Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

Αποκατάσταση Σεισμόπληκτου Κτιρίου από Φέρουσα Τοιχοποιία με Αξιοποίηση της Τεχνολογίας HBIM:

Η Περίπτωση του Ιερού Ναού Αγίου Γεωργίου Αγιών Παρασκιών

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αθανάσιος Χασιακός

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Αποκατάσταση Σεισμόπληκτου Κτιρίου από Φέρουσα Τοιχοποιία με Αξιοποίηση της Τεχνολογίας HBIM:

Η Περίπτωση του Ιερού Ναού Αγίου Γεωργίου Αγιών Παρασκιών

Μαρή Αθηνά

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής	Συν-Επιβλέπων Καθηγητή
Αθανάσιος Χασιακός	Ιωάννης Νικολάου

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον Προϊστάμενο του Τομέα Αποκατάστασης Επιπτώσεων Φυσικών Καταστροφών Π.Ε. Ηρακλείου, κ. Μιχάλη Γολοβάνη, για την πολύτιμη βοήθειά του και για την παροχή στοιχείων από τις μελέτες της υπηρεσίας. Ευχαριστώ επίσης την τεχνική εταιρεία ΕΝΙΚ, με έδρα το Ηράκλειο Κρήτης, και ιδιαίτερα τους κ. Νικόλαο Καμπιτάκη και κ. Κωνσταντίνο Φιλίππου, για την παραχώρηση του υλικού της μελέτης που αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και τον σύζυγό μου, Σταμάτη Τζουβελέκα, για τη συνδρομή του στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Περίληψη

Αντικείμενο και σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσει και εφαρμόζει μια ροή εργασίας HBIM για τη διαχείριση της αποκατάστασης σεισμόπληκτων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, με μελέτη περίπτωσης τον Ιερό Ναό Αγίου Γεωργίου Αγιών Παρασκιών Ηρακλείου, ο οποίος υπέστη βλάβες από τον σεισμό του Αρκαλοχωρίου (27 Σεπτεμβρίου 2021). Αφετηρία αποτελεί η διαπίστωση ότι η πληροφορία για την αποκατάσταση τέτοιων κτιρίων είναι συνήθως διάσπαρτη σε δισδιάστατα σχέδια και ανεξάρτητα τεύχη, ενώ τα διαθέσιμα εργαλεία για τη φέρουσα τοιχοποιία παραμένουν περιορισμένα σε σχέση με το οπλισμένο σκυρόδεμα. Σκοπός της εργασίας είναι η διαμόρφωση και εφαρμογή μιας συνεκτικής και ιχνηλάσιμης διαδικασίας HBIM, η οποία οργανώνει τα δεδομένα της ψηφιακής αποτύπωσης, της τεκμηρίωσης των βλαβών, των επεμβάσεων και της κοστολόγησης στο πλαίσιο της αποκατάστασης του εξεταζόμενου ναού, εντός του ελληνικού θεσμικού πλαισίου (ΚΑΔΕΤ, ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΔΑΕΦΚ).

Μεθοδολογία και ροή εργασίας

Η μέθοδος αρθρώνεται σε διαδοχικά στάδια: ψηφιακή αποτύπωση με τρισδιάστατη σάρωση (σαρωτής SLAM FJD Trion P1) και φωτογραμμετρία από drone, επεξεργασία του νέφους σημείων στο Autodesk ReCap και μοντελοποίηση HBIM στο Autodesk Revit, καταγραφή των βλαβών και εκτίμηση της απώλειας φέρουσας ικανότητας και τέλος, η εξαγωγή ποσοτήτων μέσω των schedules του Revit και σύνταξη του προϋπολογισμού κατά ΔΑΕΦΚ. Τα αποτελέσματα της δομικής αποτίμησης (υφιστάμενου και ενισχυμένου φορέα) προήλθαν από ανεξάρτητο προσομοίωμα του στατικού μελετητή στο 3Muri και αξιοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των επεμβάσεων. Η σύνδεση του μοντέλου με τη δομική ανάλυση, μέσω του προτύπου IFC, παρουσιάζεται ως προτεινόμενη δυνατότητα της μεθόδου. Το μοντέλο λειτουργεί ως ενιαία βάση δεδομένων, εξασφαλίζοντας τη συνέχεια και την ιχνηλασιμότητα της πληροφορίας.

Μελέτη περίπτωσης και δεδομένα

Ο ναός (σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο, ανέγερση 1903) κατατάσσεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ ($a = 0,24g$) και κατηγορία σπουδαιότητας Σ3/ΣΙΙΙ, με σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού $ag = 0,48g$ κατά ΔΑΕΦΚ ($\varepsilon = 0,12$). Οι εργαστηριακές δοκιμές έδωσαν τάση θραύσης λιθοσωμάτων *4,1–39,5 MPa* (μέση *16,03 MPa*), φαινόμενο βάρος ≈ *2.000 kg/m³* και θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας $f_{wc} \approx 1,95$ *MPa* έως *2,51 MPa* (EC-6). Η γεωτεχνική μελέτη έδωσε επιτρεπόμενη τάση εδάφους *150 kPa* και κατηγορία εδάφους C. Η καταγραφή των βλαβών οδήγησε σε απώλεια φέρουσας ικανότητας $\varphi_\chi = 0,33$ ($\alpha\chi = 0,67$) κατά Χ και $\varphi_y = 0,41$ ($\alpha y = 0,59$) κατά Υ, με χαρακτηρισμό «**γενικού**» χαρακτήρα.

Αποτίμηση και επεμβάσεις

Η δομική αποτίμηση, η οποία αντλήθηκε από τη μελέτη του στατικού μελετητή, στηρίχθηκε σε μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover), για δύο σενάρια φάσματος (Αντισεισμικός 1959 και Ευρωκώδικας 8) και στις δύο διευθύνσεις, με στόχο τη στάθμη επιτελεστικότητας **B1**. Ο υφιστάμενος φορέας δεν ικανοποιούσε τον στόχο, οδηγώντας στην απόφαση για ενίσχυση με βαθύ αρμολόγημα, ενέματα ομογενοποίησης, σύστημα ανόργανης μήτρας (Geosteel Grid 400 / Geocalce F Antisismico, Kerakoll), ελκυστήρες και ενίσχυση των θόλων. Οι επεμβάσεις αυξάνουν τεκμηριωμένα τη θλιπτική αντοχή σε $f_{wc,f} = 1,92$ *MPa* και $f_{wc,fII} = 2,88$ *MPa* ($E_{wc,fII} \approx 1,10$ *GPa*), ενώ ο ενισχυμένος φορέας ικανοποιεί την απαίτηση. Οι επιφάνειες των επεμβάσεων μεταφέρθηκαν, μέσω των Schedules, στον πρότυπο προϋπολογισμό του ΔΑΕΦΚ.

Αποτελέσματα, περιορισμοί και συμπεράσματα

Η εφαρμογή ανέδειξε ως βασικά πλεονεκτήματα του BIM την ενιαία τρισδιάστατη τεκμηρίωση, τη λεπτομερέστερη και χωρικά σαφέστερη τεκμηρίωση των βλαβών, καθώς και την άμεση, ιχνηλάσιμη σύνδεση του μοντέλου με τις ποσότητες και το κόστος. Καταγράφηκαν, ωστόσο, και σαφείς περιορισμοί: η φωτογραμμετρία αξιοποιήθηκε ως πλέγμα (.fbx) και όχι ως νέφος σημείων (point cloud) (λόγω μη διαθεσιμότητας της υπηρεσίας ReCap Photo για εκπαιδευτική χρήση), οι ρωγμές στις

θολωτές στέγες δεν αποτυπώθηκαν παραμετρικά στο Revit και οι βλάβες καταγράφηκαν σε δισδιάστατα σχέδια και η δομική αποτίμηση στηρίχθηκε σε ανεξάρτητο προσομοίωμα του μελετητή και οι μεταβάσεις δεδομένων απαίτησαν χειροκίνητες ενέργειες, χωρίς ποσοτική σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο.

Συμπεραίνεται ότι η ροή εργασίας είναι εφαρμόσιμη και ικανή να μεταφερθεί, με ωριμότερο και άμεσα αξιοποιήσιμο όφελος τη σύνδεση μοντέλου–ποσοτήτων–κόστους, ενώ η απευθείας μετάβαση «μοντέλο με βλάβες → δομική ανάλυση» τεκμηριώνεται ως δυναμική και προοπτική της μεθόδου. Ως κατευθύνσεις για μελλοντική εξέλιξη προτείνονται η αυτοματοποίηση των μεταβάσεων, η παραμετρική αποτύπωση των βλαβών σε καμπύλες επιφάνειες, η ποσοτική σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο και η ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποκατάστασης σεισμόπληκτων κτιρίων με αξιοποίηση της τεχνολογίας BIM.

Συνεισφορά της συγγραφέως

Στο πλαίσιο της εργασίας εκπονήθηκαν από τη φοιτήτρια-συγγραφέα η φωτογραμμετρική αποτύπωση των όψεων και της στέγης, η μοντελοποίηση HBIM στο Revit, η καταγραφή και κωδικοποίηση των βλαβών με εκτίμηση της απώλειας φέρουσας ικανότητας, καθώς και η εξαγωγή ποσοτήτων και του προϋπολογισμού κατά ΔΑΕΦΚ. Η τρισδιάστατη σάρωση εκτελέστηκε από την εταιρεία (ΕΝΙΚ), υπεύθυνοι της οποίας είναι οι Καμπιτάκης Νικόλαος, Φιλίππου Κώσταντίνος καθώς και η δομική αποτίμηση και η γεωτεχνική μελέτη που αξιοποιήθηκαν ενιαία στη ροή εργασίας.

Λέξεις-κλειδιά

BIM, HBIM, φέρουσα τοιχοποιία, σεισμόπληκτα κτίρια, αποκατάσταση, νέφος σημείων (point cloud), φωτογραμμετρία, IFC, 3Muri, μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover), ΚΑΔΕΤ, ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΔΑΕΦΚ, προϋπολογισμός.

Abstract

Aim and Objectives

This thesis develops and implements a **Historic Building Information Modelling (HBIM)** workflow for the management of post-earthquake rehabilitation projects involving unreinforced masonry heritage structures, using the **Church of Saint George in Agies Paraskies, Heraklion, Crete**, which sustained significant damage during the **2021 Arkalochori earthquake**, as a case study. The research is motivated by the observation that information generated during the assessment and rehabilitation of masonry buildings is typically dispersed among two-dimensional drawings, technical reports, and isolated datasets, resulting in limited interoperability and information traceability. Furthermore, BIM-based methodologies for historic masonry structures remain considerably less mature than those developed for reinforced concrete construction. The primary objective of this study is to establish and validate an integrated HBIM workflow capable of organizing, managing, and linking data derived from digital surveying, damage assessment, structural intervention planning, and cost estimation within a unified information environment, while complying with the applicable Greek regulatory framework (KADET, KANEPE, and DAEFK).

Methodology

The proposed workflow comprises a sequence of interconnected stages. Geometric data acquisition was carried out through three-dimensional laser scanning using an (FJD Trion P1 SLAM scanner) and drone-based photogrammetry. The acquired data were processed in Autodesk ReCap to generate the geometric reference model, which was subsequently used for HBIM development in Autodesk Revit. Structural damage was systematically documented and coded within the model, enabling the assessment of the corresponding loss of load-bearing capacity. Quantity take-offs were then extracted through Revit Schedules and incorporated into a rehabilitation cost estimate following DAEFK specifications.

The structural assessment of both the existing and strengthened conditions was performed independently by the structural engineer using the 3Muri software package. The resulting analytical data were subsequently integrated into the HBIM environment to support the modelling and evaluation of the proposed strengthening interventions. In addition, the study investigates the potential interoperability between the HBIM model

and structural analysis environments through the Industry Foundation Classes (IFC) standard. Within the proposed framework, the HBIM model functions as a centralized information repository, ensuring data consistency, traceability, and continuity throughout all stages of the rehabilitation process.

Case Study and Data

The investigated structure is a cross-in-square domed masonry church constructed in 1903. According to the Greek seismic hazard classification, the site is in Seismic Hazard Zone II ($a = 0.24g$) and belongs to Importance Class S3/III, leading to a design ground acceleration of $ag = 0.48g$ under DAEFK provisions ($\varepsilon = 0.12$). Laboratory testing of masonry constituents yielded stone compressive strengths ranging between *4.1* and *39.5 MPa*, with an average value of *16.03 MPa*, an apparent density of approximately *2,000 kg/m³*, and estimated masonry compressive strengths of $f_{wc} \approx 1.95$ *MPa* according to Spyrakos' methodology and $f_{wc} \approx 2.51$ MPa according to Eurocode 6 provisions. The geotechnical investigation determined an allowable bearing capacity of *150 kPa* and classified the subsoil as Ground Type C.

The damage survey revealed a reduction in load-bearing capacity of $\varphi x = 0.33$ ($\alpha x = 0.67$) in the X-direction and $\varphi y = 0.41$ ($\alpha y = 0.59$) in the Y-direction, leading to the characterization of the damage as being of a general structural nature.

Structural Assessment and Rehabilitation Measures

Structural assessment was performed through nonlinear static (pushover) analysis considering two seismic demand scenarios, namely the 1959 Greek Seismic Code and Eurocode 8, for both principal directions of structural response and targeting Performance Level **B1**. The existing structure was found incapable of satisfying the prescribed performance requirements, thereby necessitating structural strengthening.

The proposed rehabilitation strategy included deep repointing of masonry joints, grout injection techniques for masonry homogenization, application of an inorganic matrix composite reinforcement system (Geosteel Grid 400 and Geocalce F Antisismico, Kerakoll), installation of steel tie rods, and strengthening of the masonry vaults. The interventions resulted in a documented improvement of the mechanical properties of the masonry, achieving compressive strength values of $f_{wc,f} = 1.92$ *MPa* and $f_{wc,fII} = 2.88$ *MPa*, with a corresponding elastic modulus of $E_{wc,fII} \approx 1.10$ *GPa*. The strengthened structure successfully met the target performance criteria.

Quantities associated with the interventions were automatically extracted from the HBIM model and transferred to the standardized DAEFK cost estimation framework.

Results and Discussion

The implementation of the proposed methodology demonstrated the capacity of HBIM to provide a unified three-dimensional environment for documentation, analysis, and management of rehabilitation projects involving historic masonry structures. The principal benefits identified include enhanced spatial representation of damage, improved information traceability, and direct integration between geometric data, quantity take-offs, and cost estimation procedures.

However, several limitations were identified. Photogrammetric data were incorporated into the workflow as a three-dimensional mesh(.fbx) rather than as a point cloud due to the unavailability of Autodesk ReCap Photo services for educational users. Furthermore, cracks located on curved vault surfaces could not be represented parametrically within the Revit environment and therefore required documentation through conventional two-dimensional drawings. Structural assessment remained dependent on an external analytical model developed by the structural engineer, while multiple data-transfer operations required manual intervention. Additionally, no quantitative comparison with conventional restoration documentation and management practices was undertaken.

Conclusions

The findings demonstrate that the proposed HBIM workflow constitutes a feasible and transferable methodology for the rehabilitation management of earthquake-damaged masonry structures. The most mature and immediately applicable benefit of the approach lies in the integration of the digital model with quantity surveying and cost estimation processes. Moreover, the direct transition from a damage-informed HBIM model to structural analysis environments is identified as a promising direction for future development.

Further research should focus on the automation of data exchanges between software platforms, the parametric representation of damage on complex curved geometries, quantitative comparisons with conventional methodologies, and the development of comprehensive BIM-based platforms for the management of post-earthquake rehabilitation projects.

Author's Contribution

The author was responsible for the photogrammetric survey of the church façades and roof, the development of the HBIM model in Autodesk Revit, the documentation and classification of structural damage, the assessment of loss of load-bearing capacity, and the extraction of quantities and preparation of the DAEFK rehabilitation cost estimate. Three-dimensional laser scanning was carried out by ENIK, represented by Nikolaos Kampitakis and Konstantinos Filippou, while the structural assessment and geotechnical investigation were performed independently and subsequently integrated into the proposed HBIM workflow.

Keywords

HBIM; BIM; Historic Buildings; Masonry Structures; Earthquake-Damaged Buildings; Structural Rehabilitation; Point Cloud; Photogrammetry; IFC; 3Muri; Nonlinear Static Analysis; Pushover Analysis; KADET; KANEPE; DAEFK; Quantity Take-Off; Cost Estimation.

