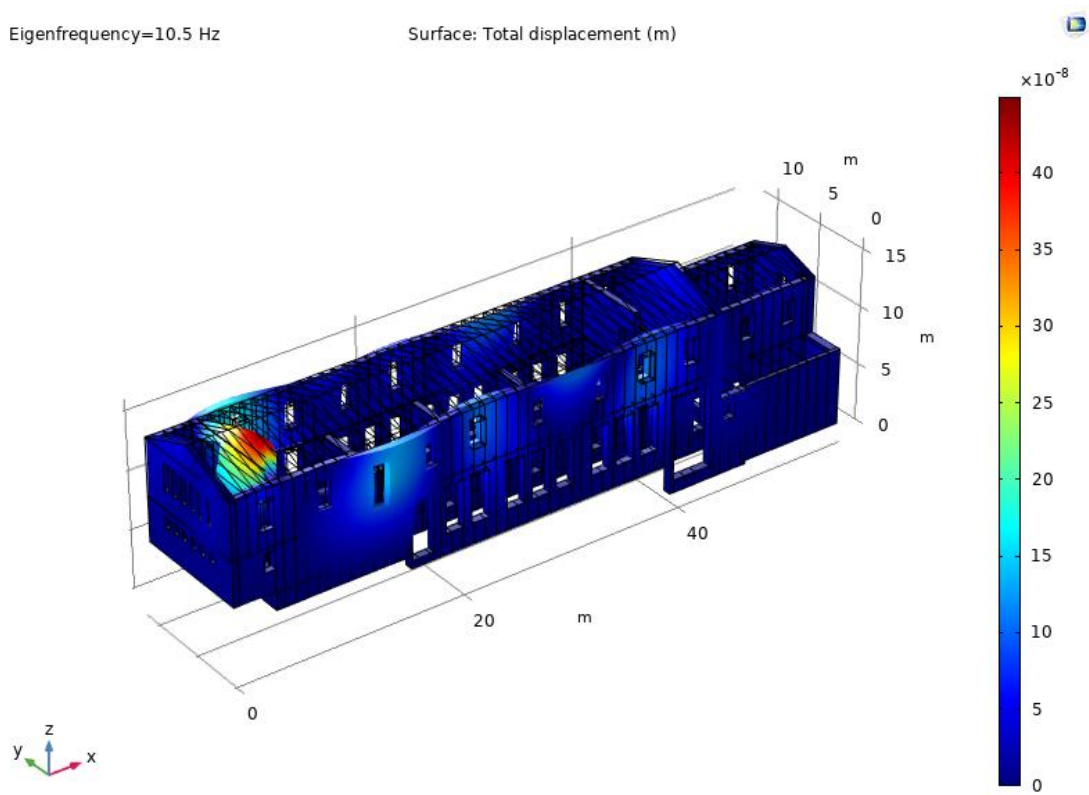
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 168: 6^η ιδιομορφή στα 10,007 Hz

Eigenfrequency=10.5 Hz

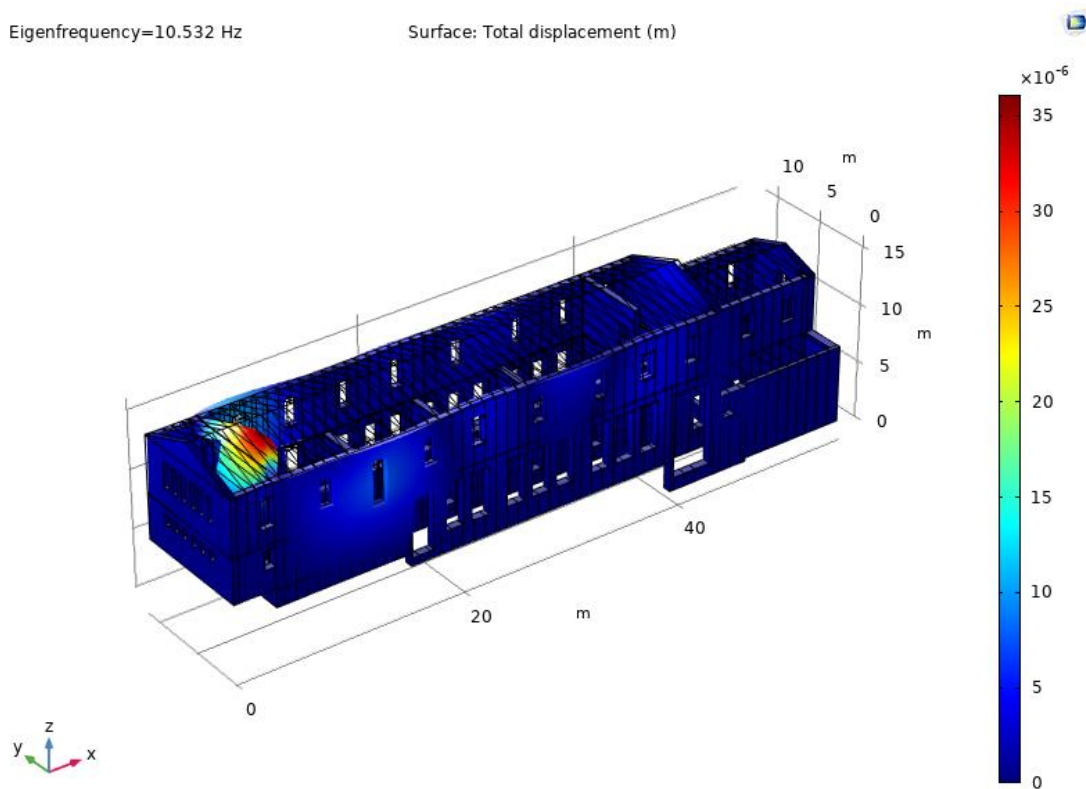
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 169: 7^η ιδιομορφή στα 10,5 Hz

Eigenfrequency=10.532 Hz

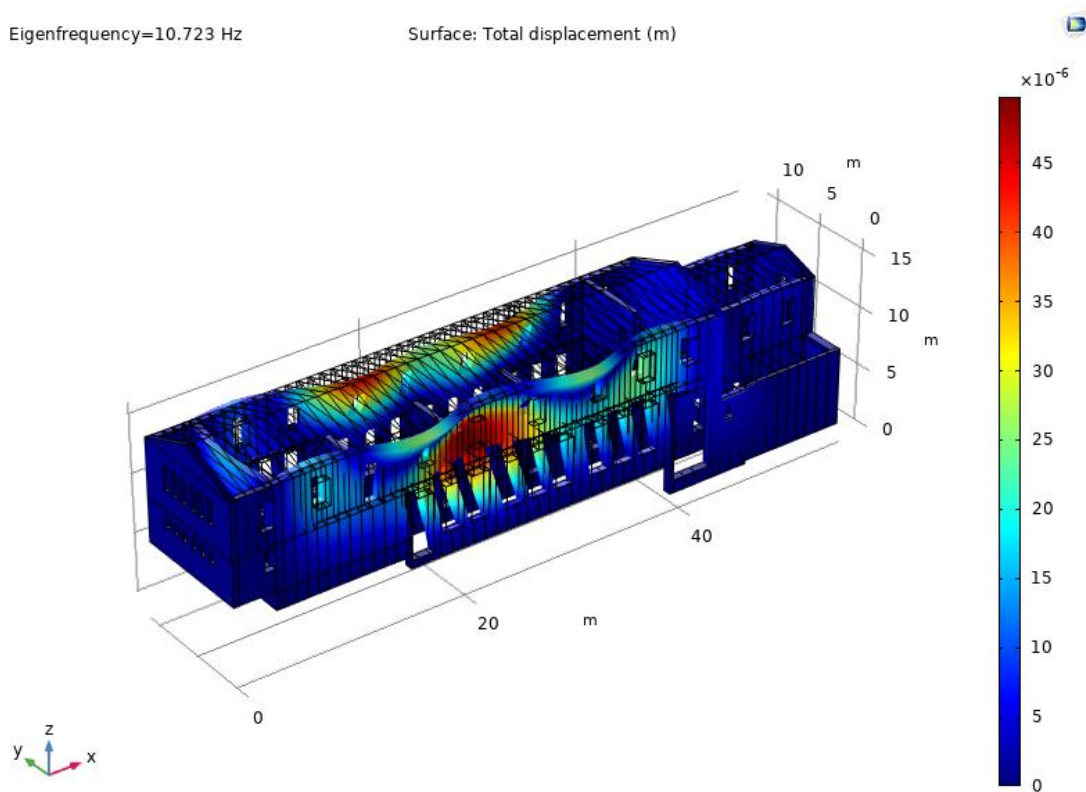
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 170: 8^η ιδιομορφή στα 10,532 Hz

Eigenfrequency=10.723 Hz

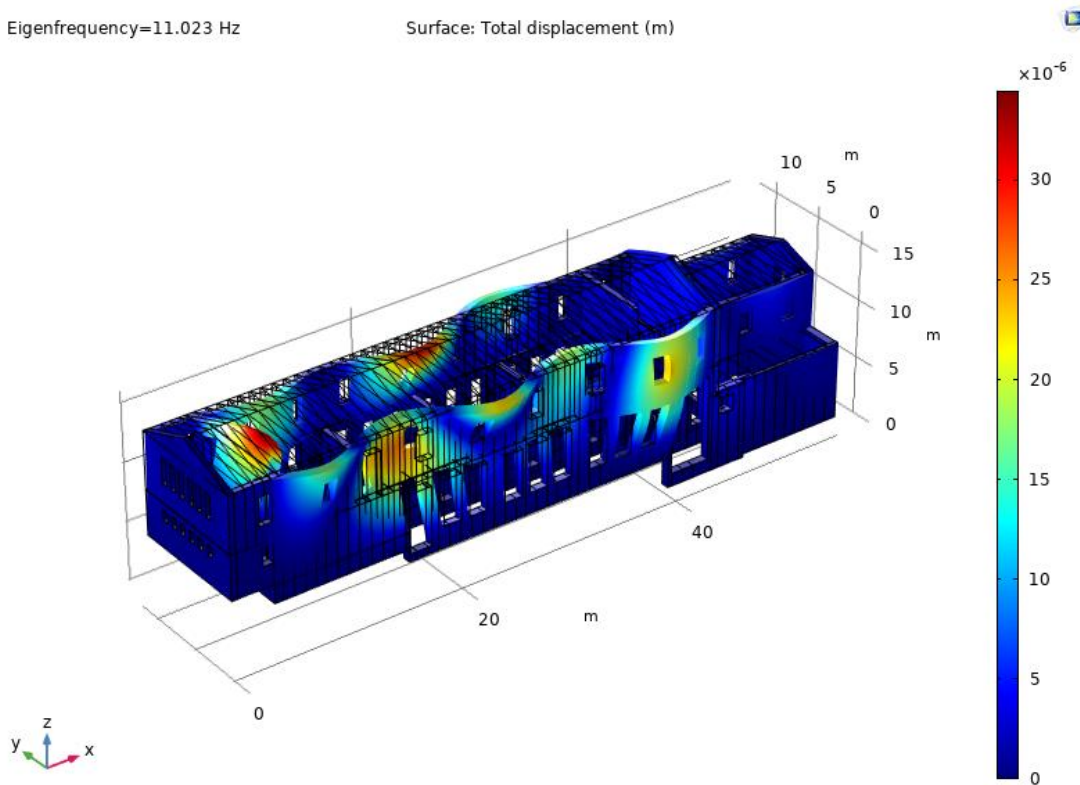
Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 171: 9^η ιδιομορφή στα 10,723 Hz