Περιεχόμενα

Περίληψη ..... - 4 -
Αντικείμενο και σκοπός ..... - 4 -
Μεθοδολογία και ροή εργασίας ..... - 4 -
Μελέτη περίπτωσης και δεδομένα ..... - 5 -
Αποτίμηση και επεμβάσεις ..... - 5 -
Αποτελέσματα, περιορισμοί και συμπεράσματα ..... - 5 -
Συνεισφορά της συγγραφέως ..... - 6 -
Λέξεις-κλειδιά ..... - 6 -
Abstract ..... - 7 -
Aim and Objectives ..... - 7 -
Methodology ..... - 7 -
Case Study and Data ..... - 8 -
Structural Assessment and Rehabilitation Measures ..... - 8 -
Results and Discussion ..... - 9 -
Conclusions ..... - 9 -
Author's Contribution ..... - 10 -
Keywords ..... - 10 -
1. Εισαγωγή 1
1.1 Πρόβλημα και ανάγκη 1
1.2 Σκοπός και στόχοι 1
1.3 Εύρος και περιορισμοί 3
1.4 Σύντομη περιγραφή της μεθόδου 3
1.5 Δομή της εργασίας 3
1.6 Αρχικό υλικό και συνεισφορά της συγγραφέως 3
2. Βιβλιογραφικό και θεσμικό υπόβαθρο 6
2.1 Θεματική βιβλιογραφική επισκόπηση 6
2.1.1 Ψηφιακή αποτύπωση και μετάβαση από το νέφος σημείων (point cloud) σε μοντέλο HBIM (Scan-to-HBIM) 6
2.1.2 Αναπαράσταση και τεκμηρίωση βλαβών 7
2.1.3 Σύνδεση του BIM με τη δομική αποτίμηση 8
2.1.4 Επεμβάσεις, κοστολόγηση και εξαγωγή ποσοτήτων 9
2.1.5 Διαλειτουργικότητα και διαχείριση της πληροφορίας 11
2.2 Συγκριτική θεώρηση των εργασιών 11
2.3 Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο 12

2.3.1 ΚΑΔΕΤ — Κανονισμός Αποτίμησης και Δομικών Επεμβάσεων Τοιχοποιίας.....12
2.3.2 ΚΑΝ.ΕΠΕ. και Ευρωκώδικας 8.....13
2.3.3 Αποφάσεις για σεισμόπληκτα κτίρια και ΔΑΕΦΚ.....13
2.4 Σύνθεση και ερευνητικό κενό..... 13
3. Προτεινόμενη διαδικασία HBIM για την τεκμηρίωση της αποκατάστασης.....15
3.1 Συνολική ροή εργασίας 15
3.2 Στάδιο 1 — Διερεύνηση και τεκμηρίωση 18
3.3 Στάδιο 2 — Ψηφιακή αποτύπωση..... 18
3.4 Στάδιο 3 — Μοντελοποίηση HBIM (Revit) 20
3.5 Στάδιο 4 — Καταγραφή και κωδικοποίηση βλαβών..... 21
3.6 Στάδιο 5 — Διερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές..... 22
3.7 Στάδιο 6 — Παραδοχές αποτίμησης 23
3.8 Στάδιο 7 — Ανάλυση και αποτίμηση..... 24
3.9 Στάδιο 8 — Σχεδιασμός επεμβάσεων..... 25
3.10 Στάδιο 9 — Εξαγωγή ποσοτήτων και κόστους 26
3.11 Δομή BIM: αντικείμενα, βλάβες, επεμβάσεις και ανταλλαγές αρχείων 27
4. Μελέτη περίπτωσης και δεδομένα.....30
4.1 Ταυτότητα του ναού 30
4.2 Σεισμικό συμβάν και σεισμικά χαρακτηριστικά 31
4.3 Γεωμετρία και υλικά..... 32
4.4 Προέλευση δεδομένων, παραδοθέντα αρχεία και διάκριση εργασιών..... 32
4.4.1 Ιχνηλασιμότητα και διαχείριση δεδομένων 33
4.5 Ψηφιακή αποτύπωση..... 37
4.6 Καταγραφή βλαβών και απώλεια φέρουσας ικανότητας 39
4.7 Διερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές..... 40
4.7.1 Τεκμηρίωση υλικών και τρόπου δομήσεως 40
4.7.2 Μέθοδος τεκμηρίωσης 40
4.7.2.1 Επιθεώρηση – οπτική διερεύνηση 40
4.7.2.2 Επιτόπου μετρήσεις με συνήθη μέσα 41
4.7.3 Επιτόπου διερευνητικές εργασίες.....41
4.7.3.1 Έδαφος θεμελίωσης – θέση του έργου / ανωδομή 42
4.7.3.2 Εργασίες υπαίθρου.....42
4.7.4 Εργαστηριακές δοκιμές 47
4.7.4.1 Μέτρηση μηχανικών χαρακτηριστικών λιθοσωμάτων.....47
4.8 Στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων και σπουδαιότητα κτιρίου 50

4.9 Στάθμη επιτελεστικότητας — παραδοχές 51
4.9.1 Συνοπτική διάκριση πηγών δεδομένων αποτίμησης 52
4.10 Μέθοδος ανάλυσης – προσομοίωσης – αποτίμηση 53
4.10.1 Αποτίμηση υφιστάμενου φορέα 56
4.10.2 Αποτίμηση ενισχυμένου φορέα 59
4.11 Έλεγχος τοπικών μηχανισμών (κινηματική ανάλυση) 63
4.12 Σχέδιο επεμβάσεων και προϋπολογισμός 69
5. Εφαρμογή της ροής εργασίας 71
5.1 Νέφος σημείων και μοντελοποίηση στο Revit 71
5.1.1 Σάρωση με τον 3D σαρωτή FJD Trion P1 71
5.1.2 Φωτογραμμετρική αποτύπωση με drone 73
5.1.3 Επεξεργασία νέφους και μοντελοποίηση στο Revit 76
5.2 Τεκμηρίωση Βλαβών 78
5.3 Μεταφορά στοιχείων για δομική ανάλυση 81
5.4 Δομική αποτίμηση και επεμβάσεις 83
5.5 Μοντελοποίηση των επεμβάσεων 84
5.6 Ποσότητες και προϋπολογισμός 86
6. Αποτελέσματα και αξιολόγηση 89
6.1 Ψηφιακά δεδομένα αποτύπωσης και μοντέλο HBIM 89
6.2 Δισδιάστατα σχέδια και τεκμηρίωση των βλαβών 89
6.3 Μοντελοποιημένες επεμβάσεις 90
6.4 Πίνακες ποσοτήτων (Schedules) από το Revit 90
6.5 Σύνδεση ποσοτήτων και προϋπολογισμού ΔΑΕΦΚ 91
6.6 Αξιολόγηση της ροής εργασίας 91
7. Συζήτηση 93
7.1 Τι προσφέρει στην πράξη η εφαρμογή 93
7.2 Χειροκίνητα βήματα και προβλήματα διαλειτουργικότητας 94
7.3 Σύγκριση με τη βιβλιογραφία 94
7.4 Δυνατότητα μεταφοράς της μεθόδου 95
7.5 Περιορισμοί 95
8. Συμπεράσματα και προτάσεις 97
8.1 Συμπεράσματα 97
8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 98
Βιβλιογραφία 100
Παράρτημα κεφαλαίου 4 - (4.10) Αποτελέσματα αποτίμησης (3Muri) 1

1. Εισαγωγή

1.1 Πρόβλημα και ανάγκη

Οι σεισμοί προκαλούν εκτεταμένες βλάβες σε κτίρια, με ιδιαίτερα σοβαρές συνέπειες στα λιθόκτιστα και ιστορικά κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία. Η αποκατάστασή τους προϋποθέτει αξιόπιστη και οργανωμένη πληροφορία, γεωμετρία, υλικά, βλάβες, επεμβάσεις και κόστος η οποία, στην καλύτερη περίπτωση, είναι διαθέσιμη σε διάσπαρτα δισδιάστατα σχέδια και ανεξάρτητα τεύχη. Η έλλειψη ενός ενιαίου ψηφιακού μοντέλου δυσχεραίνει την αποτίμηση, τον σχεδιασμό των επεμβάσεων και την κοστολόγηση, ενώ αυξάνει τον κίνδυνο σφαλμάτων και ασυνεπειών.

Στον ελληνικό χώρο, ο σεισμός του Αρκαλοχωρίου (27 Σεπτεμβρίου 2021) προκάλεσε σοβαρές βλάβες κυρίως σε λιθόκτιστες και παλαιές κατασκευές. Για την αποκατάσταση κτιρίων από τοιχοποιία, η βιβλιογραφία και τα διαθέσιμα εργαλεία παραμένουν περιορισμένα σε σχέση με τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αναδεικνύεται έτσι η ανάγκη μιας συνεκτικής, ψηφιακής και ιχνηλάσιμη ροής εργασίας που να ενσωματώνει όλα τα στάδια της αποκατάστασης από την αποτύπωση έως το κόστος εντός του ελληνικού θεσμικού πλαισίου (ΚΑΔΕΤ, ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΔΑΕΦΚ), αξιοποιώντας την τεχνολογία BIM/HBIM.

1.2 Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της συμβολής του HBIM στην οργάνωση και τεκμηρίωση της αποκατάστασης σεισμόπληκτου κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία, μέσω της ψηφιακής αποτύπωσης, της ανάπτυξης μοντέλου, της καταγραφής των βλαβών, της ενσωμάτωσης των προτεινόμενων επεμβάσεων και της εξαγωγής ποσοτήτων και κόστους. Για την διερεύνηση αυτή αντλήθηκε πραγματική μελέτη περίπτωσης, από τον Τομέα Αποκατάστασης Επιπτώσεων Φυσικών καταστροφών Π.Ε. Ηρακλείου Κρήτης, του Ιερού Ναού Αγίου Γεωργίου, Αγιών Παρασκιών Ηρακλείου. Ειδικότερα, η παρούσα εργασία επιδιώκει να διερευνήσει τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- Πώς μπορεί να αναπτυχθεί ένα αξιόπιστο και γεωμετρικά τεκμηριωμένο μοντέλο HBIM ενός σεισμόπληκτου ναού από φέρουσα τοιχοποιία μέσω συνδυαστικής αξιοποίησης τρισδιάστατης σάρωσης και φωτογραμμετρίας;
- Ποια γεωμετρικά, κατασκευαστικά, παθολογικά και διαχειριστικά δεδομένα είναι δυνατόν να οργανωθούν, να τεκμηριωθούν και να διαχειριστούν εντός ενός περιβάλλοντος HBIM για μνημεία φέρουσας τοιχοποιίας;
- Σε ποιον βαθμό το μοντέλο HBIM, σε συνδυασμό με το νέφος σημείων (point cloud), μπορεί να υποστηρίξει τη συστηματική καταγραφή και ποσοτικοποίηση των βλαβών του μνημείου;
- Ποιοι είναι οι περιορισμοί και οι προκλήσεις που εμφανίζονται κατά την ψηφιακή αναπαράσταση και παραμετρική μοντελοποίηση των βλαβών σε περιβάλλον HBIM;
- Πώς πραγματοποιείται η μεταφορά του μοντέλου HBIM σε λογισμικό δομικής ανάλυσης μέσω του προτύπου IFC και ποιος είναι ο βαθμός διαλειτουργικότητας που επιτυγχάνεται στην πράξη;
- Ποια στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας υποστηρίζονται από ολοκληρωμένες ψηφιακές ροές εργασίας και ποια απαιτούν χειροκίνητες διαδικασίες ή χρήση ανεξάρτητων λογισμικών;
- Πώς μπορούν να μοντελοποιηθούν οι επεμβάσεις αποκατάστασης και να εξαχθούν οι απαιτούμενες ποσότητες εργασιών και ο αντίστοιχος προϋπολογισμός σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ΔΑΕΦΚ;
- Ποιο είναι το πρακτικό όφελος της σύνδεσης του μοντέλου HBIM με την παραγωγή ποσοτήτων και την εκτίμηση του κόστους επεμβάσεων, ως προς την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της διαδικασίας μελέτης αποκατάστασης;
- Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και οι υφιστάμενοι περιορισμοί της τεχνολογίας BIM στην τεκμηρίωση, ανάλυση και διαχείριση σεισμόπληκτων μνημείων φέρουσας τοιχοποιίας;

1.3 Εύρος και περιορισμοί

Η εργασία εστιάζει στη ροή εργασίας και στη διαχείριση της πληροφορίας της αποκατάστασης, και όχι στην ανάπτυξη νέας δομικής θεωρίας. Το εύρος της οριοθετείται σε μία μελέτη περίπτωσης κτιρίου τοιχοποιίας, εντός του ελληνικού κανονιστικού πλαισίου. Οι βασικοί περιορισμοί που αναλύονται στο Κεφάλαιο 7 είναι η στήριξη σε μία μόνο μελέτη περίπτωσης, η εξάρτηση της δομικής αποτίμησης από προϋπάρχουσα στατική μελέτη, ο χειροκίνητος χαρακτήρας ορισμένων ανταλλαγών δεδομένων και η απουσία ποσοτικής σύγκρισης με τη συμβατική μέθοδο.

1.4 Σύντομη περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος αρθρώνεται σε διαδοχικά στάδια: ψηφιακή αποτύπωση με τρισδιάστατη σάρωση (FJD Trion P1) και φωτογραμμετρία από drone την επεξεργασία του νέφους σημείων στο Autodesk ReCap και μοντελοποίηση HBIM στο Autodesk Revit, την καταγραφή των βλαβών και εκτίμηση της απώλειας φέρουσας ικανότητας, τη διερεύνηση της δυνατότητας μεταφοράς του μοντέλου μέσω IFC σε λογισμικό δομικής ανάλυσης για την αποτίμηση του υφιστάμενου και του ενισχυμένου φορέα, την μοντελοποίηση των επεμβάσεων και τέλος, την εξαγωγή ποσοτήτων μέσω των schedules του Revit και σύνταξη του προϋπολογισμού κατά ΔΑΕΦΚ.

1.5 Δομή της εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής: το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει το βιβλιογραφικό και θεσμικό υπόβαθρο, το Κεφάλαιο 3, την προτεινόμενη διαδικασία HBIM για την τεκμηρίωση της αποκατάστασης, το Κεφάλαιο 4, τη μελέτη περίπτωσης και τα δεδομένα, το Κεφάλαιο 5, την Εφαρμογή της διαδικασίας και εξέλιξη, το Κεφάλαιο 6, τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση, το Κεφάλαιο 7, τη συζήτηση, και το Κεφάλαιο 8 τα συμπεράσματα και τις προτάσεις.

1.6 Αρχικό υλικό και συνεισφορά της συγγραφέως

Στην ενότητα αυτή αποσαφηνίζεται η προέλευση του υλικού που αξιοποιήθηκε στην εργασία και διακρίνεται ρητά η συνεισφορά της συγγραφέως από το υλικό που παραλήφθηκε έτοιμο από τους μελετητές και φορείς του έργου. Ο πίνακας που ακολουθεί

συνοψίζει, ανά στοιχείο, την πηγή και τον ιδιοκτήτη, την ενέργεια της φοιτήτριας και το παραγόμενο αποτέλεσμα.

Παραδοθέν υλικό	Πηγή & Υπεύθυνος Παραγωγής	Ενέργειες που πραγματοποίησε η φοιτήτρια	Παραγόμενο αποτέλεσμα της ΜΔΕ
Ψηφιακή αποτύπωση — 3D σάρωση (scanner FJD Trion P1)	ΕΝΙΚ — Καμπιτάκης & Φιλίππου, 2024	Παραλαβή και εισαγωγή στο ReCap Pro	Νέφος σημείων (point cloud) (.rcp)
Φωτογραμμετρία (λήψεις από drone)	Παρούσα εργασία — φοιτήτρια	Λήψεις με drone και επεξεργασία	Πλέγμα όψεων/στέγης (.fbx)
Μοντέλο HBIM (Autodesk Revit)	Παρούσα εργασία — φοιτήτρια	Μοντελοποίηση από το νέφος σημείων (point cloud)	Μοντέλο .rvt και 2D σχέδια
Καταγραφή/κωδικοποίηση βλαβών και απώλεια φέρουσας ικανότητας (αi)	Παρούσα εργασία — φοιτήτρια	Τομές, μέτρηση βαθμού βλάβης, εκτίμηση αi	Σχέδια βλαβών, πίνακες X/Y
Δομική αποτίμηση — 3Muri (pushover, τοπικοί μηχανισμοί)	ΕΝΙΚ — Καμπιτάκης & Φιλίππου, 2024	Ερμηνεία και ενιαία παρουσίαση	—
Επιλογή επεμβάσεων ενίσχυσης	ΕΝΙΚ — Καμπιτάκης & Φιλίππου, 2024	Μοντελοποίηση επεμβάσεων στο μοντέλο	Ενισχυμένο μοντέλο
Εξαγωγή ποσοτήτων και προϋπολογισμός ΔΑΕΦΚ	Παρούσα εργασία — φοιτήτρια	Schedules Revit → επιφάνειες → προϋπολογισμός	Πίνακας κόστους αποκατάστασης
Γεωτεχνική έρευνα και μελέτη	ΕΝΙΚ — Καμπιτάκης & Φιλίππου, 2024 (Γεωργίλας Αθ., 2024)	Αξιοποίηση παραμέτρων εδάφους	—
Εργαστηριακές δοκιμές υλικών	ΕΝΙΚ — Καμπιτάκης & Φιλίππου, 2024 Εργαστήριο	Αξιοποίηση αποτελεσμάτων	—

Πίνακας 1.1. Παραδοθέν υλικό, Πηγή & Υπεύθυνος Παραγωγής, Ενέργειες που πραγματοποίησε η φοιτήτρια και Παραγόμενο αποτέλεσμα της ΜΔΕ.

Συνοψίζοντας, η πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας εντοπίζεται κυρίως στο επίπεδο HBIM και ειδικότερα στη φωτογραμμετρική αποτύπωση των όψεων και της στέγης του ναού, στη δημιουργία του HBIM μοντέλου με βάση το νέφος σημείων (point cloud), στη δομημένη καταγραφή και κωδικοποίηση των βλαβών, καθώς και στη σύνδεση του μοντέλου με τις ποσότητες και το κόστος αποκατάστασης σύμφωνα με το πλαίσιο του ΔΑΕΦΚ. Όσον αφορά το στατικό αντικείμενο, το υπολογιστικό προσομοίωμα στο 3Muri,

οι μη-γραμμικές αναλύσεις και η βασική επιλογή των επεμβάσεων προέρχονται από την υφιστάμενη στατική μελέτη του έργου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα αποτελέσματα αυτά αξιοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση και τη μοντελοποίηση των επεμβάσεων στο περιβάλλον HBIM, καθώς και για τη σύνδεσή τους με τις διαδικασίες ποσοτικοποίησης και κοστολόγησης. Η τρισδιάστατη σάρωση, η δομική αποτίμηση, η γεωτεχνική μελέτη και οι εργαστηριακές δοκιμές εκπονήθηκαν από τους αντίστοιχους μελετητές και φορείς και ενσωματώθηκαν στη συνολική ροή εργασίας ως βασικά δεδομένα αναφοράς.

2. Βιβλιογραφικό και θεσμικό υπόβαθρο

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το βιβλιογραφικό και θεσμικό υπόβαθρο της εργασίας. Η σχετική βιβλιογραφία δεν αναπτύσσεται ως διαδοχική παρουσίαση μεμονωμένων δημοσιεύσεων, αλλά συντίθεται θεματικά, ώστε να αναδειχθούν οι κυρίαρχες ερευνητικές κατευθύνσεις, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των προσεγγίσεων και τα υφιστάμενα κενά γνώσης. Η επισκόπηση οργανώνεται σε πέντε θεματικούς άξονες: **(Α) ψηφιακή αποτύπωση και μετάβαση από το νέφος σημείων (point cloud) σε μοντέλο HBIM (Scan-to-HBIM), (Β) αναπαράσταση και τεκμηρίωση βλαβών, (Γ) σύνδεση του BIM με τη δομική αποτίμηση, (Δ) επεμβάσεις, κοστολόγηση και εξαγωγή ποσοτήτων και (Ε) διαλειτουργικότητα και διαχείριση της πληροφορίας**. Ακολουθεί συγκριτική θεώρηση των εργασιών της βιβλιογραφίας μέσω πίνακα σύνθεσης κοινών χαρακτηριστικών, σύντομη παρουσίαση του θεσμικού και κανονιστικού πλαισίου, περιορισμένη στα στοιχεία που απαιτούνται για την κατανόηση της εφαρμογής, και τέλος σύνθεση των ευρημάτων που οδηγεί στον προσδιορισμό του ερευνητικού κενού στο οποίο εντάσσεται η παρούσα εργασία.

2.1 Θεματική βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1.1 Ψηφιακή αποτύπωση και μετάβαση από το νέφος σημείων (point cloud) σε μοντέλο HBIM (Scan-to-HBIM)

Κοινή αφετηρία των ερευνών που ασχολούνται με υφιστάμενα και ιστορικά κτίρια είναι η διαπίστωση ότι η αξιόπιστη μοντελοποίηση προϋποθέτει την ακριβή γνώση της πραγματικής γεωμετρίας, η οποία σπανίως είναι διαθέσιμη σε ψηφιακή, τρισδιάστατη μορφή. Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική αποτύπωση με συμβατικά όργανα αποδίδει τη γεωμετρία με υψηλό κόστος χρόνου και εργασίας, αντ' αυτής, η βιβλιογραφία συγκλίνει στη χρήση του νέφους σημείων (point cloud), το οποίο μπορεί να αποκτηθεί μέσω τρισδιάστατης σάρωσης ή φωτογραμμετρίας και να εισαχθεί απευθείας ως υπόβαθρο στο περιβάλλον BIM.

Οι Álvarez-Romero et al. (2018) συγκρίνουν συστηματικά τρεις προσεγγίσεις **φωτογραμμετρία**, **τρισδιάστατη σάρωση με σαρωτή χαμηλού κόστους** και **συμβατική χειροκίνητη αποτύπωση** και αναδεικνύουν τους περιορισμούς καθεμιάς: η

φωτογραμμετρία απαιτεί πολλαπλές επικαλυπτόμενες λήψεις και, με συμβατικό εξοπλισμό, χειροκίνητη κλιμάκωση του νέφους, ενώ ο σαρωτής χαμηλού κόστους περιορίζεται σε εσωτερικούς χώρους καθώς, το ηλιακό φως υπερφορτώνει τους υπέρυθρους αισθητήρες. Κατά τους συγγραφείς, η χειροκίνητη μέθοδος έδωσε τη μεγαλύτερη ακρίβεια διαστάσεων, η φωτογραμμετρία με μηχανές DSLR υψηλότερη ακρίβεια αποτύπωσης και ο σαρωτής υπεροχή σε ανακλαστικές επιφάνειες. Το βασικό τους συμπέρασμα είναι ότι καμία μέθοδος δεν επαρκεί μόνη της και ότι ο συνδυασμός τεχνικών αποδίδει την πληρέστερη τεκμηρίωση.

Η ίδια λογική της πολυμεθοδικής αποτύπωσης εμφανίζεται και όπου το ζητούμενο δεν είναι μόνο η γεωμετρία αλλά και η κατάσταση του κτιρίου μετά από σεισμό. Οι Ma et al. (2015) αναφέρονται στη σάρωση με λέιζερ και τη φωτογραμμετρία προσόψεων ως μέσα αποτύπωσης της πλήρους κατάστασης κατεστραμμένων κατασκευών, ενώ οι Musella et al. (2020) αντλούν τη γεωμετρία του μοντέλου τους από ψηφιακή αποτύπωση (φωτογραμμετρία ή σάρωση) αντί για τις παραδοσιακές μεθόδους. Συνολικά, ο άξονας αυτός καταδεικνύει μια σαφή μετατόπιση: από τη μεμονωμένη μέτρηση προς τη δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού υποβάθρου (νέφος σημείων → HBIM), το οποίο αποτελεί τη βάση για όλες τις επόμενες εργασίες τεκμηρίωσης, ανάλυσης και κοστολόγησης. Για τα ιστορικά κτίρια, η προσέγγιση αυτή εξειδικεύεται στο Historic/Heritage BIM (HBIM), όπου η ακριβής απόδοση σύνθετης, μη τυποποιημένης γεωμετρίας (θόλοι, τρούλοι, καμπύλες επιφάνειες) αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση.

2.1.2 Αναπαράσταση και τεκμηρίωση βλαβών

Ο δεύτερος άξονας και ο πυκνότερος σε βιβλιογραφία αφορά, τον τρόπο με τον οποίο οι βλάβες αποτυπώνονται, κωδικοποιούνται και τεκμηριώνονται μέσα στο ψηφιακό μοντέλο. Το κεντρικό πρόβλημα που θέτουν οι σχετικές εργασίες είναι διπλό: αφενός, η υποκειμενικότητα και η βραδύτητα της συμβατικής οπτικής καταγραφής των βλαβών, αφετέρου, η αδυναμία των τυποποιημένων σχημάτων-δεδομένων να αναπαραστήσουν την ίδια τη βλάβη.

Οι Ma et al. (2015) εστιάζουν σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και τεκμηριώνουν τους τυπικούς τρόπους βλάβης (επιφανειακή ρηγμάτωση, αποφλοίωση, κάμψη/λυγισμός, διάτμηση/θραύση). Το βασικό τους εύρημα σε επίπεδο πληροφορικής της κατασκευής

είναι ότι το τυποποιημένο σχήμα IFC, αν και περιγράφει επαρκώς το κτίριο «όπως σχεδιάστηκε» και «όπως κατασκευάστηκε», στερείται των εννοιών για την αναπαράσταση της βλάβης με πρώτη τη ρωγμή. Προτείνουν επέκταση του IFC4 με νέες κλάσεις, ώστε το μοντέλο να αποδίδει όχι μόνο την τελική γεωμετρία αλλά και την ακολουθία εκδήλωσης των βλαβών, δηλαδή την υποτιθέμενη ακολουθία αστοχίας. Η εργασία περιορίζεται ρητά σε δομικά στοιχεία Ο/Σ.

Η επόμενη γενιά εργασιών αντιμετωπίζει την υποκειμενικότητα της καταγραφής με τεχνητή νοημοσύνη. Οι Oktavianus et al. (2024) προτείνουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ανάκτησης που συνδυάζει BIM και βαθιά μάθηση: συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα ταξινομούν τις βλάβες σε επίπεδο pixel και τις κατατάσσουν σε τέσσερις στάθμες (σοβαρή, μέτρια, ελαφριά, καμία), ενώ το σύστημα αρθρώνεται σε πέντε μέρη , από την επεξεργασία δεδομένων BIM έως τη δημιουργία σχεδίου αποκατάστασης και επικυρώνεται με συνεντεύξεις εμπειρογνωμόνων. Παρόμοια λογική, αλλά ειδικά για φέρουσα τοιχοποιία, ακολουθούν οι Musella et al. (2020): αναπτύσσουν ταξινομητές ρωγμών βασισμένους σε συνελικτικά δίκτυα και κρίσιμα που μοντελοποιούν τις ρωγμές στο BIM όχι μόνο γεωμετρικά αλλά και παραμετρικά, με τα χαρακτηριστικά που τις περιγράφουν, ώστε το μοντέλο να αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες του κτιρίου.

Συνθέτοντας τον άξονα, διακρίνεται μια εξελικτική πορεία: από τη σχηματική/χειροκίνητη αναπαράσταση της βλάβης και την επέκταση των προτύπων δεδομένων Ma et al. (2015), προς την αυτοματοποιημένη ανίχνευση με βαθιά μάθηση (Oktavianus, Musella et al.) και τελικά, προς την παραμετρική κωδικοποίηση της βλάβης πάνω στη γεωμετρία του μοντέλου. Δύο διαφοροποιήσεις αξίζει να σημειωθούν: το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας αφορά το οπλισμένο σκυρόδεμα (Ma, Oktavianus et al.), με τη φέρουσα τοιχοποιία να αντιμετωπίζεται λιγότερο Musella et al. (2020), και η κοινή επιδίωξη όλων είναι η μείωση της υποκειμενικότητας και η μετατροπή της καταγραφής σε δομημένη, επαναχρησιμοποιήσιμη πληροφορία.

2.1.3 Σύνδεση του BIM με τη δομική αποτίμηση

Ο τρίτος άξονας συνδέει το ψηφιακό μοντέλο με τη δομική ανάλυση και αφορά κυρίως το πώς η πληροφορία της γεωμετρίας και των υλικών τροφοδοτεί την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς. Στις κατασκευές από τοιχοποιία, η αποτίμηση περιπλέκεται από

τη μεγάλη διασπορά των μηχανικών ιδιοτήτων, το ιστορικό φόρτισης και τις μεταγενέστερες τροποποιήσεις του φορέα.

Χαρακτηριστική είναι η εργασία των Özdemir et al. (2025), οι οποίοι προτείνουν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για ιστορικό κτίριο από τοιχοποιία, συνδυάζοντας πειραματικό χαρακτηρισμό των υλικών (πέτρα, τούβλο, κονίαμα, ξύλο) με αριθμητική αποτίμηση. Υιοθετούν προσέγγιση μακρο-μοντελοποίησης, όπου, τα επιμέρους υλικά αντιμετωπίζονται ως ομοιογενές ισοδύναμο υλικό και αξιολογούν τη σεισμική συμπεριφορά μέσω δυναμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης στις δύο κύριες διευθύνσεις. Η αλληλουχία «χαρακτηρισμός υλικών → ισοδύναμο προσομοίωμα → σεισμική αποτίμηση» είναι κοινή σε πολλές μελέτες τοιχοποιίας και αποτελεί τη μεθοδολογική βάση για εργαλεία όπως το ισοδύναμο πλαίσιο και τα μακροστοιχεία.

Η δομική αποτίμηση δεν αποτελεί αυτοσκοπό στη βιβλιογραφία, αλλά αφετηρία για τις επόμενες αποφάσεις. Οι Georgiou & Christodoulou (2014) στηρίζουν την εκτίμηση των βλαβών σε καμπύλες ευθραυστότητας και σε πλήθος μη-γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, υπολογίζοντας μέτρο βλάβης ανά στοιχείο, η αποτίμηση αυτή τροφοδοτεί κατευθείαν την κοστολόγηση (Άξονας Δ). Συνολικά, ο άξονας καταδεικνύει ότι η προστιθέμενη αξία του BIM στη δομική αποτίμηση έγκειται λιγότερο στην ίδια την ανάλυση που εκτελούνται από εξειδικευμένα λογισμικά και περισσότερο στη συνεπή τροφοδότησή της με γεωμετρία και ιδιότητες υλικών και στην αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες εφαρμογές της βιβλιογραφίας η δομική ανάλυση εκτελείται σε εξειδικευμένα λογισμικά αποτίμησης ή πεπερασμένων στοιχείων και όχι εντός του ίδιου του περιβάλλοντος BIM. Ως εκ τούτου, ο ρόλος του BIM εντοπίζεται πρωτίστως στην οργάνωση και διαχείριση των δεδομένων που απαιτούνται για την ανάλυση και στη συστηματική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της, και όχι στην ίδια την υπολογιστική διαδικασία.

2.1.4 Επεμβάσεις, κοστολόγηση και εξαγωγή ποσοτήτων

Ο τέταρτος άξονας, ο οποίος είναι και ο πλησιέστερος προς το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αφορά τη σύνδεση της δομικής αποτίμησης με τον σχεδιασμό επεμβάσεων, την

εξαγωγή ποσοτήτων και την κοστολόγηση. Η σχετική βιβλιογραφία αναδεικνύει το BIM ως περιβάλλον που διευκολύνει την τεκμηριωμένη και ιχνηλάσιμη σύνδεση μεταξύ βλαβών, επεμβάσεων, ποσοτήτων και κόστους, μέσω διαφορετικών βαθμών αυτοματοποίησης ανάλογα με τη μεθοδολογία και τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται.

Οι Georgiou & Christodoulou (2014) αναπτύσσουν μια πρακτική, υπολογιστική προσέγγιση για την εκτίμηση βλαβών, κόστους και προγραμματισμού επισκευών μετά τον σεισμό: το μέτρο βλάβης ανά στοιχείο οπτικοποιείται στο τρισδιάστατο μοντέλο με χρωματική κλίμακα (πράσινο, κίτρινο, κόκκινο, μαύρο), ενώ το κόστος αποκατάστασης εκτιμάται με προσομοίωση Monte Carlo για πλήθος σεναρίων ζημιάς. Η προσέγγιση ενοποιεί δομική, κοστολογική και προγραμματιστική ανάλυση σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον, επιτρέποντας σε μηχανικούς και ιδιοκτήτες να κατανοήσουν τη μετασεισμική κατάσταση του κτιρίου.

Συμπληρωματική οπτική δίνουν οι Vitiello et al. (2019), οι οποίοι μετατοπίζουν την εστίαση από την εκ των υστέρων επισκευή στην εκ των προτέρων βελτιστοποίηση της σεισμικής αναβάθμισης. Αξιοποιώντας την πιθανοτική μεθοδολογία PBEE/PEER, εντάσσουν σε περιβάλλον BIM ένα πλαίσιο επτά βημάτων ξεκινώντας από εναλλακτικές στρατηγικές επέμβασης και επίπεδα ασφαλείας και καταλήγει στην πιο οικονομικά αποδοτική λύση, με βάση την ανάλυση κόστους κύκλου ζωής και τις αναμενόμενες οικονομικές απώλειες. Το ολοκληρωμένο μοντέλο λειτουργεί ως διαρκής ενημερωνόμενη, «**προσπελάσιμη μέσω ερωτημάτων**» βάση δεδομένων γεωμετρίας, υλικών και κόστους.

Η σύνθεση των δύο εργασιών αναδεικνύει μια κοινή αρχή με δύο εφαρμογές: το BIM ως ενοποιητική πλατφόρμα ποσοτήτων και κόστους, είτε για την αποτίμηση του κόστους αποκατάστασης μετά από βλάβη Georgiou & Christodoulou (2014) είτε για την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής ενίσχυσης Vitiello et al. (2019). Και στις δύο περιπτώσεις, η εξαγωγή ποσοτήτων από το ψηφιακό μοντέλο αποτελεί τον βασικό μηχανισμό που επιτρέπει τη συστηματική δυνατότητα επανάληψης και ιχνηλάσιμη σύνδεση των τεχνικών δεδομένων με τις διαδικασίες κοστολόγησης που αξιοποιείται στην παρούσα εργασία μέσω της σύνδεσης των schedules, του , με τον πρότυπο προϋπολογισμό του ΔΑΕΦΚ.

2.1.5 Διαλειτουργικότητα και διαχείριση της πληροφορίας

Ο πέμπτος άξονας διατρέχει τους προηγούμενους και αφορά τον ρόλο του μοντέλου ως κεντρικού, ενιαίου αποθετηρίου της πληροφορίας του έργου, καθώς και τα ζητήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ των εργαλείων. Πολλές εργασίες τονίζουν ότι το BIM δεν είναι απλώς γεωμετρικό εργαλείο, αλλά η βάση γύρω από την οποία οργανώνονται η καταγραφή, η ανάλυση και ο σχεδιασμός της αποκατάστασης.

Οι Oktavianus et al. (2024) και Musella et al. (2020) περιγράφουν ρητά το μοντέλο ως κεντρική βάση δεδομένων: από αυτήν εξάγονται αυτόματα τα σχέδια, σε αυτήν ενημερώνονται οι βλάβες και οι επεμβάσεις, και μέσω αυτής (π.χ. με το API του Revit) συνδέονται τα δεδομένα σε όλη τη διαδικασία ανάκτησης του κτιρίου. Ταυτόχρονα, οι Ma et al. (2015) αναδεικνύουν το κρίσιμο ζήτημα της διαλειτουργικότητας: η ανταλλαγή μοντέλων μεταξύ εργαλείων στηρίζεται στο ανοικτό πρότυπο IFC (Industry Foundation Class, building SMART), το οποίο όμως παρουσιάζει κενά όταν πρέπει να μεταφέρει πληροφορία που δεν προβλέπεται στο σχήμα του όπως η βλάβη. Το ζήτημα αυτό είναι άμεσα σχετικό με την παρούσα εργασία, όπου η σύνδεση Revit → IFC → Λογισμικό δομικής ανάλυσης (3Muri) αποδεικνύεται εφικτή αλλά με χειροκίνητα ενδιάμεσα βήματα και απώλειες πληροφορίας στις μεταβάσεις.

2.2 Συγκριτική θεώρηση των εργασιών

Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει συγκριτικά τις εργασίες που εξετάστηκαν, ως προς τον θεματικό τους άξονα, το αντικείμενο και τη συνεισφορά τους, τα μέσα που χρησιμοποιούν και τη σχέση τους με την παρούσα εργασία.

Εργασία (έτος)	Άξονας	Αντικείμενο / συνεισφορά	Μέθοδοι – εργαλεία	Σχέση με την εργασία
Álvarez-Romero et al. (2018)	A	Σύγκριση μεθόδων συλλογής γεωμετρικής πληροφορίας για HBIM	Φωτογραμμετρία, σαρωτής 3D, χειροκίνητη αποτύπωση	Τεκμηριώνει τον συνδυασμό σάρωσης + φωτογραμμετρίας που εφαρμόστηκε
Ma et al. (2015)	B / E	Μοντελοποίηση βλαβών Ο/Σ· επέκταση IFC για ρωγμές/ακολουθία αστοχίας	Τυπολογία βλαβών, επέκταση IFC4	Θεμελιώνει την ανάγκη δομημένης καταγραφής βλαβών και τα όρια του IFC

Εργασία (έτος)	Άξονας	Αντικείμενο / συνεισφορά	Μέθοδοι – εργαλεία	Σχέση με την εργασία
Oktavianus et al. (2024)	Β / Ε	Πλαίσιο ανάκτησης με BIM και βαθιά μάθηση· ταξινόμηση βλαβών	CNN σε επίπεδο pixel, κεντρικό αποθετήριο, Revit API	Υπόδειγμα «μοντέλο ως ενιαίο αποθετήριο» της διαδικασίας
Musella et al. (2020)	Β / Ε	Ψηφιοποίηση σεισμικών ρωγμών σε τοιχοποιία με AI· παραμετρική μοντελοποίηση	Ταξινομητές ρωγμών (Convnet), κεντρική βάση	Πλησιέστερο στο υλικό (τοιχοποιία)· υπόδειγμα κωδικοποίησης βλαβών
Özdemir et al. (2025)	Γ	Πειραματικός χαρακτηρισμός υλικών & σεισμική αποτίμηση ιστορικής τοιχοποιίας	Εργαστηριακές δοκιμές, μακρο-μοντελοποίηση, φασματική ανάλυση	Στηρίζει την προσέγγιση υλικών + μακροστοιχείων της αποτίμησης
Georgiou & Christodoulou (2014)	Δ	Εκτίμηση βλαβών, κόστους και προγραμματισμού επισκευών με 3D οπτικοποίηση	Καμπύλες ευθραυστότητας, Monte Carlo, χρωματική κωδικοποίηση	Άμεσα συναφές: βλάβη → ποσότητες → κόστος (schedules → ΔΑΕΦΚ)
Vitiello et al. (2019)	Δ	Βελτιστοποίηση κόστους κύκλου ζωής στρατηγικών σεισμικής αναβάθμισης	PBEE/PEER, ανάλυση κόστους κύκλου ζωής, 7-βηματικό πλαίσιο	Πλαισιώνει την κοστολόγηση ως κριτήριο επιλογής επέμβασης

Πίνακας 2.1. Συγκριτική θεώρηση των εργασιών της βιβλιογραφικής επισκόπησης.

2.3 Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο

Το θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο παρουσιάζεται εδώ συνοπτικά και περιορίζεται σε όσα απαιτούνται για την κατανόηση των επιλογών της εφαρμογής (Κεφ. 3 και 4). Η αποκατάσταση σεισμόπληκτου κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία διέπεται από ένα σύνολο κανονισμών και αποφάσεων που καθορίζουν τη διερεύνηση, την αποτίμηση, τις επεμβάσεις και την κοστολόγηση.