Eigenfrequency=11.023 Hz

Surface: Total displacement (m)



Εικόνα 172: 10^η ιδιομορφή στα 11,023 Hz

Παρατηρείται ότι η κατασκευή παρουσιάζει περιοχές με έντονη ταλάντωση αρχικά στον όροφο, στην δυτική και ανατολική τοιχοποιία και έπειτα επεκτείνονται στις υπόλοιπες εσωτερικές τοιχοποιίες και στο ισόγειο. Διαπιστώνεται ότι η ανατολική και δυτική τοιχοποιία οι οποίες περιέχουν μεγάλα ανοίγματα είναι αυτές που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες ταλαντώσεις.

7.3 Δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής

Για τη δημιουργία του φάσματος επιλέγεται μικρότερη ιδιοπερίοδο T_1 σε σχέση με την τιμή που προτείνει ο κανονισμός, για τη διεύρυνση του πλάτους του φάσματος προς τα αριστερά, εξαιτίας της εμφάνισης χαμηλής $1^{η}$ ιδιοπεριόδου στην ανάλυση ιδιομορφών της κατασκευής.

Η φασματική ανάλυση (response spectrum analysis) της κατασκευής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. [76]

Επίσης υιοθετήθηκε τιμή 1 για τον συντελεστή συμπεριφοράς εξαιτίας της σπουδαιότητας του μνημείου που μελετάται.

Επιπρόσθετα, στην ανάλυση ελήφθησαν υπ' όψιν οι ιδιομορφές με ποσοστό συμμετοχής περίπου 85% για τις οριζόντιες διευθύνσεις και 85% για την κατακόρυφη διεύθυνση. Τέλος, οι τιμές του φάσματος πολλαπλασιάστηκαν με συντελεστή 1,4 (σπουδαιότητας), για υλοποίηση της δυσμενέστερης φόρτισης με σεισμό, κατά τον Ευρωκώδικα 1 [75].

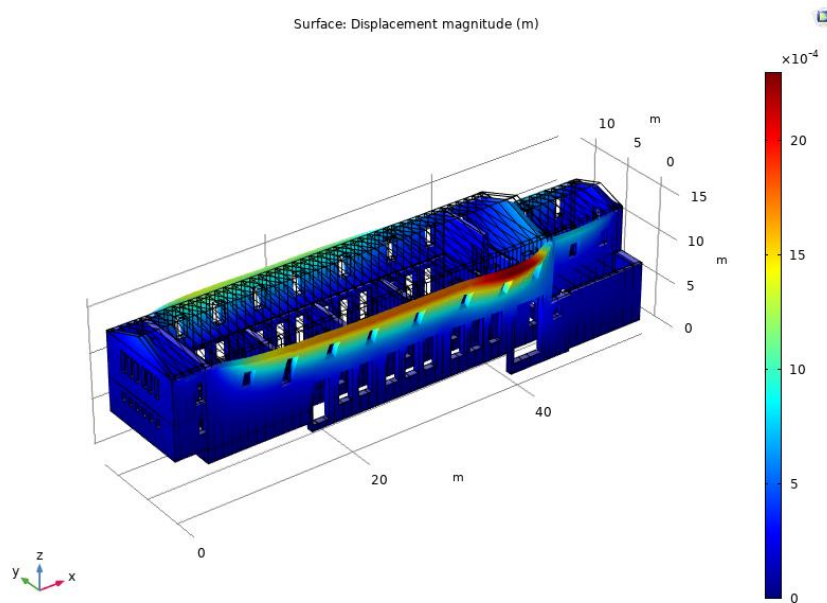
Το φάσμα σχεδιασμού παρατίθεται στην εικόνα 143 του Κεφαλαίου 6 και οι βασικές παραδοχές στον πίνακα 7 του Κεφαλαίου 4.

Οι σεισμικοί συνδυασμοί που λαμβάνονται είναι οι εξής:

- 1) $S_d = G + 0,3Q + SEX + 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 2) $S_d = G + 0,3Q + SEX - 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 3) $S_d = G + 0,3Q - SEX - 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 4) $S_d = G + 0,3Q - SEX + 0.30 SEY + 0,3 SEZ$
- 5) $S_d = G + 0,3Q + SEY + 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 6) $S_d = G + 0,3Q + SEY - 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 7) $S_d = G + 0,3Q - SEY - 0.30 SEX + 0,3 SEZ$
- 8) $S_d = G + 0,3Q - SEY + 0.30 SEX + 0,3 SEZ$

Για τον υπολογισμό της τελικής απόκρισης της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SRSS (Square root of the sum of square) για το συνδυασμό των ιδιομορφών.

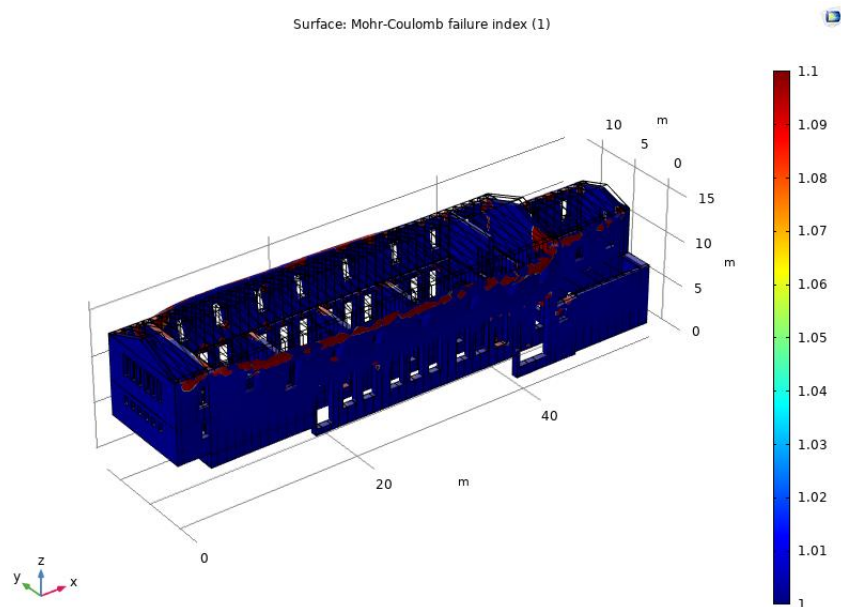
Στην εικόνα 173 απεικονίζονται οι μετακινήσεις για την 1^η περίπτωση σεισμικού συνδυασμού. Οι μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται στην δυτική όψη της κατασκευής όπου υπάρχουν και μεγάλα ανοίγματα.



Εικόνα 173: Οι συνολικές μετακινήσεις για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό

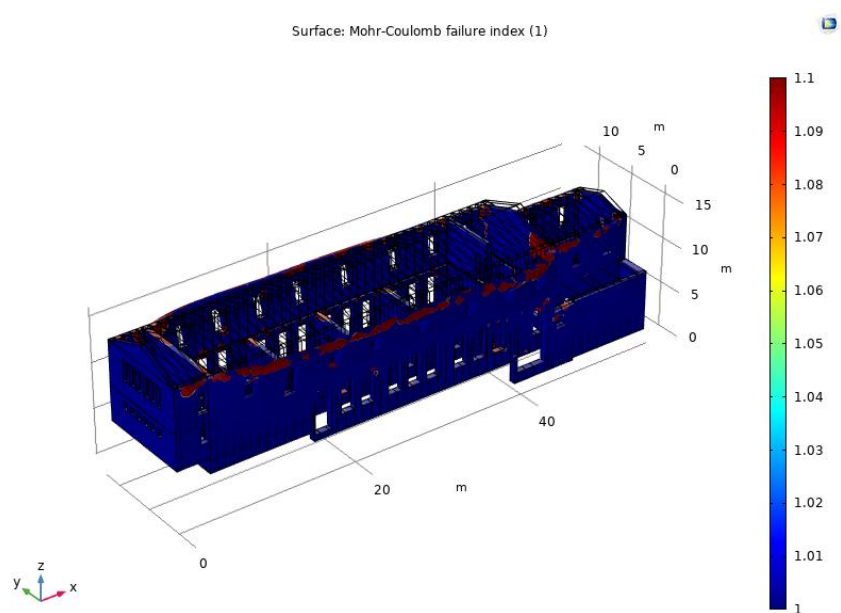
Για τον εντοπισμό των περιοχών όπου η κατασκευή αστοχεί, πραγματοποιήθηκε χρήση κριτηρίου αστοχίας μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης (εφελκυστική και θλιπτική αντοχή) Mohr Coulomb το οποίο υποδεικνύει τις περιοχές όπου πραγματοποιείται υπέρβαση των κύριων τάσεων από τις τιμές αντοχής του υλικού κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Άρα παρουσιάζονται και οι πιθανές περιοχές αστοχίας.

Στην εικόνα 174 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό και στην εικόνα 175 για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει τις περιοχές που η τιμή του κριτηρίου υπερβαίνει την μονάδα και συνεπώς στην περιοχή αυτή θα παρουσιαστεί πιθανή αστοχία. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των υπερβάσεων στις θέσεις σύνδεσης των ζευκτών και των πατωμάτων με τις τοιχοποιίες.