2.3.1 ΚΑΔΕΤ — Κανονισμός Αποτίμησης και Δομικών Επεμβάσεων Τοιχοποιίας

Ο ΚΑΔΕΤ (ΦΕΚ 2493/Β/2023) αποτελεί το βασικό πλαίσιο για τις κατασκευές από τοιχοποιία. Ορίζει ότι πριν από κάθε μελέτη ή επέμβαση απαιτείται διερεύνηση και τεκμηρίωση του υφιστάμενου δομήματος σε επαρκή έκταση και βάθος (αποτύπωση, ιστορικό, καταγραφή βλαβών, διερευνητικές και εργαστηριακές εργασίες). Καθορίζει τη στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (ΣΑΔ), τις σχέσεις υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας (θλιπτική, διατμητική, εφελκυστική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας) και

τους ελάχιστους στόχους αποτίμησης ανά κατηγορία σπουδαιότητας. Οι διατάξεις αυτές διαμορφώνουν άμεσα τα στάδια διερεύνησης και αποτίμησης της εφαρμογής.

2.3.2 ΚΑΝ.ΕΠΕ. και Ευρωκώδικας 8

Ο Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) ορίζει τις στάθμες επιτελεστικότητας (περιορισμένες βλάβες, σημαντικές βλάβες, οιονεί κατάρρευση) συναρτήσει του βαθμού βλάβης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως στόχοι της αποτίμησης. Ο Ευρωκώδικας 8 (EN 1998) παρέχει το πλαίσιο του αντισεισμικού σχεδιασμού και, ειδικότερα, τη μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover) που εφαρμόζεται στην αποτίμηση του φορέα, καθώς και τους ελέγχους σε όρους μετακινήσεων.

2.3.3 Αποφάσεις για σεισμόπληκτα κτίρια και ΔΑΕΦΚ

Η ταξινόμηση των βλαβών και η εκτίμηση της απώλειας φέρουσας ικανότητας στηρίζονται στη σχετική νομοθεσία (ΦΕΚ 2661/Β/2013), η οποία διακρίνει τις βλάβες σε περιορισμένης σπουδαιότητας και σε βλάβες που επηρεάζουν τη γενική ευστάθεια. Το φάσμα σχεδιασμού για σεισμόπληκτα κτίρια καθορίζεται από τον ΦΕΚ 455/Β/2014, ο οποίος κατατάσσει το εξεταζόμενο κτίριο στην κατηγορία ΚΙ και ορίζει την τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης σχεδιασμού. Τέλος, η Διεύθυνση Αποκατάστασης Επιπτώσεων Φυσικών Καταστροφών (ΔΑΕΦΚ) παρέχει τον πρότυπο προϋπολογισμό εργασιών επισκευής και τον συντελεστή σεισμικής επιβάρυνσης **ε**, στα οποία στηρίζεται η κοστολόγηση των επεμβάσεων. Το πλαίσιο αυτό είναι που επιτρέπει τη σύνδεση των ποσοτήτων του μοντέλου με το κόστος αποκατάστασης.

2.4 Σύνθεση και ερευνητικό κενό

Από τη συγκριτική θεώρηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η έρευνα έχει παρουσιάσει σημαντική πρόοδο σε επιμέρους πεδία της διαχείρισης υφιστάμενων και σεισμόπληκτων κατασκευών. Ειδικότερα, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες για την ψηφιακή αποτύπωση και τη μετάβαση από το νέφος σημείων (point cloud) σε περιβάλλον HBIM, τεχνικές για την τεκμηρίωση και παραμετρική αναπαράσταση βλαβών, διαδικασίες σύνδεσης με εργαλεία δομικής ανάλυσης, καθώς και εφαρμογές που αξιοποιούν το BIM για την εξαγωγή ποσοτήτων και την εκτίμηση κόστους.

Παρά τη σημαντική αυτή πρόοδο, οι περισσότερες δημοσιευμένες εφαρμογές επικεντρώνονται σε επιμέρους στάδια της διαδικασίας ή εξετάζουν συγκεκριμένες τεχνολογικές πτυχές ανεξάρτητα από το σύνολο της ροής εργασίας. Επιπλέον, μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας αφορά κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ οι εφαρμογές σε ιστορικά και μνημειακά κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία παραμένουν συγκριτικά περιορισμένες.

Ιδιαίτερα περιορισμένη εμφανίζεται η τεκμηρίωση ολοκληρωμένων εφαρμογών HBIM οι οποίες να συνδέουν σε ένα ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον την ψηφιακή αποτύπωση, τη μοντελοποίηση Scan-to-HBIM, την τεκμηρίωση των βλαβών, τη δομική αποτίμηση, τον σχεδιασμό των επεμβάσεων, την εξαγωγή ποσοτήτων και την κοστολόγηση σε πραγματικά σεισμόπληκτα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία και ειδικότερα στο πλαίσιο του ελληνικού συστήματος αποκατάστασης (ΚΑΔΕΤ, ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ΔΑΕΦΚ).

Στο πλαίσιο αυτό, η συνεισφορά της παρούσας εργασίας δεν έγκειται στη χρήση της τεχνολογίας BIM ή HBIM καθαυτής, η οποία έχει ήδη εφαρμοστεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά στην εφαρμογή και αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης ροής εργασίας HBIM σε πραγματική περίπτωση σεισμόπληκτου ναού από φέρουσα λιθοδομή. Η εργασία εστιάζει στην οργάνωση και διασύνδεση των δεδομένων της ψηφιακής αποτύπωσης, της τεκμηρίωσης των βλαβών, της μοντελοποίησης των επεμβάσεων και της εξαγωγής ποσοτήτων και κόστους αποκατάστασης κατά ΔΑΕΦΚ, αξιοποιώντας ενιαία τα αποτελέσματα της δομικής αποτίμησης που προέρχονται από τη στατική μελέτη του έργου.

3. Προτεινόμενη διαδικασία HBIM για την τεκμηρίωση της αποκατάστασης.

3.1 Συνολική ροή εργασίας

Με βάση τη θεματική επισκόπηση του προηγούμενου κεφαλαίου, προτείνεται μια ολοκληρωμένη διαδικασία Heritage Building Information Modelling (HBIM) για την υποστήριξη της τεκμηρίωσης, αποτίμησης και αποκατάστασης σεισμόπληκτων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία. Η διαδικασία στοχεύει στη σύνδεση της ψηφιακής αποτύπωσης, της τεκμηρίωσης βλαβών, της δομικής αξιολόγησης και της εξαγωγής ποσοτήτων και κόστους μέσα σε ένα ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον.

Η διαδικασία που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί γενική μεθοδολογική πρόταση και δεν ταυτίζεται πλήρως με τα στάδια που εφαρμόστηκαν στη μελέτη περίπτωσης. Ορισμένες συνδέσεις μεταξύ λογισμικών, και ειδικότερα η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ περιβάλλοντος HBIM και λογισμικού δομικής ανάλυσης μέσω προτύπου IFC, παρουσιάζονται ως προτεινόμενα βήματα της διαδικασίας και όχι ως πλήρως επαληθευμένες εφαρμογές στο εξεταζόμενο έργο.

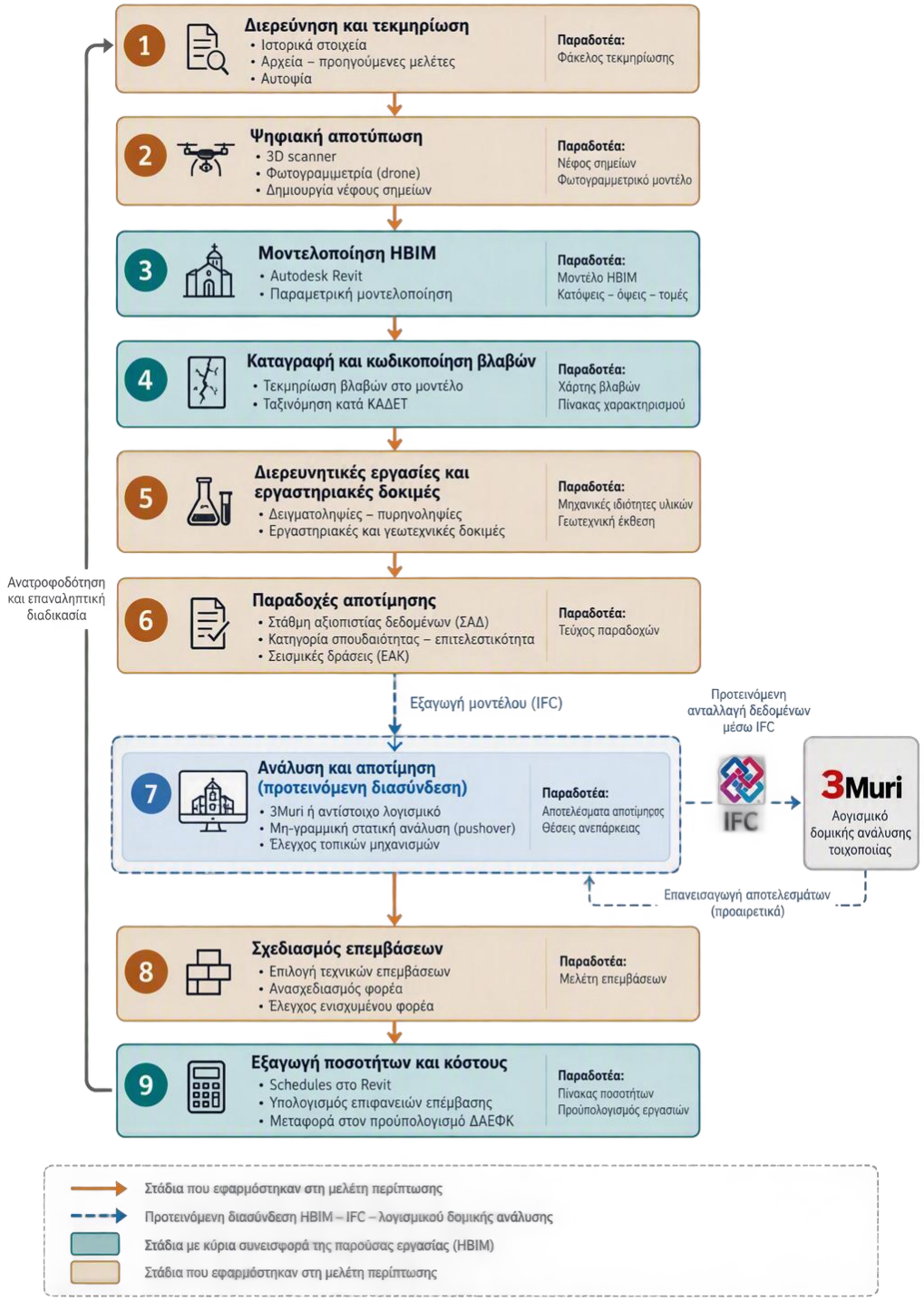
Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στον επιλεγμένο ναό παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, όπου αναλύονται τα πραγματικά δεδομένα αποτύπωσης, οι καταγεγραμμένες βλάβες και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διαθέσιμες μελέτες αποκατάστασης.

Η επιλογή του κτιρίου εφαρμογής έγινε με κριτήριο τον όγκο και την ποιότητα της διαθέσιμης πληροφορίας. Επελέγη ναός από φέρουσα λιθοδομή που υπέστη σοβαρές βλάβες από τον σεισμό του Αρκαλοχωρίου (2021), με αναλυτικό ιστορικό και εκτεταμένες, επιστημονικά ενδιαφέρουσες βλάβες.

Η επιλογή ενός μνημείου από φέρουσα τοιχοποιία, αντί ενός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, δεν ήταν τυχαία. Στην ευρύτερη περιοχή όπου εκδηλώθηκε ο σεισμός, το μεγαλύτερο μέρος του κτιριακού αποθέματος είναι κατασκευασμένο από φέρουσα λιθοδομή, για την αποκατάσταση της οποίας η διαθέσιμη βιβλιογραφία παραμένει περιορισμένη σε σύγκριση με τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Επιπλέον, ο συγκεκριμένος ναός αποτυπώνει έναν χαρακτηριστικό τρόπο δόμησης της πέτρας από επαγγελματίες κρητικούς τεχνίτες. Αντίθετα, πολλές κατοικίες της ίδιας περιόδου ανεγείρονταν από τους ίδιους τους ιδιοκτήτες, χωρίς εξειδικευμένη τεχνική γνώση, με υλικά τοπικής προέλευσης και συχνά με ανεπαρκές συνδετικό κονίαμα μεταξύ των λίθων, χαρακτηριστικά που καθιστούν τη σεισμική συμπεριφορά τους ιδιαίτερα κρίσιμη. Τέλος, ως ιστορικό κτίριο προϋφιστάμενο του 1955, ο ναός εντάσσεται στο πεδίο του Heritage Building Information Modelling (HBIM), συνδυάζοντας την τεχνολογία BIM με τις ιδιαιτερότητες της τεκμηρίωσης μνημείων.

Η προτεινόμενη διαδικασία αποτελείται από εννέα διαδοχικά στάδια, τα οποία συνδέονται μέσω ανταλλαγής γεωμετρικών, τεχνικών και διαχειριστικών δεδομένων. Η διαδικασία είναι επαναληπτική, καθώς τα αποτελέσματα της αποτίμησης ανατροφοδοτούν τον σχεδιασμό των επεμβάσεων και την εξαγωγή ποσοτήτων.



Σχήμα 3.1. Συνολική προτεινόμενη διαδικασία HBIM για την τεκμηρίωση της αποκατάστασης.

Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στα στάδια που εφαρμόστηκαν στην μελέτη περίπτωσης, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αποτυπώνουν την προτεινόμενη διαλειτουργικότητα μεταξύ του μοντέλου HBIM και λογισμικού δομικής ανάλυσης μέσω του προτύπου IFC.

3.2 Στάδιο 1 — Διερεύνηση και τεκμηρίωση

Συγκεντρώνονται το ιστορικό της κατασκευής (χρόνος και φάσεις κατασκευής, μεταγενέστερες προσθήκες, προηγούμενες επεμβάσεις, έκτακτες δράσεις) και η τρέχουσα κατάστασή της. Το στάδιο θέτει τη βάση για τη στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων και τη μετέπειτα αποτίμηση.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Ιστορικά στοιχεία
- Αρχειακό υλικό
- Προηγούμενες μελέτες και επεμβάσεις

Ενέργειες

- Συλλογή τεκμηρίων
- Επιτόπια αυτοψία
- Καταγραφή υφιστάμενης κατάστασης

Εργαλεία

- Αρχεία υπηρεσιών
- Φωτογραφική τεκμηρίωση
- Φύλλα αυτοψίας

Παραδοτέα

- Φάκελος τεκμηρίωσης
- Τεχνική περιγραφή υφιστάμενης κατάστασης

Υπεύθυνος

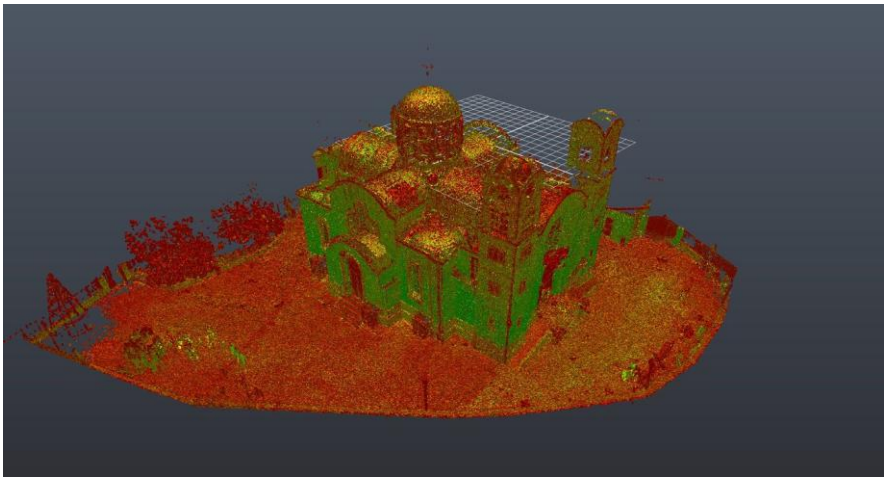
- Μηχανικός αποτύπωσης / μελετητής αποκατάστασης

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Χειροκίνητη διαδικασία

3.3 Στάδιο 2 — Ψηφιακή αποτύπωση

Η αποτύπωση συνδυάζει τρισδιάστατη σάρωση και φωτογραμμετρία. Η σάρωση με 3D scanner καλύπτει κυρίως τους εσωτερικούς χώρους, ενώ η φωτογραμμετρία με drone αποτυπώνει τις όψεις και τη στέγη. Το νέφος σημείων αποτελεί συλλογή σημείων με συντεταγμένες X, Y και Z που αναπαριστούν την επιφάνεια του κτιρίου.



Εικόνα 3.1. Έγχρωμο νέφος σημείων (point cloud) του ναού.

Εικόνα 3.2. Νέφος σημείων (point cloud) του ναού σε απόδοση έντασης (intensity).

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Κτίριο προς αποτύπωση
- Τοπογραφικές αναφορές

Ενέργειες

- Τρισδιάστατη σάρωση
- Φωτογραμμετρικές λήψεις
- Δημιουργία point cloud

Εργαλεία

- 3D Scanner
- Drone
- Λογισμικό επεξεργασίας νέφους σημείων

Παραδοτέα

- Point cloud
- Φωτογραμμετρικό μοντέλο

Υπεύθυνος

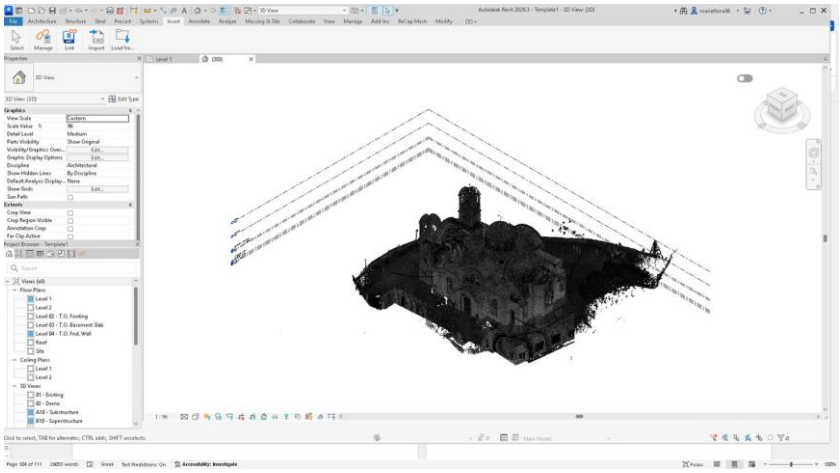
- Τοπογράφος ή μηχανικός γεωπληροφορικής

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία

3.4 Στάδιο 3 — Μοντελοποίηση HBIM (Revit)

Το νέφος σημείων (point cloud) εισάγεται στο Autodesk Revit και το κτίριο μοντελοποιείται σε τρισδιάστατη μορφή. Από το μοντέλο εξάγονται κατόψεις, όψεις και τομές που απαιτούνται για την τεκμηρίωση του κτιρίου.