Εικόνα 174: Περιοχές αστοχίας για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό

5^{ος} συνδυασμός: G+0,3Q +0,3SEX +SEY +0,3SEZ

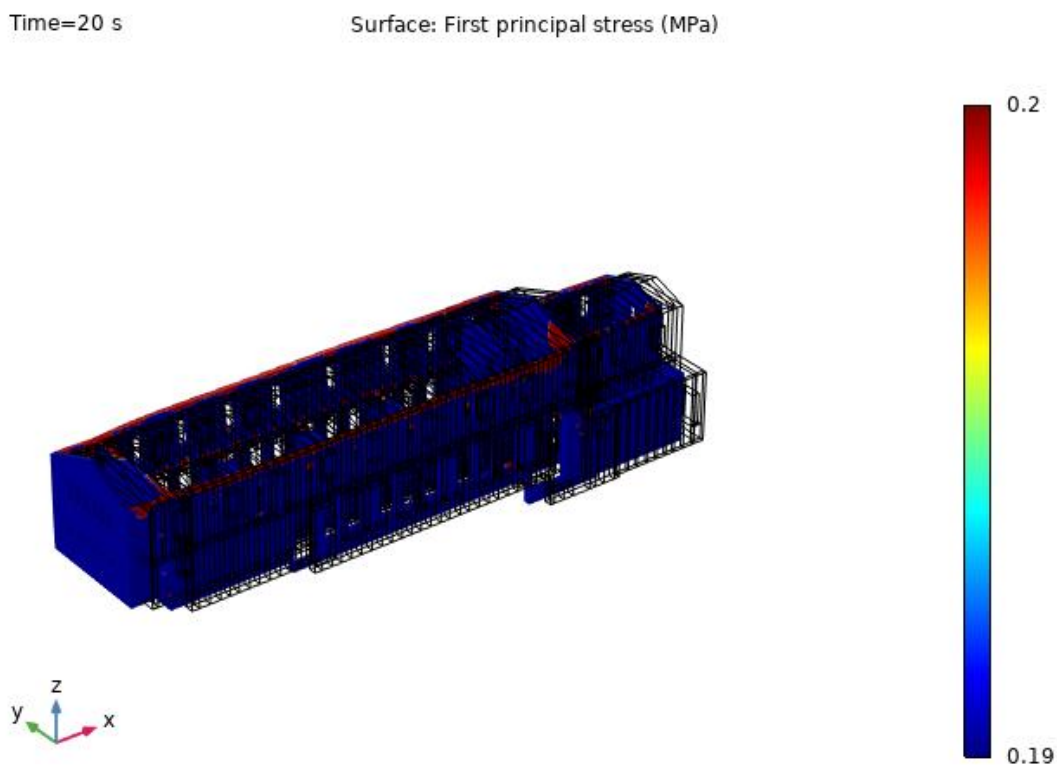


Εικόνα 175 Περιοχές αστοχίας για τον 5^ο σεισμικό συνδυασμό

7.4. Δυναμική απόκριση κατασκευής σε πραγματικό σεισμικό γεγονός

Οι αναλύσεις με τις αρχιτεκτονικές προτάσεις και τις δομικές επεμβάσεις ολοκληρώνονται με τη διεξαγωγή δυναμικής απόκριση σε πραγματικό σεισμικό γεγονός. Χρησιμοποιήθηκαν χρονοϊστορίες μετατόπισης από το σεισμικό γεγονός που συνέβη στην πόλη Irpinia της Ιταλίας το 1980 με σεισμική ένταση 6,69 R. Στην εικόνα 148 απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες κατά X, Y και Z.

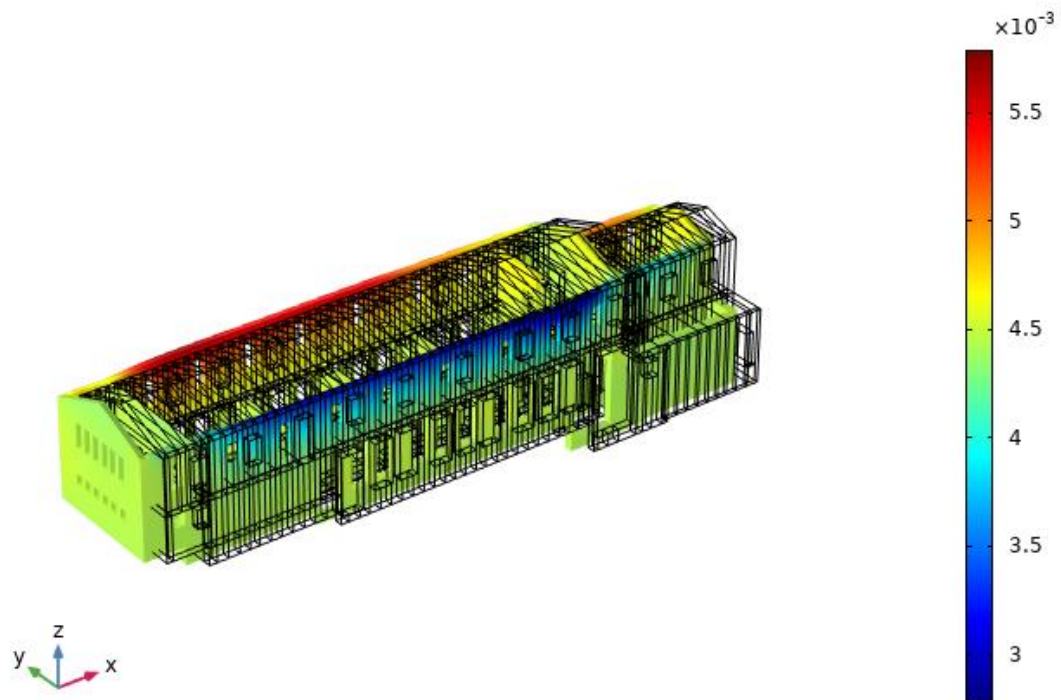
Στις εικόνες 176-177 παρουσιάζονται αποτελέσματα σε χρόνο 20 sec (με συνολικό χρόνο διέγερσης 39 sec) για την τις κύριες ορθές τάσεις και τη συνολική μετατόπιση. Στην χρωματική απεικόνιση μεταβολής της κύριας τάσης απεικονίζονται και οι περιοχές που ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή. Αυτές οι περιοχές είναι στην θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με τα δάπεδα και τα ζευκτά της στέγης καθώς και η εσωτερική τοιχοποιία που οδηγεί στο κεντρικό κλιμακοστάσιο.



Εικόνα 176 Κύριες ορθές τάσεις στα 20sec

Time=20 s

Surface: Displacement magnitude (m)

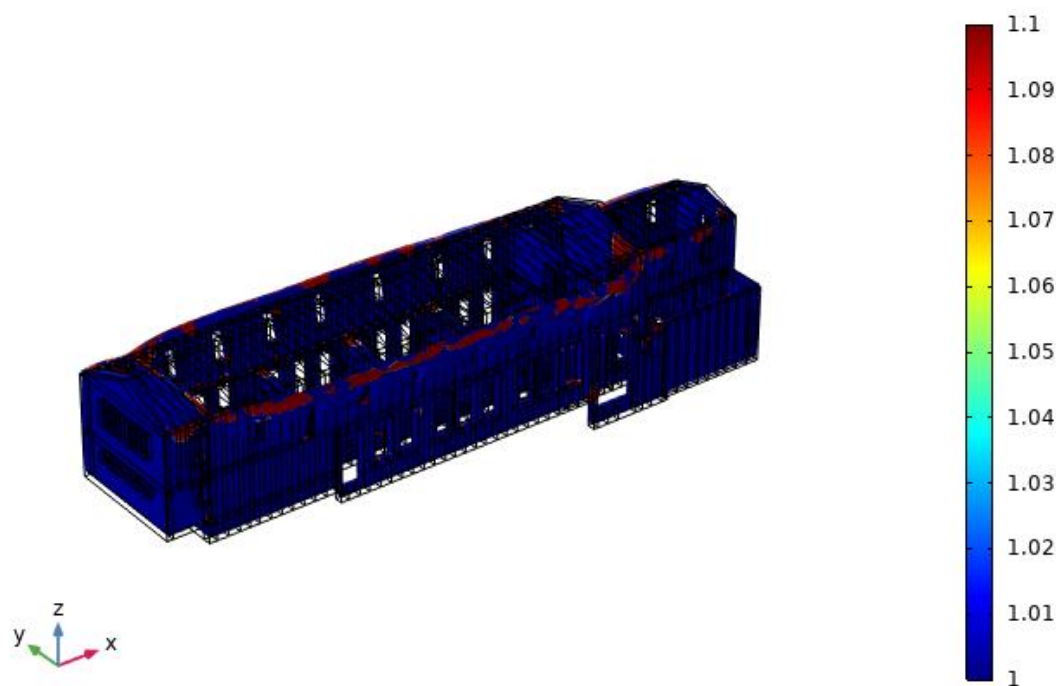


Εικόνα 177 Μετακινήσεις στα 20 sec

Στις εικόνες 178-179 παρουσιάζεται το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb σε χρόνο 30sec. Οι περιοχές που απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα αποτελούν τις περιοχές αστοχίας. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των υπερβάσεων (μεγαλύτερη τιμή της μονάδας) στις θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με την τοιχοποιία.

Time=30 s

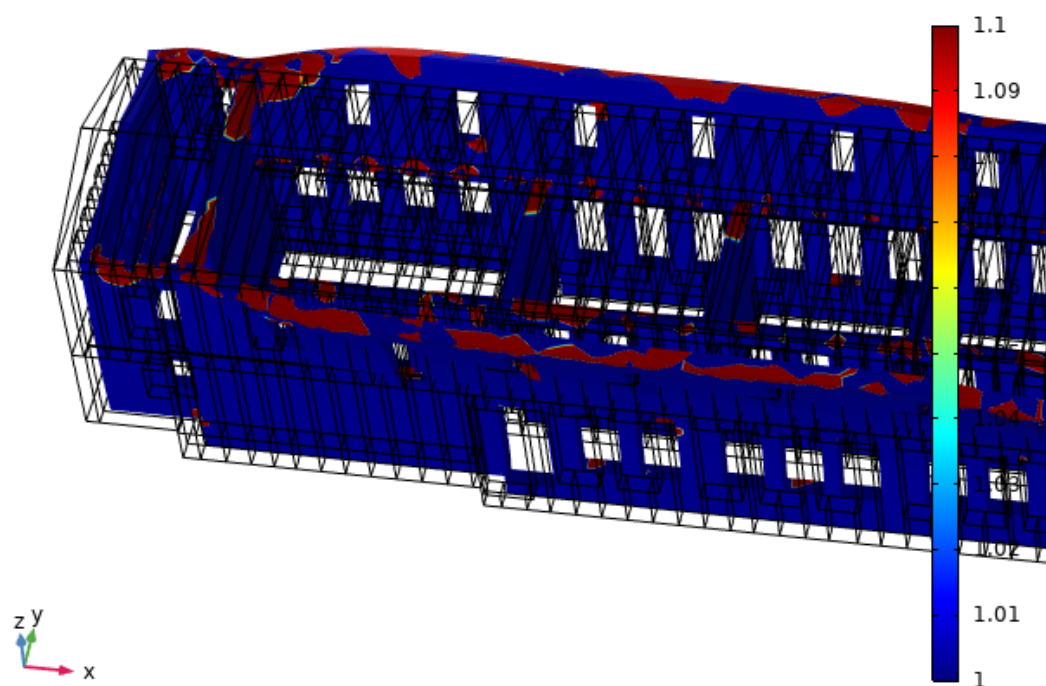
Surface: Mohr-Coulomb failure index (1)



Εικόνα 178: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb

Time=30 s

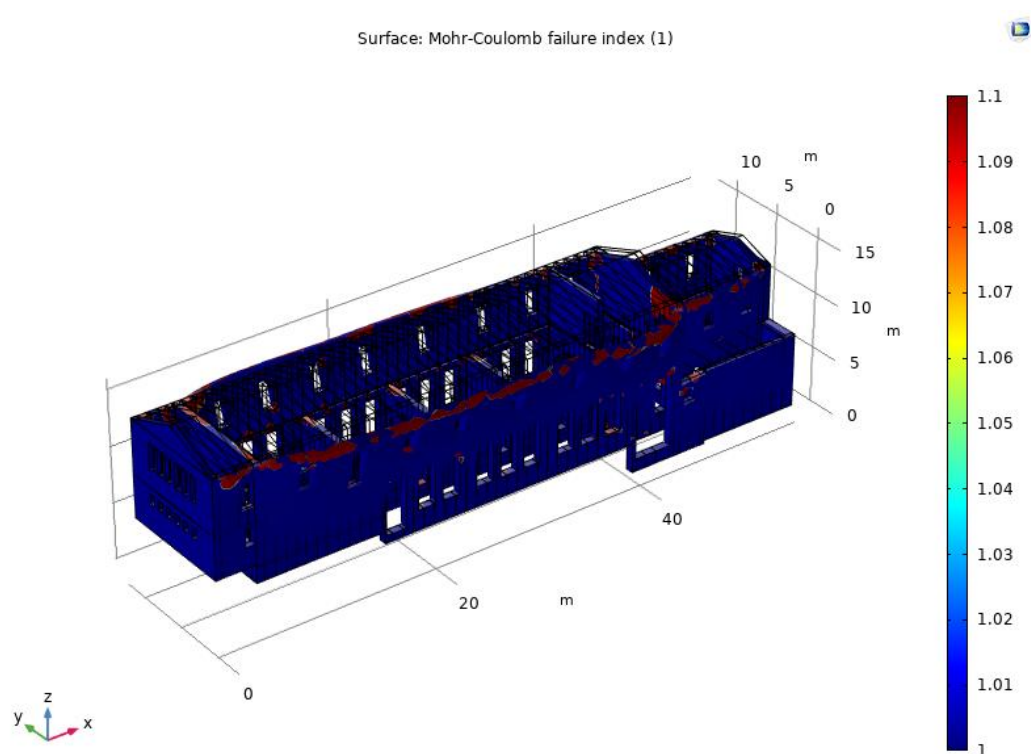
Surface: Mohr-Coulomb failure index (1)



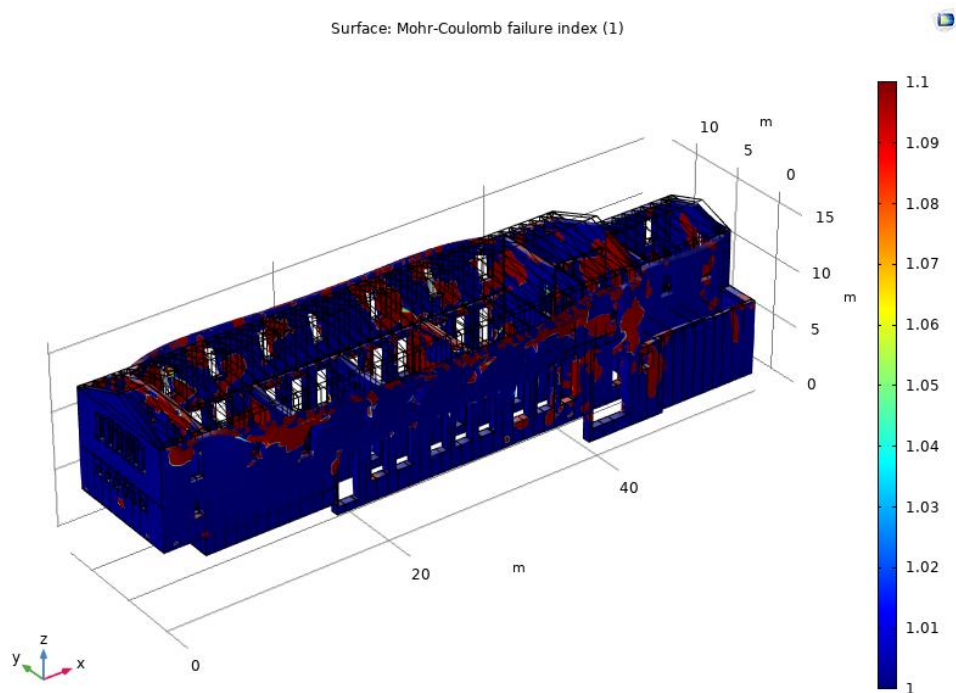
Εικόνα 179: Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb (με λεπτομέρεια στον βόρειο όγκο)

7.5. Σύγκριση δυναμικής απόκρισης μοντέλου επεμβάσεων με το μοντέλο υφιστάμενης κατάστασης

Στην εικόνα 180-181 παρατίθενται η δυναμική φασματική ανάλυση σύμφωνα με το κριτήριο Mohr Coulomb για τον 1^ο σεισμικό συνδυασμό για μοντέλο των επεμβάσεων (εικόνα 180) και το μοντέλο στην υφιστάμενη κατάσταση (εικόνα 181)



Εικόνα 180: Δυναμική φασματική απόκριση μοντέλο επεμβάσεων



Εικόνα 181: Δυναμική φασματική απόκριση στην υφιστάμενη κατάσταση

Διαπιστώνεται ότι οι περιοχές αστοχίας, δηλαδή αυτές που ξεπερνάνε την τιμή της αντοχής του υλικού (την τιμή της μονάδας) είναι αρκετά λιγότερες στο μοντέλο επεμβάσεων συγκριτικά με το αποτέλεσμα στην υφιστάμενη κατάσταση. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι η κατάσταση βελτιώνεται χωρίς να χρειάζεται να ληφθούν περεταίρω μέτρα αντιμετώπισης, παρά μόνο στις θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με την τοιχοποιία

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα-Προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της προσομοίωσης ενός ιστορικού κτιρίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και της προσέγγισης των υπολογιστικών τιμών των ιδιοσυχνοτήτων με παράλληλη χρήση των πειραματικών τιμών, με στόχο τον βέλτιστο έλεγχο της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής. Για την διαδικασία της βελτιστοποίησης θεωρήθηκε ως μεταβλητή το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας και έγινε χρήση συστήματος προηγμένης τεχνολογίας laser (laser vibrometry) το οποίο καταγράφει μικροδονήσεις των ελεγχόμενων κατασκευών. Συνεπώς η μεθοδολογία που ακολουθείται αποτελεί ένα εγχείρημα παράλληλης προσέγγισης της πειραματικών μεθόδων με την υπολογιστική μηχανική με στόχο τον βέλτιστο έλεγχο της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ένα ιστορικό κτίριο από φέρουσα τοιχοποιία, την Πρώην Ιερατική Σχολή της Ιεράς Μονής Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων, στα Χανιά.

Σχετικά με την συνολική μεθοδολογία της διπλωματικής εργασίας, σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη σύγχρονες και καινοτόμες μεθόδους ανάλυσης μιας μνημειακής κατασκευής οι οποίες αποτελούν συχνά αντικείμενο έρευνας και προβληματισμού τα τελευταία χρόνια. Κατά την ανάπτυξη της προκύπτουν πλεονεκτήματα αλλά και συγχρόνως μειονεκτήματα.

Αρχικά, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, βοηθάει στην ρεαλιστική προσέγγισή του κτιρίου εφόσον λαμβάνονται αρκετές αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες της δομής και της μορφολογίας του. Παράλληλα, όμως, δημιουργούνται αρκετές αβεβαιότητες ως προς τις μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών που εφαρμόζονται στο πρόγραμμα γι' αυτό και επιλέχτηκε να γίνει βελτιστοποίηση.

Έπειτα, η χρήση του συστήματος laser PSV-500H (laser vibrometry) αποτελεί μία καινοτόμα, μη επεμβατική τεχνική καταγραφής των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής από απόσταση, ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός για τις ευαίσθητες επιφάνειες των τοιχοποιιών μία ιστορικής κατασκευής όπου απαιτείται οι τοιχοποιίες να μην αλλοιώνονται αισθητικά. Συγχρόνως, όμως, το laser vibrometer δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδος επιφανειών διότι απαιτείται να ανακλάται το 10% της προσπίπτουσας ακτίνας laser αλλιώς η μέτρηση του πλάτους και της φάσης της ταχύτητας δόνησης της κατασκευής δεν είναι επιτυχής [61]. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε και κατά την διαδικασία της πειραματικής εφαρμογής στο κτίριο μελέτης καθώς και με την επίδραση του ήλιου ήταν δύσκολη η στόχευση της δέσμης laser στα επιδιωκόμενα σημεία ελέγχου. Ακόμη, η εγκατάσταση του οργάνου είναι χρονοβόρα και παράλληλα η εφαρμογή του σε όροφο είναι δύσκολη λόγω της σχετικής και ταυτόχρονης μετακίνησης του οργάνου και του ορόφου.

Όσον αφορά την βελτιστοποίηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί ενδεχομένως ειδικές γνώσεις καθώς πρόκειται για έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο αλλά και μία ευρεία μαθηματική έννοια που εφαρμόζεται με αρκετές μεθόδους [23]. Για αυτούς τους λόγους, κατά την εφαρμογή της στην διπλωματική εργασία, ήταν απαραίτητη η διερεύνηση της βιβλιογραφίας και θεωριών για την διεξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων. Ακόμη, κρίθηκε απαραίτητη η πειραματική εφαρμογή σε εργαστηριακές συνθήκες ώστε να πραγματοποιηθούν στην συνέχεια οι επιτόπιες πειραματικές μετρήσεις στο κτίριο μελέτης. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις με το laser vibrometer στο εργαστήριο ήταν αρκετά κοντά στα δεδομένα που είχαν ληφθεί, οπότε επιβεβαιώθηκε η ορθότητα της μεθοδολογίας.