Εικόνα 3.3. Εισαγωγή του νέφους σημείων στο Autodesk Revit 2026 για τη μοντελοποίηση.

Ιδιαίτερη πρόκληση αποτελούν τα καμπύλα γεωμετρικά στοιχεία, όπως οι θόλοι, ο τρούλος και η στέγη, τα οποία συχνά απαιτούν συνδυασμό φωτογραμμετρικών δεδομένων και επιτόπιων μετρήσεων.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Point cloud
- Φωτογραμμετρικό μοντέλο

Ενέργειες

- Δημιουργία HBIM μοντέλου

- Παραμετροποίηση στοιχείων

Εργαλεία

- Autodesk Revit

Παραδοτέα

- Μοντέλο HBIM
- Κατόψεις, όψεις και τομές

Υπεύθυνος

- Μοντελοποιητής HBIM

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία

3.5 Στάδιο 4 — Καταγραφή και κωδικοποίηση βλαβών

Οι βλάβες καταγράφονται και συσχετίζονται με τα φέροντα στοιχεία του μοντέλου. Η ταξινόμησή τους ακολουθεί την ισχύουσα νομοθεσία και τα κριτήρια του ΚΑΔΕΤ.

Εικόνα 3.4. Διαμήκης τομή του μοντέλου HBIM του ναού.

Εικόνα 3.5. Η ίδια τομή με επαλληλία του νέφους σημείων, για τον έλεγχο της αντιστοίχισης μοντέλου–point cloud.

Η τρισδιάστατη τεκμηρίωση διευκολύνει την οπτικοποίηση και την παρακολούθηση των βλαβών, ενώ παρέχει ενιαία βάση δεδομένων για μελλοντική χρήση.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Μοντέλο HBIM
- Αποτύπωση βλαβών

Ενέργειες

- Κωδικοποίηση βλαβών
- Χωρική συσχέτιση με δομικά στοιχεία

Εργαλεία

- Revit
- CAD λογισμικό

Παραδοτέα

- Χάρτης βλαβών
- Πίνακας χαρακτηρισμού βλαβών

Υπεύθυνος

- Πολιτικός μηχανικός

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Κυρίως χειροκίνητη διαδικασία

3.6 Στάδιο 5 — Διερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές

Οι διερευνητικές εργασίες συλλέγουν στοιχεία για τα υλικά, τον τρόπο δόμησης και τις συνθήκες θεμελίωσης.

Περιλαμβάνουν δειγματοληψίες, δοκιμαστικές τομές, εργαστηριακές δοκιμές και γεωτεχνική διερεύνηση.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Αποτελέσματα τεκμηρίωσης
- Διερευνητικές ανάγκες

Ενέργειες

- Δειγματοληψίες

- Εργαστηριακές δοκιμές
- Γεωτεχνικές έρευνες

Εργαλεία

- Εργαστηριακός εξοπλισμός
- Γεωτεχνικός εξοπλισμός

Παραδοτέα

- Μηχανικές ιδιότητες υλικών
- Γεωτεχνική έκθεση

Υπεύθυνος

- Εργαστήριο δομικών υλικών
- Γεωτεχνικός μηχανικός

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Χειροκίνητη διαδικασία

3.7 Στάδιο 6 — Παραδοχές αποτίμησης

Καθορίζονται η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων, η κατηγορία σπουδαιότητας του κτιρίου, η στάθμη επιτελεστικότητας και οι σεισμικές δράσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Στοιχεία τεκμηρίωσης
- Εργαστηριακά αποτελέσματα

Ενέργειες

- Επιλογή παραδοχών
- Καθορισμός κανονιστικών παραμέτρων

Εργαλεία

- ΚΑΔΕΤ
- Ελληνικοί κανονισμοί

Παραδοτέα

- Τεύχος παραδοχών

Υπεύθυνος

- Στατικός μηχανικός

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Χειροκίνητη διαδικασία

3.8 Στάδιο 7 — Ανάλυση και αποτίμηση

Στο πλαίσιο της προτεινόμενης διαδικασίας, το μοντέλο HBIM δύναται να εξαχθεί από το Autodesk Revit σε μορφή IFC και να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάπτυξη προσομοιώματος δομικής ανάλυσης σε εξειδικευμένο λογισμικό αποτίμησης τοιχοποιίας, όπως το 3Muri. Η διαλειτουργικότητα αυτή επιδιώκει τη μείωση των επαναλαμβανόμενων εισαγωγών δεδομένων και τη διατήρηση κοινής γεωμετρικής αναφοράς μεταξύ των σταδίων τεκμηρίωσης και ανάλυσης.

Η σύνδεση του μοντέλου HBIM με το λογισμικό δομικής ανάλυσης μέσω IFC αποτελεί προτεινόμενο στάδιο της μεθοδολογικής διαδικασίας. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης η δομική αποτίμηση βασίστηκε σε ανεξάρτητο προσομοίωμα του στατικού μελετητή και δεν προέκυψε από απευθείας εισαγωγή του μοντέλου HBIM. Ως εκ τούτου, η προτεινόμενη ανταλλαγή δεδομένων μέσω IFC δεν αξιολογήθηκε πειραματικά στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και περιγράφεται ως δυνητική δυνατότητα διαλειτουργικότητας.

Στο στάδιο αυτό μπορούν να εφαρμοστούν μη-γραμμικές αναλύσεις, όπως, καθώς και έλεγχοι τοπικών μηχανισμών εκτός επιπέδου. Οι αναλυτικές μέθοδοι προσομοίωσης δεν αναπτύσσονται περαιτέρω στην παρούσα εργασία.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Γεωμετρία φορέα
- Ιδιότητες υλικών
- Παραδοχές αποτίμησης

Ενέργειες

- Δημιουργία προσομοιώματος
- Στατικές και σεισμικές αναλύσεις

Εργαλεία

- 3Muri ή αντίστοιχο λογισμικό

Παραδοτέα

- Αποτελέσματα αποτίμησης
- Θέσεις ανεπάρκειας

Υπεύθυνος

- Στατικός μηχανικός

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία

3.9 Στάδιο 8 — Σχεδιασμός επεμβάσεων

Οι επεμβάσεις καθορίζονται βάσει των αποτελεσμάτων της αποτίμησης και περιλαμβάνουν τεχνικές όπως βαθύ αρμολόγημα, ενέματα ομογενοποίησης, συστήματα ανόργανης μήτρας, ελκυστήρες και ενίσχυση θόλων.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Αποτελέσματα αποτίμησης

Ενέργειες

- Επιλογή επεμβάσεων
- Ανασχεδιασμός φορέα

Εργαλεία

- Λογισμικό στατικής ανάλυσης
- Κανονισμοί επεμβάσεων

Παραδοτέα

- Μελέτη επεμβάσεων

Υπεύθυνος

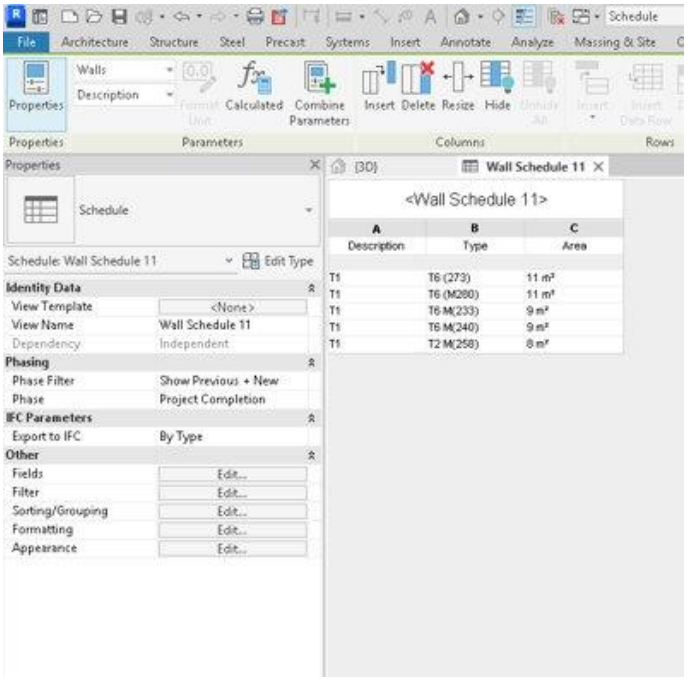
- Στατικός μηχανικός

Βαθμός αυτοματοποίησης

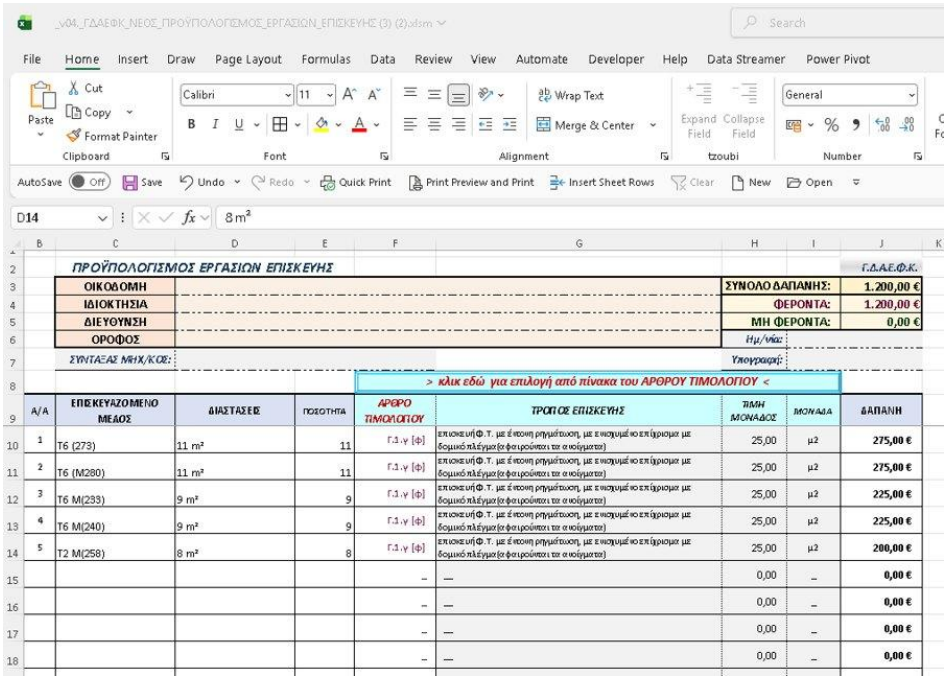
- Χειροκίνητη διαδικασία

3.10 Στάδιο 9 — Εξαγωγή ποσοτήτων και κόστους

Οι επιφάνειες επέμβασης μπορούν να υπολογιστούν μέσω της λειτουργίας Schedules του Revit και τα αποτελέσματα να μεταφερθούν στον προϋπολογισμό εργασιών.



Εικόνα 3.6. Πίνακας ποσοτήτων (Wall Schedules) στο Revit με τις επιφάνειες των τοίχων επέμβασης.



Εικόνα 3.7. Μεταφορά των επιφανειών στον πρότυπο προϋπολογισμό εργασιών επισκευής του ΔΑΕΦΚ.

Η χρήση ενός ενιαίου πληροφοριακού μοντέλου αναμένεται να περιορίσει ασυνέπειες στην ονοματοδοσία και στην ταυτοποίηση των δομικών στοιχείων μεταξύ διαφορετικών μελετητικών σταδίων. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί βασικό πλεονέκτημα των προσεγγίσεων HBIM και μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ακρίβειας των ποσοτήτων και της διαχείρισης των επεμβάσεων. Ωστόσο, η πλήρης λειτουργία αμφίδρομης ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ λογισμικών ανάλυσης και HBIM δεν αξιολογήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης.

Στοιχεία διαδικασίας

Είσοδοι

- Μοντέλο HBIM
- Στοιχεία επεμβάσεων

Ενέργειες

- Δημιουργία schedules
- Υπολογισμός ποσοτήτων
- Μεταφορά σε προϋπολογισμό

Εργαλεία

- Autodesk Revit
- Πρότυπος προϋπολογισμός ΔΑΕΦΚ

Παραδοτέα

- Πίνακας ποσοτήτων
- Προϋπολογισμός εργασιών

Υπεύθυνος

- Μελετητής αποκατάστασης

Βαθμός αυτοματοποίησης

- Αυτόματη εξαγωγή ποσοτήτων από το Revit
- Χειροκίνητος έλεγχος και συμπλήρωση προϋπολογισμού

3.11 Δομή BIM: αντικείμενα, βλάβες, επεμβάσεις και ανταλλαγές αρχείων

Το μοντέλο οργανώνεται σε τρία επίπεδα πληροφορίας:

- Αντικείμενα (δομικά στοιχεία).

- Βλάβες.
- Επεμβάσεις

Τα αντικείμενα διακρίνονται σε φέροντα και μη φέροντα στοιχεία, ενώ οι βλάβες συνδέονται παραμετρικά με τα αντίστοιχα δομικά στοιχεία. Οι επεμβάσεις αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες επιφάνειες και στοιχεία του μοντέλου ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή ποσοτήτων.

Ανταλλαγές αρχείων

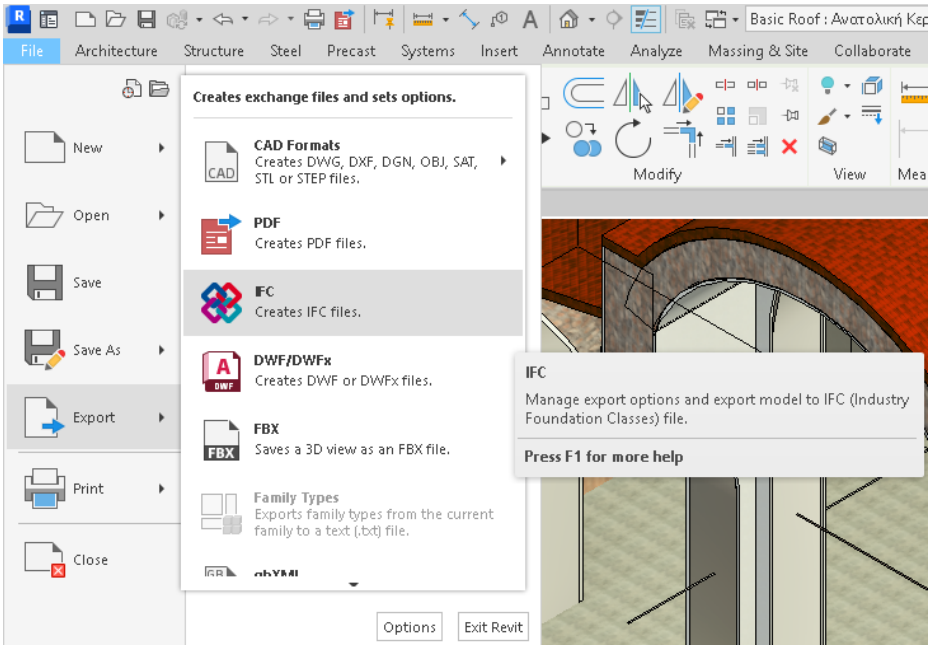
Οι ανταλλαγές δεδομένων που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα εκφράζουν τη στοχευμένη ροή πληροφορίας της προτεινόμενης διαδικασίας.

Οι μεταφορές δεδομένων διακρίνονται σε:

- Αυτόματες εξαγωγές και εισαγωγές μέσω ανοικτών προτύπων διαλειτουργικότητας (IFC).
- Ημι-αυτοματοποιημένες μεταφορές αρχείων μεταξύ λογισμικών.
- Χειροκίνητες εισαγωγές ή επαν-εισαγωγές δεδομένων που απαιτούν έλεγχο από μελέτη .

Η ταξινόμηση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση του βαθμού ψηφιοποίησης κάθε σταδίου και τον εντοπισμό σημείων στα οποία απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη εργαλείων διαλειτουργικότητας

Το IFC (Industry Foundation Classes) αποτελεί το βασικό πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων στο περιβάλλον Open BIM και υποστηρίζει τη μεταφορά γεωμετρικής και περιγραφικής πληροφορίας μεταξύ διαφορετικών λογισμικών. Στην παρούσα εργασία η χρήση του παρουσιάζεται ως τμήμα της προτεινόμενης διαδικασίας και όχι ως πλήρως επαληθευμένη ροή εργασίας. Οι περιορισμοί στη μεταφορά εξειδικευμένων παραμέτρων και η πιθανή ανάγκη διορθώσεων μετά την εισαγωγή αποτελούν ζητήματα που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής αξιολόγησης.



Εικόνα 3.8. Δυνατότητα εξαγωγής του μοντέλου HBIM σε μορφή IFC για διαλειτουργικότητα με λογισμικά δομικής ανάλυσης.

Αρχείο	Από → Προς	Σκοπός
.laz	3D scanner → ReCap Pro	Ακατέργαστο νέφος σημείων (point cloud)
.rcp	ReCap Pro → Revit	Καθαρισμένο νέφος ως υπόβαθρο μοντελοποίησης
.fbx	Φωτογραμμετρία (drone) → ReCap/Revit	Εξωτερικό πλέγμα όψεων και στέγης
.rvt	Revit (εσωτερικό)	Μοντέλο HBIM αντικειμένων/βλαβών/επεμβάσεων
.dwg	Revit → CAD	Τομές, σχέδια βλαβών, 2D παραδοτέα
.ifc	Revit → λογισμικό δομικής ανάλυσης (3Muri)	Αυτόματη δημιουργία φορέα για την αποτίμηση
schedules	Revit → προϋπολογισμός ΔΑΕΦΚ	Επιφάνειες/ποσότητες επεμβάσεων → κόστος

Πίνακας 3.1. Ανταλλαγές αρχείων μεταξύ των εργαλείων της ροής εργασίας.

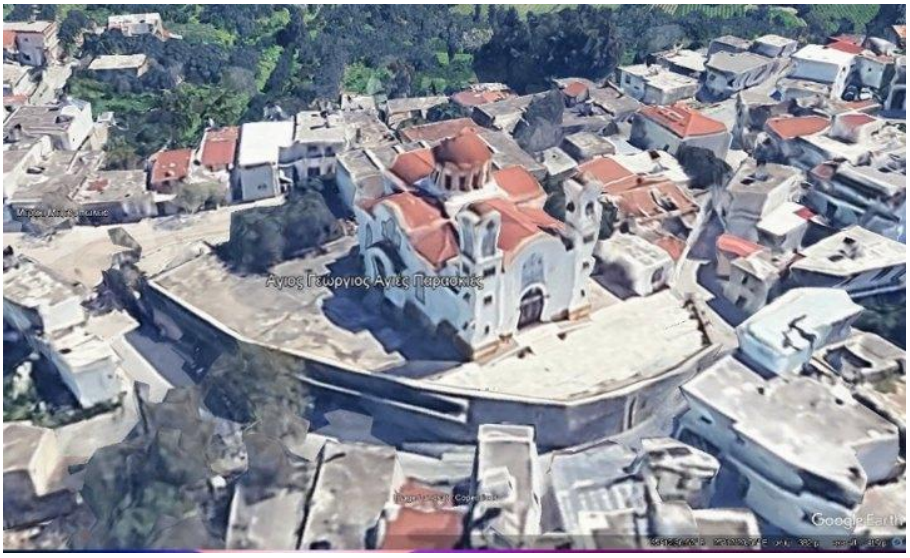
4. Μελέτη περίπτωσης και δεδομένα

Στο κεφάλαιο αυτό η ροή εργασίας του Κεφαλαίου 3 εφαρμόζεται σε πραγματικό κτίριο. Παρουσιάζονται αποκλειστικά τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της εφαρμογής, η μεθοδολογία δεν επαναλαμβάνεται. Επισημαίνεται εξαρχής ότι η δομική αποτίμηση του φορέα αντλήθηκε από τις υφιστάμενες μελέτες των μελετητών του έργου, ενώ η συνεισφορά της εργασίας εστιάζεται στη μοντελοποίηση HBIM, στην καταγραφή των βλαβών στο μοντέλο και στην εξαγωγή ποσοτήτων και κόστους (βλ. ενότητα 4.4).