Παρόλα τα μειονεκτήματα, όμως, με την εφαρμογή της στο μοντέλο της υφιστάμενης κατάστασης, η πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε με αποδεκτά αποτελέσματα που ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα χωρίς να χρειάζεται να προχωρήσει κανείς σε πειραματικές

δειγματοληπτικές μεθόδους οι οποίες μπορεί να αλλοιώνουν την επιφάνεια της λιθόκτιστης κατασκευής.

Σχετικά με την διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς που προκύπτει από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην υφιστάμενη κατάσταση, συμπεραίνεται ότι παρουσιάζονται κάποιες περιοχές αστοχίας όπως στα ανοίγματα και στη δυτική όψη της τοιχοποιίας. Η δυναμική ανάλυση του φορέα με το φάσμα σχεδιασμού αλλά και το σεισμικό γεγονός συμβάλλει στην τελική εκτίμηση της απόκρισης του φορέα επιβεβαιώνοντας τις θέσεις εφαρμογής επεμβάσεων. Με τα αποτελέσματα της ανάλυσης συμπεραίνεται ότι έχει σχετικά ικανοποιητική συμπεριφορά λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (κλιματολογικές, γεωλογικές, σεισμοτεκτονικές). Επισημαίνεται ότι στην υφιστάμενη κατάσταση υπάρχουν αστοχίες στα σημεία σύνδεσης των ζευκτών που οφείλεται στην διαφορετική συμπεριφορά των δύο υλικών. Στα σημεία σύνδεσης των τοιχοποιιών με τα πατώματα υπάρχουν ελάχιστες αστοχίες και αυτό οφείλεται στην σωστή σύνδεση της τοιχοποιίας με τα οριζόντια φέροντα στοιχεία και με το πέτωμα των ξύλινων δαπέδων ενισχύοντας την διαφραγματική λειτουργία. Το γεγονός αυτό συμβάλλει θετικά στην μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής παρά την ύπαρξη αρκετών ανοιγμάτων και του μεγάλου ύψους της κατασκευής.

Με την τοπική ενίσχυση των τοιχοποιιών και τις αρχιτεκτονικές προτάσεις συμπεραίνεται ότι ο φορέας συμπεριφέρεται ικανοποιητικά αν και υπάρχουν περιοχές, στις θέσεις σύνδεσης της τοιχοποιίας με τα ζευκτά που ξεπερνάνε την αντοχή της κατασκευής. Ωστόσο, ιδιαίτερα στην δυναμική φασματική ανάλυση, διακρίνεται ότι δεν υπάρχουν πολλές περιοχές αστοχίας και η συμπεριφορά της κατασκευής βελτιώνεται. Συνεπώς, οι επεμβάσεις που προτείνονται συμβάλλουν θετικά στην κατασκευή και φαίνεται ότι η κατασκευή θα ανταποκριθεί θετικά και στο μέλλον.

Πρέπει να επισημανθεί ότι με την διαδικασία της βελτιστοποίησης, στην υφιστάμενη κατάσταση, λαμβάνονται αποτελέσματα τα οποία προσεγγίζουν στα πειραματικά δεδομένα της κατασκευής καθώς το μέτρο ελαστικότητας, στις περιοχές που δεν είναι αποσασθρωμένες, αυξάνεται. Οι αναλύσεις που

προκύπτουν στην υφιστάμενη κατάσταση μετά την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας που βρέθηκε από την βελτιστοποίηση δεν παρουσιάζουν σημαντικές αλλαγές σε σχέση με την αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν πριν την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας.

Με το βέλτιστο μέτρο ελαστικότητας, διεκπεραιώνονται οι αναλύσεις για τον έλεγχο της απόκρισης της κατασκευής έπειτα από τις αρχιτεκτονικές προτάσεις και τις επεμβάσεις. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση επηρεάζει θετικά στην διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής αλλά και στην αποκατάσταση του δομικού συστήματος του φορέα της κατασκευής καθώς προκύπτουν αποτελέσματα που ανταποκρίνονται περισσότερο στις προκείμενες παρεμβάσεις και αρχιτεκτονικές αλλαγές.

Τέλος, η χρήση του laser vibrometer και των επιταχυνσιομέτρων συμβάλλουν στον έλεγχο του υπολογισμού του φάσματος συχνοτήτων της κατασκευής χωρίς να παρεμβαίνει στην αλλοίωση της αισθητικής και της αντοχής των τοιχοποιιών. Πρόκειται για όργανα υψίστης ανάλυσης που βοηθούν στη διεξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων.

8.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας προκύπτουν αρκετές προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εμβάθυνση στο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε. Οι προτάσεις αυτές, όσων αφορά την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, είναι οι εξής:

- Χρήση διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης πέρα από την μέθοδο Monte Carlo και αντικειμενικών συναρτήσεων για επανέλεγχο των αποτελεσμάτων.
- Εισαγωγή περισσότερων ιδιοσυχνοτήτων και τιμών φάσματος συχνοτήτων αντίστοιχα στην σχέση 1 (σχ. 1) και σχέση 2 (σχ.2) για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.
- Δοκιμή με διαφορετική παράμετρο ευαισθησίας για εξέταση εγκυρότητας των αποτελεσμάτων στην διαδικασία της βελτιστοποίησης.
- Περισσότερες πειραματικές μετρήσεις με διαφορετικά σημεία ελέγχου στο κτίριο μελέτης.
- Χρήση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης (optimization) στην ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου.
- Εισαγωγή διαφορετικών παραμέτρων υλικών στην προσομοίωση της κατασκευής ανάλογα με την οικοδομική της φάση.
- Διερεύνηση της μεθοδολογίας σε πεπερασμένα στοιχεία της τοιχοποιίας κατά τη διεύθυνση του πάχους.

Ορισμένες προτάσεις σχετικά με τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής είναι τα εξής:

- Βελτίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής στην δυτική και ανατολική τοιχοποιία και στις θέσεις σύνδεσης των ζευκτών με την τοιχοποιία.
- Προσθήκη είτε διαφραγματικής λειτουργίας (σενάζ) είτε αντικατάστασης υλικού στο ύψος της στέψης της τοιχοποιίας ώστε η μηχανική συμπεριφορά του κτιρίου να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

Βιβλιογραφία

- 1) COMSOL, Inc. Comsol Multiphysics software
- 2) Polytec GmbH. Laser Doppler vibrometry: PSV 500 scanning vibrometer. Germany: Polytec GmbH; 2019
- 3) A. Troi, EURAC research, Z. Bastian, Passive House Institute, 'Energy efficiency solutions for historic buildings – A Handbook', Birkhäuser, 2013
- 4) International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964), ICOMOS – International Council on Monuments and Sites
- 5) Ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης με επιστημονικά υπεύθυνη την Καθηγήτρια Κωτσάκη Αμαλία με τίτλο «Διερεύνηση δυνατοτήτων προστασίας, ανάδειξης, αποκατάστασης και επανάχρησης κτηρίου πρώην Ιερατικής Σχολής, καθώς και των παρακείμενων ερειπωμένων κτισμάτων κατοικιών στην Ιερά Μονή Αγίας Τριάδος Τζαγκαρόλων στα Χανιά Κρήτης μαζί με τον περιβάλλοντα χώρο τους», (2021)
- 6) Structural Vibration Solutions A/S, ARTeMIS Modal software
- 7) Laefer D., Truong-Hong L., Carr H., Singh M., (2014), International crack detection limits in unit based masonry with terrestrial laser scanning, NDT & E Int. 62 66–76.
- 8) Tomaszewska A., (2010), Influence of statistical errors on damage detection based on structural flexibility and mode shape curvature, Comput. Struct. 88 154–164.

- 9) Tomaszewska A., Szymczak C., (2012), Identification of the Vistula Mounting tower model using measured modal data, Eng. Struct. 42 342–348.

- 10) Grillanda N., Chiozzi A., Bondi F., Tralli A., Manconi F., Stochino F., Cazzani A., (2019), Numerical insights on the structural assessment of historical masonry stellar vaults: the case of Santa Maria del Monte in Cagliari, Continuum Mech. Thermodyn. 1–24, <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00752-8>

- 11) Spyarakos, C.C., (1995), 'Finite Element Modeling in Engineering Practice', Algor Publishing Division, Pittsburgh, P.A., 1995.

- 12) Leftheris B.P., Stavroulaki M.E., Sapounaki A.C. and Stavroulakis G.E., Computational Mechanics for Heritage Structures, WITpress, Boston, 2006.

- 13) Stavroulaki M.E., Drosopoulos G.A., Tavlopoulou E., Skoutelis N., Stavroulakis G.E., (2018), Investigation of the Structural Behaviour of a Masonry Castle by Considering the Actual Damage, International Journal of Masonry Research and Innovation 3, pp. 1-33

- 14) Drosopoulos G.A., Phakwago J., Stavroulaki M.E., Stavroulakis G.E., (2019), Investigation of the Structural Response of Masonry Structures. In: Moropoulou A., Korres M., Georgopoulos A., Spyarakos C., Mouzakis C. (eds) Transdisciplinary Multispectral Modeling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage. TMM_CH 2018. Communications in Computer and Information Science, 962, pp. 143–156. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-12960-6_10

- 15) Σπυράκος Κ., (2019), 'Κατασκευές από τοιχοποιία, Αποτίμηση & επεμβάσεις για σεισμικά φορτία', Αθήνα

- 16) Stavrulaki M., Tsinarakis T., (2011), Finite Element Analysis of masonry barrel vaults, Report of 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics 2011
- 17) Wei-Xin Ren, Hua-Bing Chen, (2009), Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method, Άρθρο δημοσιευμένο στο επιστημονικό περιοδικό Engineering Structure
- 18) Λαγίου Μ., (2018), Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς φορέων από άοπλη τοιχοποιία μέσω προσομοίωσης με μακροστοιχεία, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Β' Ειδίκευση
- 19) Ταυλοπούλου Ε., (2015), Μελέτη αποκατάστασης ενός παραδοσιακού κτηρίου από φέρουσα τοιχοποιία στο Βάμο, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Μεταπτυχιακού Προγράμματος Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Β' Ειδίκευση
- 20) Φωτίου Α., (2018), Διερεύνηση του τρόπου αποκατάστασης παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία με παράλληλο στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Μεταπτυχιακού Προγράμματος Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Β' Ειδίκευση
- 21) Lacanna G., Betti M., Ripepe M., Bartoli G., (2020), Dynamic Identification as a Tool to Constrain Numerical Models for Structural Analysis of Historical Buildings, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο "Frontiers in Built Environment"
- 22) Girardi M, Padovani C, Pellegrini D., Porcellu M., Robol L., (2020), Finite element model updating for structural applications, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο "Journal of Computational and Applied Mathematics"

- 23) Ribeiro D., Clacada R., Delgado R., Brehm M., Zabel V., 2012, Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο "Engineering Structures"
- 24) Luengo D., Martino L., Bugallo M., Elvira V., Sarkka S., (2020), A survey of Monte Carlo methods for parameter estimation, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο "Advances in Signal Processing"
- 25) Anguilar R., Torrealva D., Ramos L.F., Lourenco P.B., (2012), Operational Modal Analysis Tests on Peruvian Historical Buildings: The Case Study of the 19th Century Hotel Comercio, Δημοσιευμένο στο 15th Wrlld Conference on Earthquake Engineering 2012 in Lisboa
- 26) Farrar, C.R.; and Worden, K. (2007). An Introduction to Structural Health Monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society, 365: 303-315 pp
- 27) Rainieri C., Fabbrocino G., (2011), Operational modal analysis for the characterization of heritage structures, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο "Geofizika"
- 28) Baptista M.A., Mendes P., Afilhado A., Agostinho L., Lagomarsino A., and Victor L.M., (2004), Ambient Vibration Testing at N. Sra. do Carmo Church, Preliminary Results. Proc. of the 4th International Seminar on Structural analysis of Historical Constructions, Padova, Italy, 483-488 pp
- 29) Casarin F. and Modena C., (2007), Dynamic Identification of S. Maria Assunta Cathedral, Reggio Emilia, Italy. Proc. of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC, Copenhagen, Denmark, 637-644 pp.
- 30) Jaishi B., Ren W.X., Zong Z.H. and Maskey P.N., (2003), Dynamic and Seismic Performance of Old MultiTiered Temples in Nepal. Engineering Structures, 25: 1827-1839 pp

- 31) Ramos L.F., Alaboz M., Aguilar R. and Lourenço P.B. (2010b). Dynamic Identification and FE Updating of S. Torcato Church, Portugal. 28th International Modal Analysis Conference, IMAC. SEM, Jacksonville, Florida, USA

- 32) Gentile C. and Saisi A., (2004), Dynamic-based F.E. Model Updating to Evaluate Damage in Masonry Towers. Proc. of the 4th International Seminar on Structural analysis of Historical Constructions, Padova, Italy, 439-449 pp.

- 33) Ivorra S. and Pallarés F.J., (2007), A Masonry Bell-Tower Assessment by Modal Testing. Proc. of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC, Copenhagen, Denmark, 269-276 pp.

- 34) Rebelo, C.; Júlio, E.; and Costa, D. (2007). Modal Identification of the Coimbra University Tower. Proc. of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 177-184 pp.

- 35) Schmidt, T. (2007). Dynamic Behaviour of Twin Bell Towers. Proc. of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 261-268 pp.

- 36) Costa, C.; Arêde, A.; and Costa, A. (2004). Caracterização Dinâmica e Análise da Ponte da Lagocinha. Proc. Of the 6to Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, Guimarães, Portugal, 931-942 pp.

- 37) Ramos, L.F.; Casarin, F.; Algeri, C.; Lourenço, P.B.; and Modena, C. (2006). Investigations Techniques Carried out on the Qutub Minar, New Delhi, India. Proc. of the 5th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 633 -640 pp. Dicfeno, Mangelli, 2011

- 38) Diaferio M., Foti D., Mongelli M., Giannoccaro N. I., Andersen P., (2011), Operational Modal Analysis of a Historic Tower in Bari, Conference: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, "IMAC XXIX" Volume: 7

- 39)Grosel J., Sawicki W., Pakos W., (2014), Application of Classical and Operational Modal Analysis for Examination of Engineering Structures, XXIII R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (23RSP) (TFoCE 2014)
- 40)Betti, M., Facchini, L., and Biagini, P. (2015). Damage detection on a three-storey steel frame using artificial neural networks and genetic algorithms. *Meccanica* 50, 875–886. doi: 10.1007/s11012-014-00859
- 41)Clementi, F., Pierdicca, A., Formisano, A., Catinari, F., and Lenci, S. (2017). Numerical model upgrading of a historical masonry building damaged during the 2016 Italian earthquakes: the case study of the Podestà palace in Montelupone (Italy). *J. Civ. Struct. Health Monitor.* 7, 703–717. doi: 10.1007/ s13349-017-0253-4
- 42)Alkayem, N. F., Cao, M., Zhang, Y., Bayat, M., and Su, Z. (2018). Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey. *Neural Comput. Appl.* 30, 389–411. doi: 10.1007/s00521-017- 3284-1
- 43)Bartoli, G., Betti, M., and Borri, C. (2015). Numerical modelling of the structural behaviour of Brunelleschi’s dome of santa maria del fiore. *Intern. J. Architect. Herit.* 9, 408–429. doi:10.1080/15583058.2013.797038
- 44)Erdogan Y. S. (2017). Discrete and continuous finite element models and their calibration via vibration and material tests for the seismic assessment of masonry structures. *Intern. J. Architect. Herit.* 11, 1026–1045. doi: 10.1080/15583058.2017.1332255
- 45)Castellazzi, G., de Miranda, S., and Mazzotti, C. (2012). Finite element modeling tuned on experimental testing for the structural health assessment of an ancient masonry arch bridge. *Math. Probl. Eng.* 2012:495019. doi: 10.1155/2012/495019

- 46) Ramos, L. F., Aguilar, R., Lourenco, P. B., and Moreira, S. (2013). Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato church. *Mech. Syst. Signal Process.* 35, 1–15. doi: 10.1016/j.ymssp.2012.09.007
- 47) Pieraccini, M., Betti, M., Forcellini, D., Devis, D., Papi, F., Bartoli, G., et al. (2017). Radar detection of pedestrian-induced vibrations of Michelangelo's David. *PLoS One* 12:e0174480. doi: 10.1371/journal.pone.0174480
- 48) Bassoli, E., Vincenzi, L., D'Altri, A. M., de Miranda, S., Forghieri, M., and Castellazzi, G. (2018). Ambient vibration-based finite element model updating of an earthquake-damaged masonry tower. *Struct. Control Health Monitor.* 25:e2150. doi: 10.1002/stc.2150
- 49) Aoki, T., Sabia, D., and Rivella, D. (2008). Influence of experimental data and FE model on updating results of a brick chimney. *Adv. Eng. Softw.* 39, 327–335. doi: 10.1016/j.advengsoft.2007.01.005
- 50) Chiorino, M. A., Ceravolo, R., Spadafor, A., Zanotti Fragonara, L., and Abbiati, G. (2011). Dynamic characterization of complex masonry structures: the sanctuary of vicoforte. *Intern. J. Architect. Herit.* 5, 296–314. doi: 10.1080/15583050903582516
- 51) Torres, W., Almazan, J. L., Sandoval, C., and Boroschek, R. (2017). Operational modal analysis and FE model updating of the metropolitan cathedral of Santiago, Chile. *Eng. Struct.* 143, 169–188. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.04.008
- 52) Girardi, M., Padovani, C., Pellegrini, D., and Robol, L. (2019). A model updating procedure to enhance structural analysis in the FE code NIOS2-ITACA. *ASCE J. Perform. Construct. Facilit.* 33:e04019041. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001303

- 53) Pavlovic, M., Trevisani, S., and Cecchi, A. (2019). A procedure for the structural identification of masonry towers. *J. Nondestruct. Eval.* 38:38. doi: 10.1007/s10921-019-0575-8
- 54) Diaferio, M., Foti, D., Giannoccaro, N. I., and Ivorra, S. (2017). Model updating based on the dynamic identification of a baroque bell tower. *Intern. J. Saf. Sec. Eng.* 7, 519–531. doi: 10.2495/SAFE-V7-N4-519-531
- 55) Bru, D., Ivorra, S., Betti, M., Adam, J. M., and Bartoli, G. (2019). Parametric dynamic interaction assessment between bells and supporting slender masonry tower. *Mechan. Syst. Signal Process.* 129, 235–249. doi: 10.1016/j.ymssp.2019.04.038
- 56) Pierdicca, A., Clementi, F., Fortunati, A., and Lenci, S. (2019). Tracking modal parameters evolution of a school building during retrofitting works. *Bull. Earthq. Eng.* 17, 1029–1052. doi: 10.1007/s10518-018-0483-9
- 57) Cunha, A.; Caetano, E.; Magalhães, F.; and Moutinho, C. (2006). From Input-Output to Output-Only Modal Identification of Civil Engineering Structures, SAMCO.
- 58) Spoldi E., Ippolito I., Stella A., Russo S., (2021), Non-destructive techniques for structural characterization of cultural heritage: A pilot case study, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο "Structural Control and Health Monitoring"
- 59) Menendez B., (2016), Non-Destructive Techniques Applied to Monumental Stone Conservation, Chapter 8, pages 169-209
- 60) Μουστεράκη Μ., (2015), Ανίχνευση βλάβης σε έργα τέχνης με χρήση προηγμένης τεχνολογίας laser – Εφαρμογή σε νωπογραφίες, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Μεταπτυχιακού προγράμματος Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών

- 61) Προβιδάκης Κ.Π., Λιαράκος Ε.Β., (2015), . "Ανέπαφη και μη-καταστρεπτική εκτίμηση βλαβών σε ιστορικές κατασκευές με τη χρήση Σάρωσης Δονήσεων με Laser", Πρακτικά Επιστημονικού Συνεδρίου: Επιστημονική υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων για αειφόρα και συμβατά υλικά και επεμβάσεις συντήρησης και προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, Αθήνα, σ.273-282
- 62) Rothberg S.J., Allen M.S., Castellini P., Di Maio D., Dirckx J.J.J., Ewins D.J., Halkon B.J., Muyschondt P., Paone N., Ryan T., Steger H., Tomasini E.P., Vanlanduit S., Vignola J.F., (2017), An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement, Επιστημονικοί άρθρο δημοσιευμένο στο "Optics and Lasers in Engineering"
- 63) Liarakos EV, Providakis CP, (2020), Concrete damage mapping combining Laser Scanning Vibrometry, dynamic response modeling and ordinary Kriging regression, Επιστημονικό άρθρο δημοσιευμένο στο «Material Design & Processing Communications»
- 64) Martarelli M., Reve G.M., Santolini C., (1998), On the use of laser Doppler Vibrometer for modal analysis- Analysis of the certainty associated to scanning systems calibration, στο Conference: 1998 IMAC XVI- 16th 106 International Modal Analysis Conference, Santa Barbara, Καλιφόρνια, 1750-1757
- 65) Ανδρέου Α., (2018), Αποκατάσταση και μετατροπή της Πρώην Ιερατικής Σχολής της Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
- 66) <http://iscreta.gr/2015/09/ιερά-μονή-αγίας-τριάδας-τζαγκαρόλων-σ/>
- 67) Ανδριανάκης Μ., (1994), Ιερά Σταυροπηγιακή και Πατριαρχική Μονή της Αγίας Τριάδας των Τζαγκαρόλων., Χανιά 1994