4.1 Ταυτότητα του ναού

Αντικείμενο της μελέτης είναι η αποκατάσταση του **Ιερού Ναού Αγίου Γεωργίου** της ενορίας Αγιών Παρασκιών (Δήμος Αρχανών–Αστερουσίων, Ηράκλειο Κρήτης), ο οποίος υπέστη βλάβες από τον σεισμό της 27ης Σεπτεμβρίου 2021. Ο ναός βρίσκεται επί της πλατείας Αγίου Γεωργίου, εντός του οικισμού Αγιές Παρασκιές, σε ενιαίο οικόπεδο ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος εμβαδού περίπου 1.800 m². Η ανέγερσή του ξεκίνησε το 1903 και ανήκει στη νεότερη περίοδο με τάση του Ελληνοβυζαντινισμού και είναι **σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο**. Μετά τον σεισμό χαρακτηρίστηκε «ΚΙΤΡΙΝΟΣ».

Εικόνα 4.1. Επίκεντρο του σεισμού και εστιακή απόσταση από τον ναό.



Εικόνα 4.2. Άποψη του ναού από το Google Earth.

4.2 Σεισμικό συμβάν και σεισμικά χαρακτηριστικά

Ο σεισμός του Αρκαλοχωρίου (27/9/2021, μεγέθους Μ 5.9) προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες κυρίως σε λιθόκτιστα και παλαιά κτίρια, ενώ οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα υπέστησαν κυρίως ελαφρές, τοπικού χαρακτήρα βλάβες. Τα σεισμικά και κανονιστικά δεδομένα που διέπουν την αποτίμηση έχουν ως εξής:

Ειδικότερα, κατά τον ΕΑΚ η περιοχή κατατάσσεται στη Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ, με σεισμική επιτάχυνση εδάφους $a = 0,24g$, ενώ ο ναός ανήκει στην Κατηγορία Σπουδαιότητας Σ3 (συντελεστής $\gamma_I = 1,15$ κατά ΕΑΚ και $1,20$ κατά EC8). Κατά τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959 (όπως τροποποιήθηκε το 1984–85), η περιοχή εντάσσεται στην Κατηγορία ΙΙΙ, με σεισμικό συντελεστή $\varepsilon = 0,08 / 0,12 / 0,16$ ανάλογα με την επικινδυνότητα του εδάφους, ενώ ο συντελεστής που συστήνεται από το ΔΑΕΦΚ για τον σεισμό του Αρκαλοχωρίου είναι $\varepsilon = 0,12$. Η οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού λαμβάνεται $a^*/g = 0,48$ (κατηγορία ΚΙ) και το έδαφος κατατάσσεται στην κατηγορία C, με επιτρεπόμενη τάση *150 kPa.*

Εικόνα 4.3. Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΦΕΚ 1154Β/2003).

4.3 Γεωμετρία και υλικά

Ο φέρων οργανισμός του ναού αποτελείται από τέσσερις κυλινδρικούς θολωτούς φορείς σε σταυροειδή διάταξη (αργοί λίθοι με ασθενές κονίαμα, επικάλυψη με βυζαντινά κεραμίδια), τέσσερις μικρότερους θόλους στα τεταρτημόρια της σταυροειδούς διάταξης, ημισφαιρικό τρούλο με στάθμη γένεσης στα 14,20 m, τρεις κόγχες ιερού και δύο υψίκορμα κωδωνοστάσια από οπλισμένο σκυρόδεμα εκατέρωθεν της δυτικής εισόδου. Τα λιθοσώματα είναι κοινής προέλευσης (ιζηματογενής ασβεστόλιθος) και το κονίαμα δόμησης ασβεστοποζολανικό, όμοιας σύστασης σε όλες τις θέσεις.

4.4 Προέλευση δεδομένων, παραδοθέντα αρχεία και διάκριση εργασιών

Η μελέτη στηρίχθηκε τόσο σε υλικό που παραλήφθηκε έτοιμο όσο και σε υλικό που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η διάκριση αυτή αναλύεται στη συνέχεια:

4.4.1 Ιχνηλασιμότητα και διαχείριση δεδομένων

Όλα τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ταξινομήθηκαν σύμφωνα με την προέλευσή τους, τη μορφή τους και τον ρόλο τους στην αποτίμηση και τον σχεδιασμό των επεμβάσεων. Για κάθε αρχείο καταγράφηκαν ο δημιουργός, η χρονική περίοδος παραγωγής, η μορφή αποθήκευσης και ο τρόπος αξιοποίησής του στο πλαίσιο της εργασίας. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει πλήρη ιχνηλασιμότητα των πληροφοριών και επιτρέπει τη σύνδεση των τελικών αποτελεσμάτων με τα πρωτογενή δεδομένα από τα οποία προέκυψαν.

Αρχείο / Δεδομένο	Μορφή	Προέλευση / Δημιουργός	Περίοδος παραγωγής	Αξιοποίηση στη ΜΔΕ
Νέφος σημείων (point cloud) ναού	.rcp	ENIK	2024	Γεωμετρική τεκμηρίωση και μοντελοποίηση HBIM
Τρισδιάστατη σάρωση εσωτερικών χώρων	Point cloud	ENIK	2024	Υπόβαθρο μοντελοποίησης
Φωτογραφίες UAV και φωτογραμμετρία	.jpg, .fbx	Φοιτήτρια	2024	Τεκμηρίωση όψεων, θόλων και στέγης
Σχέδια αποτύπωσης βλαβών	.dwg	ENIK (ΣΜ_046)	2024	Καταγραφή βλαβών
Σχέδια επεμβάσεων	.dwg	ENIK (ΣΜ_046)	2024	Μοντελοποίηση επεμβάσεων
Υπολογιστικό μοντέλο αποτίμησης	3Muri	ENIK	2024	Αποτίμηση υφιστάμενου και ενισχυμένου φορέα
Αρχεία ανταλλαγής BIM	.ifc	Revit/ λογισμικό δομικής ανάλυσης (3Muri)	2024	Διαλειτουργικότητα μοντέλων
Γεωτεχνική μελέτη	PDF	ENIK	2024	Γεωτεχνικές παράμετροι και χαρακτηριστικά θεμελίωσης
Εργαστηριακές δοκιμές υλικών	Πίνακες δοκιμών	ENIK	2024	Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων
Τεύχος επεμβάσεων	PDF	ENIK	2024	Επιλογή και περιγραφή ενισχύσεων
Schedules και προϋπολογισμός	.txt / .xlsx	Φοιτήτρια	2025	Εξαγωγή ποσοτήτων και κοστολόγηση

Πίνακας 4.1. Ιχνηλασιμότητα αρχικών δεδομένων και παραδοθέντων αρχείων

Συγκεκριμένα, παραλήφθηκαν έτοιμα, η στατική αποτίμηση του φορέα (Δομική ανάλυση 3Muri/pushover ENIK: Καμπιτάκης & Φιλίππου, 2024), η επιλογή των επεμβάσεων ενίσχυσης, η γεωτεχνική έρευνα και μελέτη (ENIK: Γεωργίλας, 2024) και οι εργαστηριακές δοκιμές των υλικών και το υλικό αυτό αξιοποιήθηκε και παρουσιάζεται ενιαία. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εκπονήθηκαν η φωτογραμμετρική αποτύπωση των όψεων και της στέγης, η μοντελοποίηση HBIM στο Revit, η καταγραφή και

κωδικοποίηση των βλαβών στο μοντέλο με εκτίμηση της απώλειας φέρουσας ικανότητας (α_i), καθώς και η εξαγωγή ποσοτήτων και του προϋπολογισμού κατά ΔΑΕΦΚ μέσω των Schedule. Ειδικότερα, η τρισδιάστατη σάρωση εκτελέστηκε από την (ΕΝΙΚ) και εισήχθη στο ReCap από τη φοιτήτρια, ενώ η φωτογραμμετρία (λήψεις από drone) πραγματοποιήθηκε από τη φοιτήτρια. Η πλήρης διάκριση «τι εκτελέστηκε / τι παραλήφθηκε» δίνεται στον πίνακα προσωπικής συνεισφοράς της Εισαγωγής.

Διαλειτουργικότητα: μεταβάσεις αρχείων στην εφαρμογή

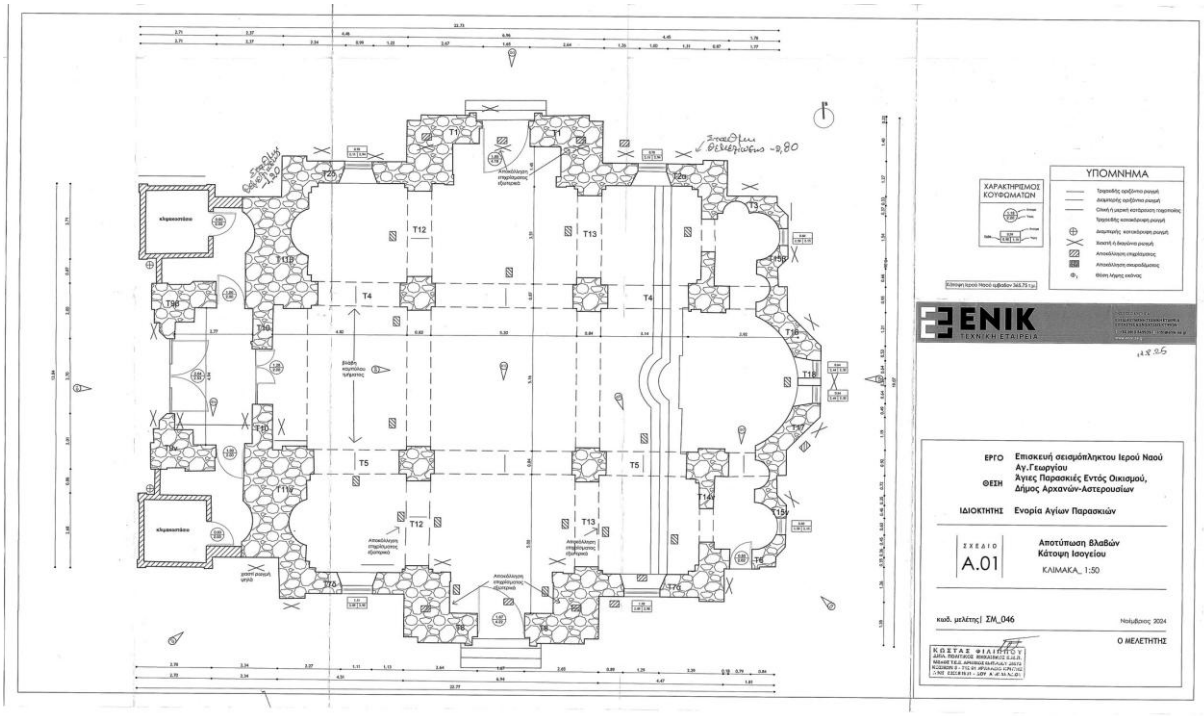
Για κάθε μετάβαση δεδομένων καταγράφονται η μορφή αρχείου, τα πεδία που μεταφέρονται, οι χειροκίνητες ενέργειες, οι απώλειες πληροφορίας και οι έλεγχοι. Τονίζεται ότι αρκετές μεταβάσεις δεν ήταν πλήρως αυτοματοποιημένες, αλλά απαίτησαν χειροκίνητες ενέργειες και ελέγχους.

Μετάβαση (μορφή)	Χειροκίνητες ενέργειες	Απώλειες / έλεγχοι
Σάρωση → ReCap → Revit (.rcp)	Ευθυγράμμιση, κλιμάκωση, καθαρισμός νέφους	Θόρυβος/κενά σε καμπύλες επιφάνειες, έλεγχος με οπτική αντιπαραβολή μοντέλου–νέφους
Φωτογραμμετρία (drone) → πλέγμα (.fbx)	Διαλογή και ευθυγράμμιση φωτογραφιών	Σκιάσεις/κενά σε στέγη, έλεγχος με επιτόπου μετρήσεις τρούλου/θόλων
Revit → Λογισμικό Δομικής ανάλυσης (3Muri) (.ifc)	Ορισμός φερόντων/υλικών, δεν εφαρμόστηκε στην πράξη (δίνεται δυνατότητα)	Μη μεταφορά μη-φερόντων/λεπτομερειών, έλεγχος πεσσών/υπερθύρων στο 3Muri
Λογισμικό Δομικής ανάλυσης (3Muri) → Revit (ενισχυμένος)	Επανεισαγωγή (δίνεται δυνατότητα), ενημέρωση επεμβάσεων	Αντιστοίχιση κωδικών τοίχων (ασυνέπεια ονοματοδοσίας μεταξύ σχεδίων)
Revit schedules → ΔΑΕΦΚ (.txt/.xlsx)	Εξαγωγή txt, αντιγραφή στο πρότυπο	Διασταύρωση εμβαδών με το μοντέλο

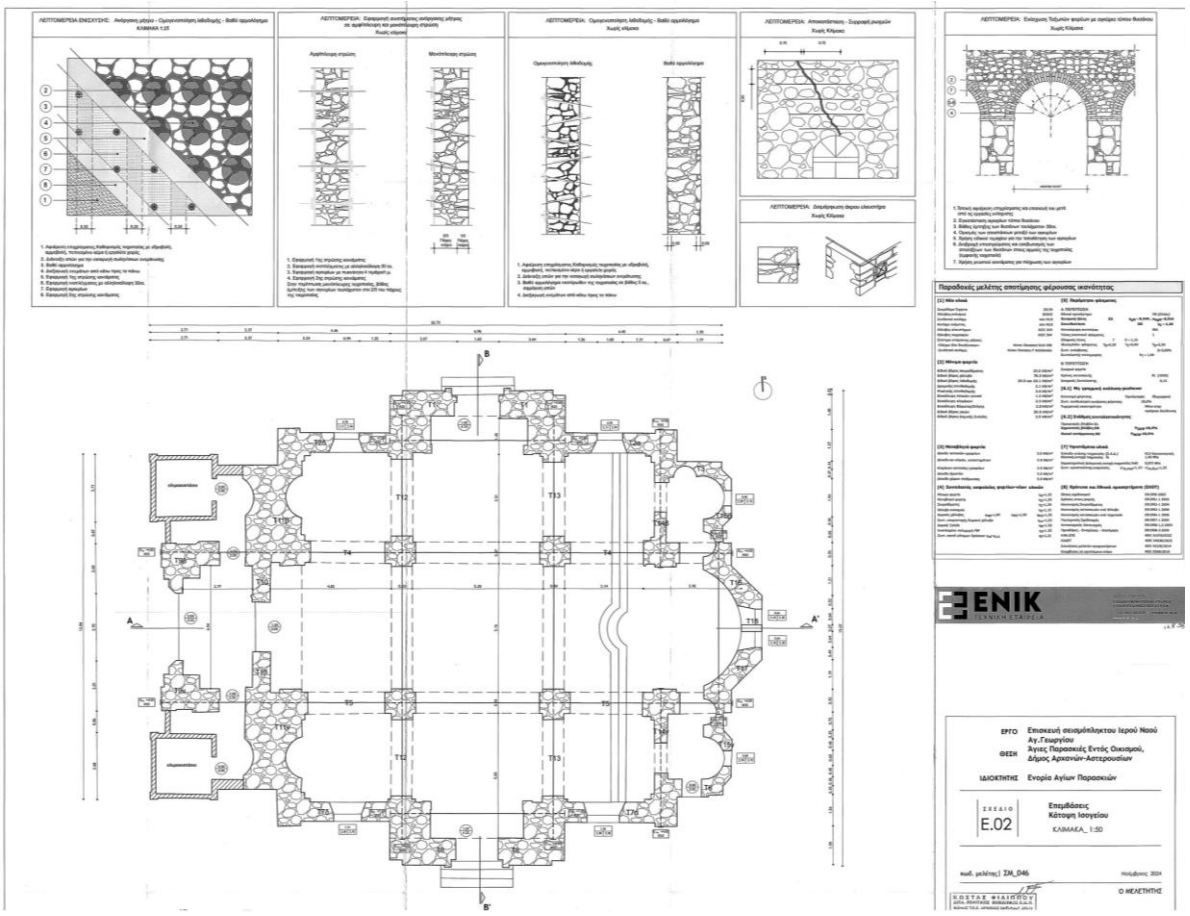
Πίνακας 4.2. Μεταβάσεις αρχείων, χειροκίνητες ενέργειες, απώλειες και έλεγχοι.

Παραδοθέντα αρχεία

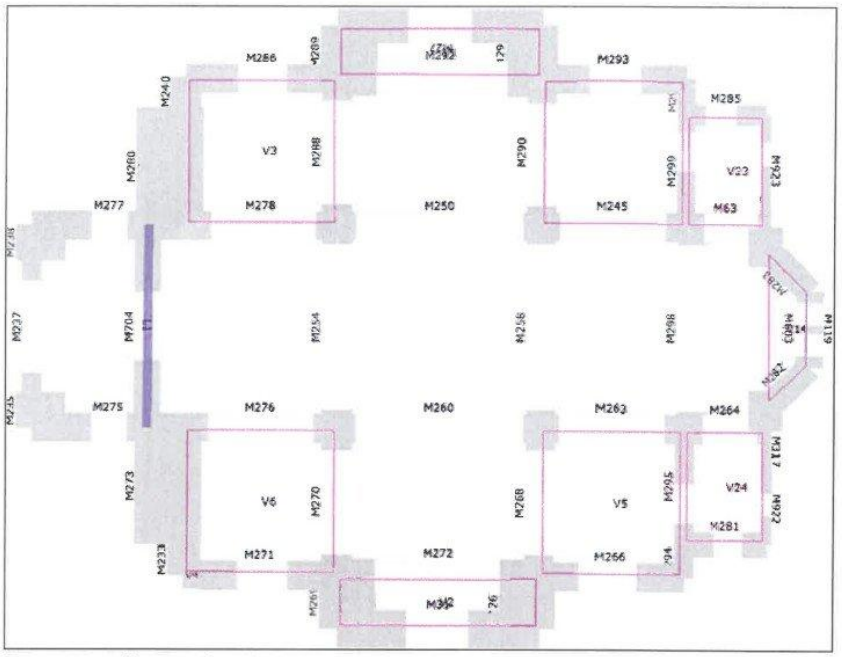
Από τη μελέτη παραλήφθηκαν, μεταξύ άλλων, τα ακόλουθα δισδιάστατα σχέδια αποτύπωσης και επεμβάσεων (ΕΝΙΚ, κωδ. μελέτης ΣΜ_046) καθώς και οι όψεις του προσομοιώματος στο 3Muri:



Εικόνα 4.4. Σχέδιο αποτύπωσης βλαβών — κάτοψη ισογείου (ENIK, ΣΜ_046).