- 68) Τωμαδάκης Ν. Β., (1932), "Η Ιερά Μονή Αγίας Τριάδος των Τζαγκαρόλων εν Ακρωτηρίω Μέλεχα Κρήτης"., Επιστημονική Επετηρίδα Βυζαντινών Σπουδών, τομ. Θ' 1932, 289-350
- 69) Κυριτσοπούλου Α., (2013), Δημιουργία Άτλαντα Πολιτισμού και Περιβάλλοντος για το Ακρωτήριο Χανίων, Χαρτογράφηση των Πολιτιστικών Χώρων με χρήση Γ.Σ.Π.-G.I.S, νομοθεσία Προστασίας τους και Προτάσεις Ανάδειξής τους, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
- 70) Παυλάκη Α., Λιόνης Μ., (2013), Προκαταρκτική μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας, Αναθεώρηση και επέκταση γενικού πολεοδομικού σχεδίου (Γ.Π.Σ.) Δήμου Χανίων και των περιαστικών Δήμων Ελ. Βενιζέλου, Θερίσου και Σούδας, Τεχνική Έκθεση
- 71) http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Crete&poli=Chania_Souda
- 72) Παπαιωάννου Χ., Ρουμελιώτη Ζ., Παπαζάχος Κ., Μουντράκης Δ., Κιλίας Α., Παυλάκη Α., Βαμβακάρης Δ., Μπενετάτος Χ., Θωμαΐδου Ε., Φασούλας Χ., (2008), Πιθανολογική και Αιτιοκρατική Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας στη Δ. Κρήτη με την Ολοκληρωμένη Χρήση Γεωλογικών, Σεισμολογικών και Σεισμοτεκτονικών Δεδομένων, Επιστημονικό άρθρο για το 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας
- 73) Ευρωκώδικας EN1991-1-1 «Δράσεις σε δομήματα – Μέρος 1-1 Γενικές δράσεις – Πυκνότητες, ίδια βάρη και επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια» και Εθνικό Προσάρτημα
- 74) Προβιδάκης Κ., (2021), Τεχνική Έκθεση μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών και δομικών στοιχείων της Ιερατικής Σχολής της Ιεράς μονής Αγίας Τριάδας Τζαγκαρόλων Έργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και

Αντοχής Υλικών, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείου Κρήτης

75) Ευρωκώδικας EN1991-1-3 «Δράσεις σε δομήματα – Μέρος 1-1 Μέρος 1-3: Γενικές δράσεις-Φορτία χιονιού»

76) Ευρωκώδικας 8 EN 1998-1:2004 «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών – Μέρος 1: Γενικοί Κανόνες, Σεισμικές Δράσεις, Κανόνες για Κτίρια”

77) Polytec GmbH, PSV Scanning Vibrometer Software

78) SYSCOM, αισθητήρες επιτάχυνσης ή επιταχυνσιόμετρα

79) <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/aco Ug study types.15.04.html>

80) James J. Allen, David R. Martinez, (1990), Parameter estimation of structural dynamic models using Eigenvalue and Eigenvector Information, Επιστημονικό άρθρο

81) Δημοσθένους Μ., (2009), Μέθοδοι και υλικά αποκατάστασης και ενίσχυσης διατηρητέων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, Τ.Ε.Ε./Τ.Κ.Μ., Έρευνα ΙΤΣΑΚ. Δρίτσος

82) www.icomos.org/en/about-icomos/mission-and-vision/history

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Νομοθετικό πλαίσιο ιστορικών κτιρίων

Τα κτίρια που έχουν χαρακτηριστεί ως «μνημεία» διέπουν τον δομημένο ιστορικό πλούτο και την χαρακτηριστική μνήμη της κάθε χώρας. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος της χώρας και αρκετές φορές ακόμα και την πλειονότητα των υφιστάμενων κτιρίων μιας περιοχής. Η διατήρηση και η προστασία τους είναι αντικείμενο διαμόρφωσης νομοθετικού πλαισίου που αναλύονται σε «*διεθνείς χάρτες, διακηρύξεις και κανονισμούς*». [81]

Κάνοντας μία ιστορική αναδρομή, μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα, η αρχιτεκτονική κληρονομιά αποτελούσε ζήτημα εθνικού ενδιαφέροντος και αποτέλεσμα της πολιτιστικής διεθνοποίησης η οποία χαρακτηρίζεται από τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο και την ίδρυση της Κοινωνίας των Εθνών. Μετέπειτα, πραγματοποιήθηκε η σύνταξη των χαρτών των αρχών προστασίας ώστε να διευρυνθεί η έννοια του «*αντικειμένου της προστασίας*» σε «*πολιτιστικά αγαθά και πολιτιστική κληρονομιά*» ενός μεγάλου «*φάσματος αξιών*». [20,82]

Σύμφωνα με τον Χάρτη των Αθηνών του 1931, τα μνημεία αποτελούν αντικείμενο προστασίας με «*ιστορικό, καλλιτεχνικό ή επιστημονικό ενδιαφέρον*». Το 1957 στο Παρίσι, ακολούθησε η σύσταση από το Κογκρέσο Αρχιτεκτόνων και Ειδικών σε Ιστορικά Κτίρια για τον σχεδιασμός μίας αρχής που θα ήταν ειδική για την «*προστασία των ιστορικών κτιρίων για τις χώρες που δεν διαθέτουν κεντρικό οργανισμό*». Επίσης, η σύσταση αυτή διατύπωνε «*όλα τα κράτη μέλη UNESCO να ενταχθούν στο Διεθνές Κέντρο για τη Μελέτη Διατήρησης και Αποκατάστασης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς (ICCROM) με έδρα τη Ρώμη*». [20,82]

Στις δύο καρποφόρες δεκαετίες μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο αφού αποκαταστάθηκαν τα καταστραμμένα από τον πόλεμο ιστορικές κατασκευές, τέθηκαν οι βάσεις για την σύνθεση της Χάρτας της Βενετίας το 1964. Σύμφωνα με την Χάρτα της Βενετίας, διευκρινίζεται το θεωρητικό

πλαίσιο του ιστορικού μνημείου, διευρύνοντας την έννοια του μνημείου και στα αστικά ή αγροτικά σύνολα με πολιτιστική ή ιστορική σημασία. Ακόμη, η Χάρτα αποτέλεσε το θεμέλιο για την ίδρυση του «Διεθνή Οργανισμού Μνημείων και Τόπων (*International Council on Monuments and Sites – ICOMOS*)». [20,82]

Με τις συστάσεις της UNESCO του 1968 εντάσσονται στην προστασία των μνημείων οι αρχαιολογικοί, ιστορικοί και επιστημονικοί χώροι, τα παραδοσιακά κτίρια, οι ιστορικές γειτονιές, τα «εθνολογικά κτίρια του παρελθόντος» και «ερείπια εμφανή ή αφανή με πολιτιστική σημασία». [20]

Το 1972 εντάσσεται στη «Σύμβαση για την Προστασία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής και Φυσικής Κληρονομιάς της UNESCO» και ο όρος «Πολιτιστική και Φυσική Κληρονομιά». [20]

Το 1975 με την διακήρυξη του Άμστερνταμ, στην διατήρηση της ευρωπαϊκής αρχιτεκτονικής κληρονομιάς, μαζί με τα κτίρια και το ευρύτερο περιβάλλον τους, εντάσσονται «πόλεις και χωριά ιστορικού και πολιτιστικού ενδιαφέροντος». [20]

Τέσσερα χρόνια μετά, εκδίδεται ο Χάρτης της Burra, μαζί με την αναθεώρησή του το 1981, το 1988 και το 1999. Σύμφωνα με τον Χάρτη, παρουσιάζεται ο όρος «τόποι με πολιτιστική κληρονομιά ο οποίος απαρτίζεται από ένα ευρύτατο φάσμα μνημείων με σημαντική πολιτιστική σημασία για το παρόν και το μέλλον». Τα μνημεία αυτά μπορούν να βρίσκονται σε οργανωμένο τόπο, ζώνη, τοπίο ή σύνολο κτιρίων. [20]

Με την Διεθνή Χάρτα του 1987 για «την Προστασία των Ιστορικών Πόλεων» του ICOMOS (Χάρτα της Ουάσινγκτον για τις Ιστορικές Πόλεις) όλες οι πόλεις αποτελούν ιστορικά τεκμήριο εφόσον σχηματίζονται για ιστορικούς λόγους εκφράζονται τις αξίες των «παραδοσιακών, αστικών πολιτισμών». Συνεπώς, πρέπει ο ιστορικός χαρακτήρας όλως των πόλεων να προστατεύεται. [20]

Οι βασικές αρχές της Μεθερμηνεύσης και Παρουσίασης εισάγονται στην Χάρτα του 2007 για τους Τόπους Πολιτιστικής Κληρονομιάς ως εργαλεία ανάδειξης, διατήρησης, αύξηση της δημόσιας εκτίμησης και κατανόησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. [20]

Έπειτα, στο υπόμνημα της Βιέννης 2005, αναφέρεται ότι οι ιστορικές πόλεις αποτελούν *«ένα ολοκληρωμένο σύστημα που χαρακτηρίζεται από ιστορικές, γεωμορφολογικές και κοινωνικές σχέσεις με το περιβάλλον του και από μια σύνθετη διαστρωμάτωση εννοιών και εκφράσεων»*. [20]