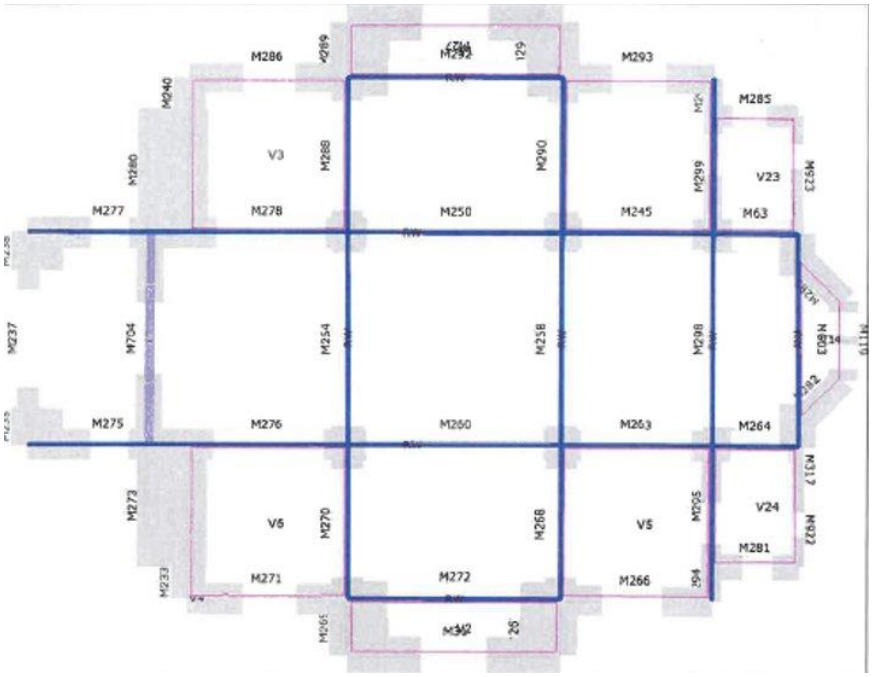


Εικόνα 4.5. Σχέδιο επεμβάσεων και λεπτομέρειες ενίσχυσης — κάτοψη ισογείου (ENIK, ΣΜ_046).



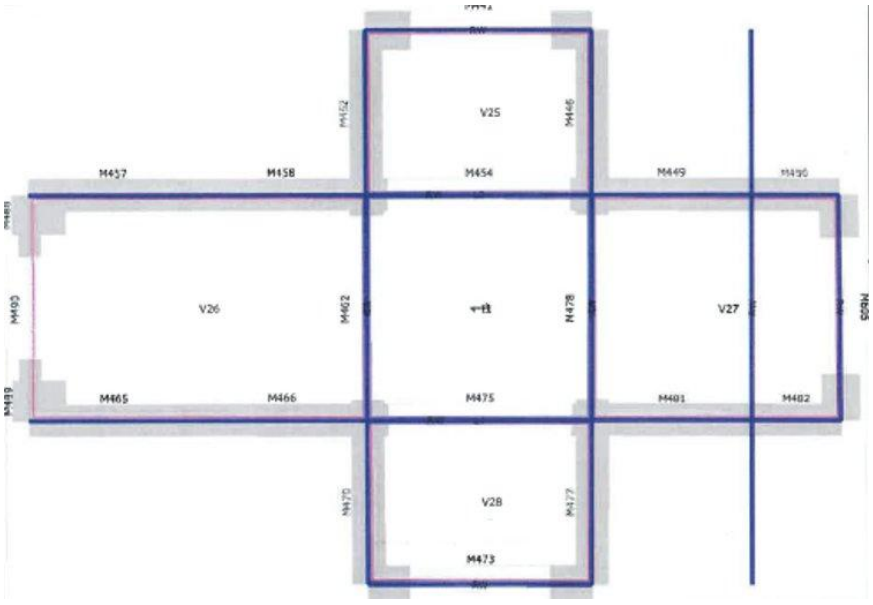
Άποψη του επιπέδου του ορόφου 1

Εικόνα 4.6. Άποψη του επιπέδου του ορόφου 1 — κωδικοποίηση τοίχων.



Εικόνα 4.7. Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου — επίπεδο ορόφου 1 (3Muri).

Εικόνα 4.8. Άποψη του επιπέδου του ορόφου 2 (3Muri)— κωδικοποίηση τοίχων.



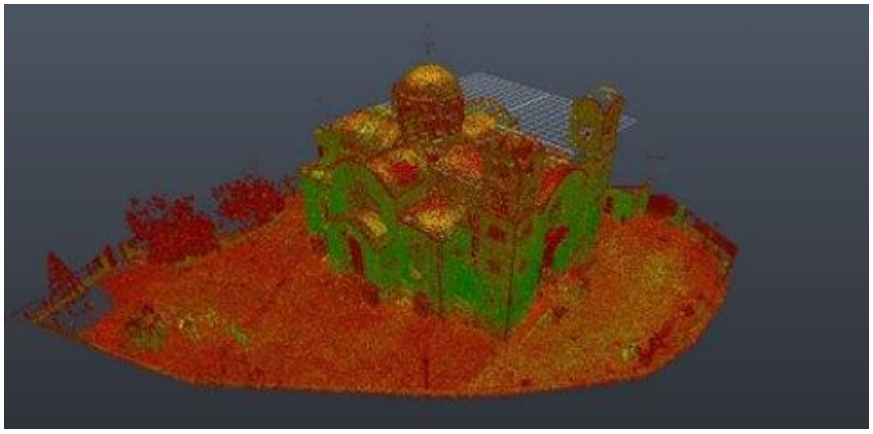
Εικόνα 4.9. Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου — επίπεδο ορόφου 2 (3Muri).

4.5 Ψηφιακή αποτύπωση

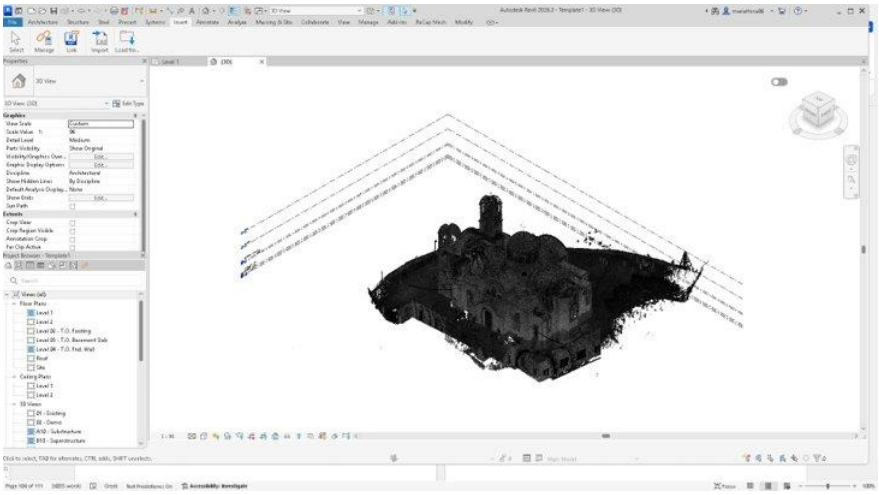
Η αποτύπωση του ναού διεξήχθη με τρισδιάστατη σάρωση (3D scanner FJD Trion P1, από την ΕΝΙΚ) για τους εσωτερικούς χώρους και με φωτογραμμετρία (λήψεις από drone, από τη φοιτήτρια) για τις όψεις και τη στέγη. Το νέφος σημείων (point cloud) εισήχθη από τη φοιτήτρια στο ReCap Pro και στο Revit ως υπόβαθρο μοντελοποίησης. Λόγω της

καμπύλης γεωμετρίας, οι θόλοι και ο τρούλος αποδόθηκαν κυρίως με φωτογραμμετρία και συμπληρωματικές επιτόπου μετρήσεις (βλ. Κεφ. 3).

Εικόνα 4.10. Νέφος σημείων (point cloud) του ναού σε απόδοση έντασης.



Εικόνα 4.11. Έγχρωμο νέφος σημείων (point cloud) του ναού.



Εικόνα 4.12. Το νέφος σημείων (point cloud) εισηγμένο στο Autodesk Revit 2026.

4.6 Καταγραφή βλαβών και απώλεια φέρουσας ικανότητας

Οι κύριες βλάβες που καταγράφηκαν στον φέροντα οργανισμό είναι: καμπτικές ρηγματώσεις σχεδόν σε όλα τα υπέρθυρα, τοπικές και εκτεταμένες αποκολλήσεις επιχρισμάτων στη νότια πλευρά και στην κεντρική κόγχη του ιερού, οριζόντιες ρηγματώσεις στη στάθμη του 1ου επιπέδου των κωδωνοστασίων και στη δυτική πλευρά, εκτεταμένες οριζόντιες ρηγματώσεις στο ύψος έδρασης των θόλων, αλληλοτεμνόμενες λοξές, κατακόρυφες και οριζόντιες ρηγματώσεις σε μεγάλη έκταση, και αποκολλήσεις λιθοσωμάτων στις θέσεις των κλειδιών των αψίδων. Οι ρωγμές των επιχρισμάτων δεν αποτυπώθηκαν, καθώς προβλέπεται ολική καθαίρεσή τους.

Η απώλεια φέρουσας ικανότητας εκτιμήθηκε ανά διεύθυνση, σταθμίζοντας τον βαθμό βλάβης κάθε κατακόρυφου στοιχείου ($\alpha_i = 1 - \varphi_i$) με τις οριζόντιες διατομές του. Και στις δύο διευθύνσεις το κτίριο χαρακτηρίστηκε **γενικού χαρακτήρα**.

Τοίχος	Μήκος	Πλάτος	Βλάβη	φ_i	A_i	$\varphi_i \cdot A_i$
T11 M(292)	6,05	1,21	Α	0,70	7,32	5,12
T24	5,09	0,96	Γ	0,25	4,89	1,22
T11 M(293)	4,92	0,98	Γ	0,25	4,82	1,21
T10 M(285)	1,34	0,58	Γ	0,25	0,78	0,19
T15 M(278)	4,75	0,87	Β	0,50	4,13	2,07
T4 M(276)	4,78	0,88	Β	0,50	4,21	2,10
T6	1,32	0,68	Γ	0,25	0,90	0,22
T11 M(271)	4,99	0,96	Δ	0,00	4,79	0,00
T11 M(286)	4,86	0,94	Δ	0,00	4,57	0,00
T5	5,78	1,31	Β	0,50	7,57	3,79
ΣΥΝΟΛΑ					48,54	15,93

Πίνακας 4.3. Απώλεια φέρουσας ικανότητας κατά X — φχ = 0,33, αχ = 0,67 (χαρακτηρισμός: γενικού).

Τοίχος	Μήκος	Πλάτος	Βλάβη	φ_i	A_i	$\varphi_i \cdot A_i$
T9 M(235)	3,27	0,96	Β	0,50	3,14	1,57
T9 M(238)	3,19	0,99	Β	0,50	3,16	1,58
T1 M(704)	2,86	0,73	Β	0,50	2,09	1,04
T1 M(240)	4,04	2,05	Β	0,50	8,28	4,14
T1 M(233)	4,10	2,00	Β	0,50	8,20	4,10

Τοίχος	Μήκος	Πλάτος	Βλάβη	φ_i	A_i	$\varphi_i \cdot A_i$
Τ4 Μ(254)	3,24	0,85	Β	0,50	2,75	1,38
Τ14 Μ(258)	3,18	0,86	Γ	0,25	2,73	0,68
Τ12 Μ(299)	2,03	0,60	Β	0,50	1,22	0,61
Τ12 Μ(295)	1,95	0,54	Β	0,50	1,05	0,53
Τ3 Μ(295)	2,52	0,71	Γ	0,25	1,79	0,45
Τ3 Μ(299)	2,56	0,71	Γ	0,25	1,82	0,45
Τ3 Μ(283)	1,96	0,88	Δ	0,00	1,72	0,00
Τ3 Μ(282)	2,18	0,77	Δ	0,00	1,68	0,00
Τ3 Μ(119)	0,27	0,82	Δ	0,00	0,22	0,00
ΣΥΝΟΛΑ					39,86	16,53

Πίνακας 4.4. Απώλεια φέρουσας ικανότητας κατά Y — φy = 0,41, αy = 0,59 (χαρακτηρισμός: γενικού).

4.7 Διερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές

Οι επιτόπου εργασίες (οπτική διερεύνηση, τοπικές καθαιρέσεις, πυρηνοληψία) και οι εργαστηριακές δοκιμές αντοχής παραλήφθηκαν από τη μελέτη-γεωτεχνική έρευνα και μελέτη εκπονήθηκε από τον (ΕΝΙΚ: Γεωργίλας Αθ. 2024). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε η ενοποιημένη παρουσίαση και η αξιοποίηση των στοιχείων στο μοντέλο και στην αποτίμηση.

4.7.1 Τεκμηρίωση υλικών και τρόπου δομήσεως

Για την αποτίμηση των δομικών υλικών του φέροντος οργανισμού πραγματοποιήθηκαν εργασίες ακολουθώντας τη μέθοδο τεκμηρίωσης.

4.7.2 Μέθοδος τεκμηρίωσης

4.7.2.1 Επιθεώρηση – οπτική διερεύνηση

Πραγματοποιήθηκαν τοπικές καθαιρέσεις επιχρισμάτων και οπτικός έλεγχος για την αναγνώριση του είδους των λιθοσωμάτων και του τρόπου δομήσεως της τοιχοποιίας.

Από τις αποκαλύψεις τμημάτων της λιθοδομής (συνέπεια του σεισμού της 27ης Σεπτεμβρίου 2021 στο Αρκαλοχώρι), τις τοπικές καθαιρέσεις επιχρισμάτων και τις διατρήσεις διαμέτρου 5 cm σε διάφορες θέσεις των φερόντων τοίχων που έγιναν στο πλαίσιο της πυρηνοληψίας και του ελέγχου της μάζας των λιθοδομών βάθους 40 cm διακρίνονται τα εξής χαρακτηριστικά στον τρόπο δόμησης:

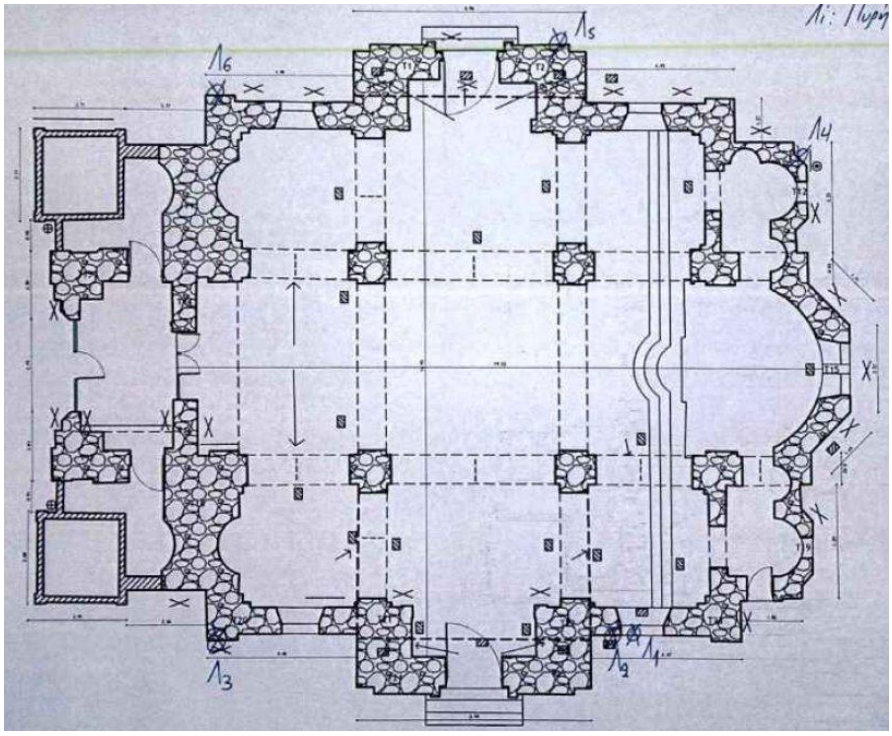
«**ικανό**» μέγεθος λίθων, τα λιθοσώματα είναι ως επί το πλείστον κοινής προέλευσης, αποτελούμενα από ιζηματογενή ασβεστόλιθο όλα τα ανοίγματα φέρουν πλαίσια από μεγάλους, επιχρισμένους, λαξευτούς πωρόλιθους, οι θόλοι στο σύνολό τους είναι λιθόκτιστοι, με ημιλαξευτούς και αργούς λίθους, το συνοδευτικό κονίαμα είναι σε όλες τις θέσεις όμοιας σύστασης, ασβεστοποζολανικό, οι περιμετρικοί τοίχοι διαπλατύνονται κατά *15–20 cm* σε δύο στάθμες: μία σε ύψος *0,73 m* πάνω από το δάπεδο του ναού έως τη στάθμη εισόδου και μία από τη στάθμη του περιβάλλοντος χώρου έως τη στάθμη της εισόδου.

4.7.2.2 Επιτόπου μετρήσεις με συνήθη μέσα

Για τον έλεγχο της αντοχής των λιθοσωμάτων ελήφθησαν έξι πυρήνες από λίθους των τοίχων του ναού. Πρόκειται για λιθοσώματα ασβεστολιθικής προέλευσης, με τάση θραύσης των δοκιμίων από *4,1* έως *39,5 MPa*. Βάσει των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι τα λιθοσώματα είναι ασθενή (αντοχή σε θλίψη μικρότερη των *25 MPa*) και ότι οι λίθοι του νότιου κλίτους έχουν τις χαμηλότερες τιμές θραύσης.

4.7.3 Επιτόπου διερευνητικές εργασίες

Πυρηνοληψία.



Εικόνα 4.13. Σχέδιο αποτύπωσης θέσεων πυρηνοληψίας.

4.7.3.1 Έδαφος θεμελίωσης – θέση του έργου / ανωδομή

Κατά τον γεωμορφολογικό χάρτη του ΕΑΓΜΕ, το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής αποτελεί ο σχηματισμός της Φοινικιάς, με λευκές μάργες ή μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Σοβαρές ενδείξεις αστοχίας και προβλημάτων δεν παρατηρήθηκαν.