Οι προτάσεις και οι εφαρμόσιμες στρατηγικές για κάθε ιστορική πόλη και αστική περιοχή τέθηκαν από τις *«αρχές της Valletta για την Προστασία και τη Διαχείριση Ιστορικών Πόλεων και Αστικών περιοχών»* που ολοκληρώθηκαν το 2010 από την *«Διεθνή Επιτροπή για Ιστορικές Πόλεις και Χωριά (International Committee on Historic Towns and Villages – CIVVIH)»*. Με αυτές τις προτάσεις και στρατηγικές προστατεύονταν οι αξίες των ιστορικών πόλεων και εντάσσονταν στον κοινωνικό, πολιτιστικό και οικονομικό ιστό της εποχής. Σύμφωνα με αυτές, οι οποιαδήποτε παρέμβαση είναι απαραίτητο να ανταποκρίνεται στις αξίες της *«πολιτιστικής κληρονομιάς και στην ποιότητα ζωής των κατοίκων»*. [20]

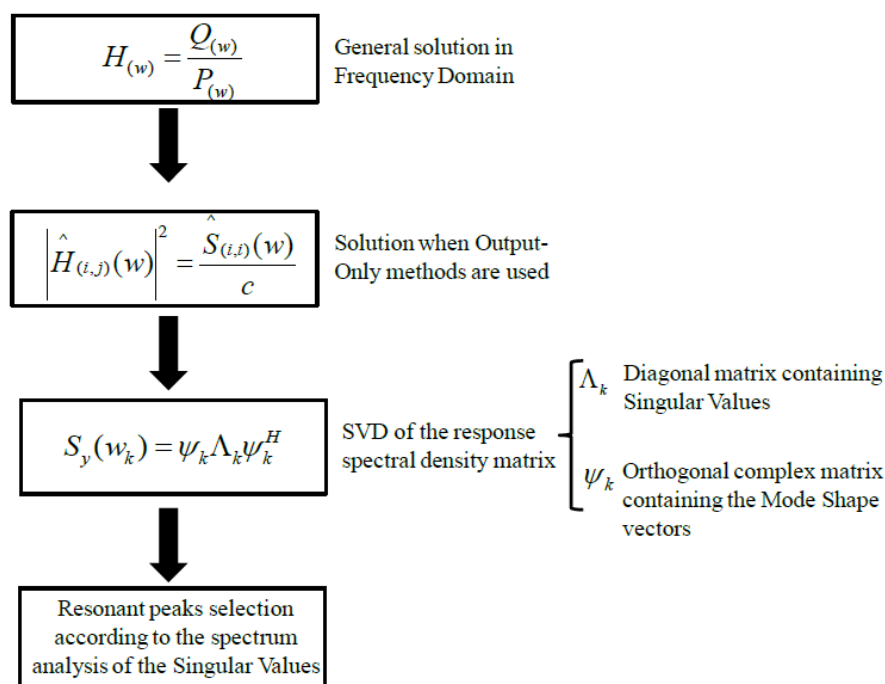
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'

Διαχωρισμός διαδικασιών Operational Modal Analysis (OMA)

Κατά τους Cunha et al [57] η OMA διαχωρίζεται σε δύο μεθόδους:[25]

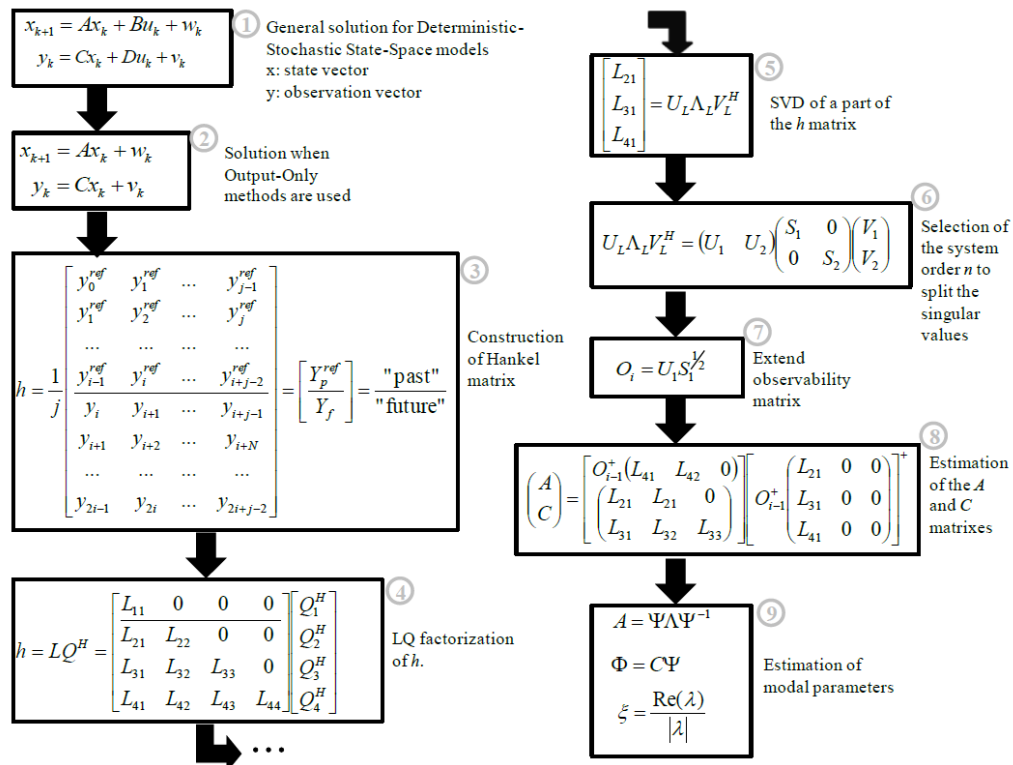
- Μη παραμετρικές για κάθε φάσμα συχνοτήτων («*Peak Picking, Frequency Domain Decomposition FDD, Enhanced Frequency Domain Decomposition EFDD, Kandom Decrement, PolyMol*»)
- Παραμετρικές για κάθε χρονοϊστορία («*Stochastic Subspace Identification SSI, Least Square Complex Experimental, Ibrahim Time Domain*»)

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι οι FDD, EFDD και SSI. Πιο συγκεκριμένα όμως, οι μη παραμετρικές διαδικασίες εξαρτώνται από την ποιότητα του περιβαλλοντικού θορύβου. Συνεπώς, οι παραμετρικές μέθοδοι οδηγούν σε καλύτερα, πιο ποιοτικά και αξιόπιστα αποτελέσματα χάρη των αλγορίθμων διεξαγωγής. [25]



Εικόνα 182: Διάγραμμα της FDD [25]

Σύμφωνα με τους Anguilar et al [21] και με την παραπάνω εικόνα (εικόνα 182), η FDD μέθοδος απαρτίζεται από το φάσμα (spectral density), το οποίο διαχωρίζεται σε μοναδικές τιμές και διανύσματα με την βοήθεια της διαδικασίας «Singular Value Decomposition SVD». Έπειτα το κάθε φάσμα (spectral density) αντιστοιχίζεται σε διαφορετικές ιδιομορφές έτσι ώστε καθένα να έχει το δικό του φάσμα. Η EFDD είναι η βελτιστοποιημένη διαδικασία της FDD για τον υπολογισμό της απόσβεσης και την βελτιστοποίηση των συχνοτήτων και ιδιομορφών. Η χρονοϊστορία δημιουργείται από τις αυτόματες λειτουργίες του φάσματος (SDOF auto spectral density functions) με χρήση της Inverse FFT και συσχετίζεται με κάθε ιδιομορφή. [25]



Εικόνα 183: Διάγραμμα της SSI Data [21]

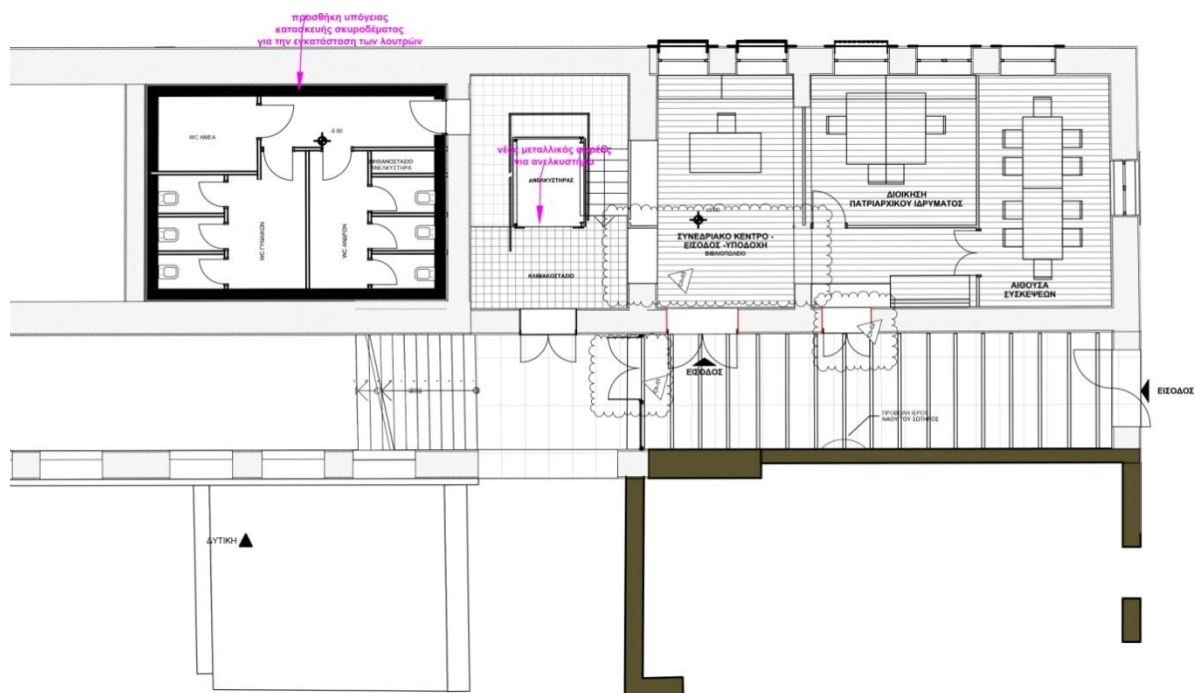
Η μέθοδος SSI (εικόνα 183) σχετίζεται με την στοχαστική θεωρία χωρικής προσομοίωσης από output-only μετρήσεις και βασίζεται στην «ταυτοποίηση του τμήματος A με το τμήμα C (state matrix A output matrix C) που περιέχει την πληροφορία του μελετούμενου συστήματος». Με την μέθοδο αυτή πραγματοποιείται σημαντική ελαχιστοποίηση των δεδομένων και χάρη στο SVD απομακρύνονται οι πηγές θορύβου. [25]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ'

Προτάσεις δομικών επεμβάσεων



Εικόνα 184: Κάτοψη ισογείου [5]



Εικόνα 186: Κάτοψη υπογείου [5]