Για τη διερεύνηση των εδαφολογικών συνθηκών διεξήχθησαν δύο δοκιμαστικές τομές στη βορειοανατολική και βορειοδυτική όψη του κυρίως ναού, όπως φαίνεται στη γεωλογική μελέτη. Από αυτές προέκυψε ότι η έδραση των τοίχων είναι ανισόσταθμη: το βάθος θεμελίωσης μετρήθηκε 2,80 m στην ανατολική πλευρά και 1,20 m στη δυτική· οι τοίχοι κάτω από τη στάθμη του αύλειου χώρου διαπλατύνονται κατά περίπου 10 cm.

Με βάση τη Γεωτεχνική μελέτη του Γεωργίλα Αθ., πολ. μηχ. (Σεπτέμβριος 2024), τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευής είναι:

τάση εδάφους σ = 150 kPa·

δείκτης εδάφους Ks = 13.000 kN/m²/m·

κατηγορία εδάφους Γ / C·

βάθος θεμελίωσης −2,00 m·

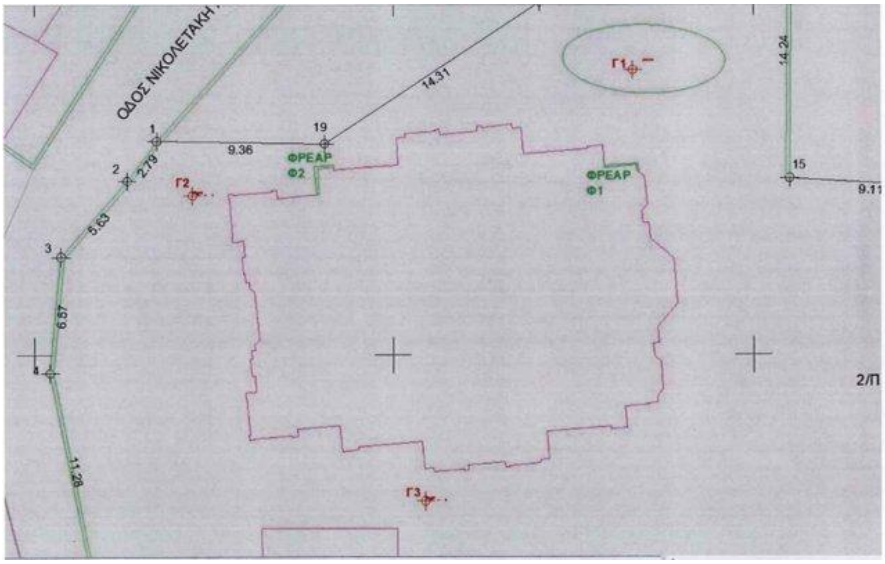
στάθμη υπόγειου ορίζοντα −7,20 m·

γωνία εσωτερικής τριβής φ = 27°·

συνοχή c = 15 kPa·

φαινόμενο βάρος γ = 20 kN/m³.

4.7.3.2 Εργασίες υπαίθρου



Εικόνα 4.14. Θέσεις γεωτρήσεων και φρεάτων (Γ1, Γ3, Φ1, Φ2).

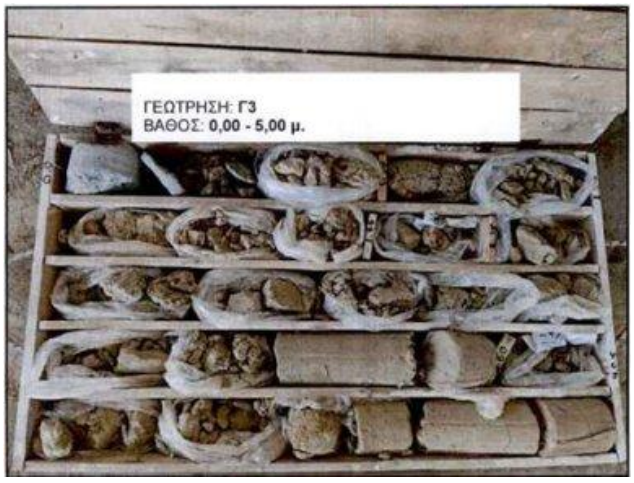
Εικόνα 4.15. Θέση γεώτρησης Γ1.

Εικόνα 4.16. Γεώτρηση Γ1 — δείγματα βάθους 0,00–4,00 m.

Εικόνα 4.17. Γεώτρηση Γ1 — δείγματα βάθους 4,00–9,10 m.

Εικόνα 4.18. Γεώτρηση Γ1 — δείγματα βάθους 9,10–12,15 m.

Εικόνα 4.19. Θέση γεώτρησης Γ3.



Εικόνα 4.20. Γεώτρηση Γ3 — δείγματα βάθους 0,00–5,00 m.

Εικόνα 4.21. Γεώτρηση Γ3 — δείγματα βάθους 5,00–8,45 m.

Γεώτρηση	Βάθος γεώτρησης (m)	Βάθος πιεζομέτρου (m)	Ζώνη μέτρησης, Από (m)	Ζώνη μέτρησης, Έως (m)	Ημερομηνία	Στάθμη υπόγειου νερού (m)
Γ1	12,15	12,15	0,00	12,15	10/8/2024	10,50
Γ2	10,45	–	–	–	10/8/2024	9,30
Γ3	8,45	–	–	–	10/8/2024	7,20

Πίνακας 4.5. Βάθος γεωτρήσεων, πιεζόμετρο και στάθμη υπόγειου ορίζοντα (10/8/2024).

Γεώτρηση	Βάθος έρευνας (m)	Υψόμετρο εδάφους (απόλυτο, m)
Γ1	12,15	+370,95
Γ2	10,45	+370,08
Γ3	8,45	+371,19

Πίνακας 4.6. Βάθος έρευνας και υψόμετρο εδάφους ανά γεώτρηση.

Γεώτρηση	Βάθος (m)	Στρώση / Περιγραφή
Γ1	0,00 – 0,30	Τεχνητές επιχώσεις από ασβεστολιθικά τεμάχια γκριζόλευκου χρώματος.
	0,30 – 1,60	Άργιλος γκρι έως γκριζοκάστανου χρώματος, στιφρή, ελαφρώς πλαστική.
	1,60 – 8,50	Άργιλος καστανού χρώματος με άμμο και χαλίκια, κατά θέσεις οξειδωμένη και οργανική, μέτρια έως υψηλής πλαστικότητας. Παρεμβολές ασβεστολιθικών τεμαχίων και αμμωδών στρώσεων.
	8,50 – 9,10	Άργιλος πρασινοκάστανου χρώματος με άμμο, πλαστική και συνεκτική.
	9,10 – 12,15	Άργιλος με άμμο, πρασινοκάστανου χρώματος, πλαστική και συνεκτική.
Γ2	0,00 – 0,50	Άργιλος ανοικτού γκριζόλευκου έως υποκίτρινου χρώματος με τεμάχια ασβεστόλιθου.
	0,50 – 1,60	Στιφρή άργιλος καστανού έως καστανογκρί χρώματος με λίγες ρίζες, χαλίκια και τεμάχια ασβεστόλιθου, ελαφρώς πλαστική.
	1,60 – 2,05	Αμμώδης άργιλος καστανού χρώματος.
	2,05 – 10,45	Άργιλος καστανού έως πρασινοκάστανου χρώματος, κατά θέσεις αμμώδης, με λίγες ρίζες, χαλίκια και τεμάχια ασβεστόλιθου. Μέτρια πλαστική έως πλαστική.
Γ3	0,00 – 0,40	Τσιμέντο.
	0,40 – 1,60	Άργιλος καστανού έως καστανογκρί χρώματος με λίγες ρίζες, χαλίκια και τεμάχια ασβεστόλιθου, ελαφρώς πλαστική.
	1,60 – 8,45	Άργιλος καστανού έως καστανογκρί χρώματος με λεπτά χαλίκια, μέτρια πλαστική, με άμμο. Κατά θέσεις εμφανίζεται ως αμμώδης άργιλος.

Πίνακας 4.7. Μακροσκοπική περιγραφή σχηματισμού κατά τη διάτρηση (γεωτρήσεις Γ1, Γ2, Γ3).

Γεώτρηση	Βάθος (m)	Κρούσεις / 15 cm	N
Γ1	1,60–2,05	3-5-8	13
	4,00–4,45	12-21-28	49
	7,40–7,85	16-23-30	53
	11,70–12,15	15-30-35	65
Γ2	1,60–2,05	1-2-1	3
	6,00–6,45	7-12-18	30
	10,00–10,45	14-23-35	58
Γ3	1,60–2,05	6-11-14	25
	3,60–4,05	9-15-20	35
	5,40–5,85	6-6-7	13
	8,00–8,45	17-17-17	34

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα δοκιμών διείσδυσης SPT ανά γεώτρηση.

Εικόνα 4.22. Φρεάτιο Φ1.

Εικόνα 4.23. Φρεάτιο Φ2.

4.7.4 Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν μετρήσεις φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων σε επίπεδο υλικού, δομικού στοιχείου ή τμήματος της κατασκευής. Οι μετρήσεις που έγιναν για την αποτίμηση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών του φέροντος οργανισμού είναι οι ακόλουθες.

Για την τεκμηρίωση της αποτίμησης και τη διασφάλιση της διαφάνειας των υπολογισμών, οι μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: εργαστηριακά προσδιοριζόμενες τιμές, τιμές που προκύπτουν από κανονιστικές σχέσεις και παραδοχές που υιοθετήθηκαν στο πλαίσιο της στατικής μελέτης και της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Παράμετρος	Τρόπος προσδιορισμού
Αντοχή λιθοσωμάτων σε θλίψη	Εργαστηριακές δοκιμές πυρήνων
Ειδικό βάρος λιθοσωμάτων	Εργαστηριακές μετρήσεις
Θλιπτική αντοχή κονιάματος	Εργαστηριακή τεκμηρίωση / βιβλιογραφικά δεδομένα
Κατηγορία εδάφους	Γεωτεχνική έρευνα
Επιτρεπόμενη τάση εδάφους	Γεωτεχνική μελέτη
Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας (fwc)	Κανονιστικές σχέσεις ΚΑΔΕΤ και βιβλιογραφία
Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας (fvko)	EC6 και ΚΑΔΕΤ
Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας	Σχέσεις Τάσιου
Μέτρο ελαστικότητας (Ewc)	ΚΑΔΕΤ, EC6 και βιβλιογραφικές σχέσεις
Συντελεστές ασφαλείας	ΚΑΔΕΤ, ΚΑΝ.ΕΠΕ.
Δείκτης συμπεριφοράς q	Παραδοχή στατικής μελέτης
Σεισμικά σενάρια σχεδιασμού	Κανονιστικές απαιτήσεις και παραδοχές αποτίμησης

Πίνακας 4.9. Προέλευση μηχανικών και γεωτεχνικών παραμέτρων

4.7.4.1 Μέτρηση μηχανικών χαρακτηριστικών λιθοσωμάτων

Η τάση θραύσης των δοκιμίων κυμαίνεται από *4,1* έως *39,5 MPa*, οι λίθοι του νότιου κλίτους έχουν τις χαμηλότερες τιμές. Η μέση τιμή θραύσης των έξι πυρήνων είναι *16,03 MPa.*

Α/Α Πυρήνα	Θέση πυρήνα	Τιμή θραύσης (MPa)	Τύπος πετρώματος
Λ1	Νότιος τοίχος, εξωτερικά	9,0	Ασβεστόλιθος χρώματος μπεζ
Λ2	Νότιος τοίχος, εξωτερικά	12,2	«
Λ3	Νότιος τοίχος, εξωτερικά	9,3	«

Λ4	Ανατολικός τοίχος, εξωτερικά	4,1	«
Λ5	Βόρειος τοίχος, εξωτερικά	22,1	«
Λ6	Βόρειος τοίχος, εσωτερικά	39,5	«

Πίνακας 4.10. Τάση θραύσης ανά πυρήνα — εργαστηριακά αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη λιθοσωμάτων.

Ενδεικτικά, βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ «Μέθοδοι δοκιμής για φυσικούς λίθους ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη», η αναμενόμενη χαμηλότερη τιμή σε θλίψη προκύπτει ίση με *2,60 MPa.*

Δοκίμιο	**Τάση θραύσης, f (MPa)**	**ln(f)**
$Λ_1$	9,00	2,197
$Λ_2$	12,20	2,501
$Λ_3$	9,30	2,230
$Λ_4$	4,10	1,411
$Λ_5$	22,10	3,096
$Λ_6$	39,50	3,676

Παράμετρος	**Τιμή**
Μέση τιμή τάσης θραύσης (MPa)	16,03
Μέγιστη τιμή (MPa)	39,50
Ελάχιστη τιμή (MPa)	4,10
Τυπική απόκλιση (MPa)	12,96
Μέση τιμή ln(f)	2,52
Τυπική απόκλιση ln(f)	0,79
Συντελεστής διακύμανσης	0,81
Συντελεστής K	1,99
Εκθέτης	0,955
Χαμηλότερη αναμενόμενη τιμή αντοχής (MPa)	2,60

Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης λιθοσωμάτων και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής αντοχής του λιθοϋλικού.

Ελήφθησαν δοκίμια κυλινδρικής διατομής από πέντε πυρήνες λιθοσωμάτων και υπολογίστηκε το ειδικό βάρος τους.

Δοκίμιο	**Διάμετρος (m)**	**Ύψος (m)**	**Βάρος (gr)**	**Ειδικό βάρος (kg/m³)**
1	0,0485	0,129	490	2056,05
2	0,0485	0,091	340	2022,39
3	0,0485	0,264	1000	2050,33
4	0,0485	0,097	360	2008,90
5	0,0485	0,130	430	1790,41

Πίνακας 4.12. Υπολογισμός ειδικού βάρους λιθοσωμάτων.

Κατά την ανάλυση, το ειδικό βάρος της τοιχοποιίας λαμβάνεται ίσο με τον μέσο όρο των μετρήσεων εν ξηρώ των λιθοσωμάτων, ήτοι $1.985,60\ kg/m^3 \approx 2.000\ kg/m^3$, συνυπολογίζοντας και το ελαφρύτερο συνδετικό κονίαμα.

4.7.4.2 Μέτρηση μηχανικών χαρακτηριστικών κονιαμάτων

Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων λαμβάνεται $f_{mc} = 1,00\ MPa$.

4.7.4.3 Μέτρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας

Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

Κατά τον ΚΑΔΕΤ (παρ. 6.2.4.1), ελλείψει άλλων στοιχείων, η μέση τιμή θλιπτικής αντοχής μονόστρωτης τοιχοποιίας χαμηλής αντοχής υπολογίζεται ως:

$f_{wc} = \xi\cdot[(2/3)\cdot\sqrt{f_{bc}} - f_0 + \lambda\cdot fmc] = 1,00\cdot[(2/3)\cdot 4,004 - 1,5 + 0,5\cdot 1,00] = 1,67\ MPa$

όπου f_{bc} η θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων, λ ο συντελεστής ασφαλείας λιθοσώματος–κονιάματος (0,50 για τραχείς, 0,10 για λείους λίθους) f_0 συντελεστής βαθμού λάξευσης (*0,00 για λαξευτή λιθοδομή, 0,50–1,00 για ημιλαξευτούς, 1,50–2,50 για αργολιθοδομή*) και $\xi = 1/[1+3,5\cdot(k-k0)] \leq 1,00$ *ο συντελεστής επιρροής του πάχους των αρμών, με* $k = V_m/V_w \geq 0,30$ *(αν* $V_m/V_w \leq 0,30$ *τότε* $\xi = 1,00$*).*

Άλλες σχέσεις από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία δίνουν:

Κατά Brocker: $f_{wc} = 0,70\cdot f_{bc}\cdot f_{mc} = 0,70\cdot 4,004\cdot 1,00 = 2,80\ MPa$

Κατά Hendry: $f_{wc} = \sqrt{f_{bc}} = 4,00\ MPa$

Κατά Otto-Graf: $f_{wc} = f_{bc}\cdot(4+0,10\cdot fmc)/(14+4\cdot hw/tw) + \gamma =$

$16,03\cdot(4,00+0,10\cdot 1,00)/(14+4\cdot 8,125) = 1,41\ MPa$

Κατά Σπυράκο (Πίν. 2, αργολιθοδομή Τύπου Ι με κανονική αλληλοεμπλοκή*):* $f_{wc} = 1,95\ MPa$

Κατά EC-6: $f_k = K\cdot f_{bc}^{0,7}\cdot f_{mc}^{0,3} = 0,45\cdot 16,04^{0,7}\cdot 1,00^{0,3} = 2,51\ MPa$

Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας.

Κατά ΚΑΔΕΤ (§6.5.2): $f = min\{ f_{vko} + \mu\cdot\sigma d,\ 0,065\cdot f_{bc} \},\ \mu\varepsilon\ \mu = 0,40$

όπου $f_{vko} \equiv f_{vk}$ η διατμητική αντοχή χωρίς κατακόρυφη ορθή τάση (συνάφεια κονιάματος–λιθοσώματος).

Κατά EC-6 (Πίν. 3.4): $f_{vko} = 0,10\ MPa$

Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας.

Κατά Τάσιο — κατακόρυφη: $f_{wt,u} = (2/3)\cdot f_{mt} = (2/3)\cdot 0,20 = 0,133\ MPa$

Κατά Τάσιο — οριζόντια: $f_{wt,h} = 0,80\cdot f_{wt,u} = 0,80\cdot 0,133 = 0,106\ MPa$

Μέτρο ελαστικότητας.

Κατά ΚΑΔΕΤ *(για 1 MPa < f_{wt} < 3 MPa):* $E_{wc} = 1300\cdot(1 - f_{wc}/s)\cdot f_{wc} \pm 140\cdot f_{wc}^2 = 1300\cdot 0{,}666\cdot 1{,}67 + 390{,}45 = 1.836{,}34 \rightarrow E_{wc} = 1{,}836\ GPa$

Κατά Σπυράκο, 2019 (Πίν. 5.1*):* $E_{wc} = 0{,}87\ GPa$

Κατά EC-6: $E_{wc} = 1000\cdot f_{wc} = 1{,}67\ GPa$

4.8 Στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων και σπουδαιότητα κτιρίου

Η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (ΣΑΔ) για τη γεωμετρία του φορέα και των επιμέρους φερόντων στοιχείων θεωρείται υψηλή. Πέρα από τα στοιχεία που αποκαλύφθηκαν, μετρήθηκαν τα πάχη και τα ύψη των τοίχων σε όλες τις θέσεις, καθώς και οι διαστάσεις των ανοιγμάτων.

Η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων για τη φέρουσα τοιχοποιία θεωρείται «**ικανοποιητική**». Η ομοιομορφία των λιθοσωμάτων και του συνδετικού κονιάματος σε όλη την έκταση του ναού, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις των ιδιοτήτων, εκτιμάται ότι αντικατοπτρίζεται και στις μέσες τιμές των μετρήσεων που επιλέχθηκαν.

Σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ 2023 (ΦΕΚ 2493/Β/18-04-2023), ο ναός κατατάσσεται στην κατηγορία σπουδαιότητας ΙΙΙ. Για κτίρια σπουδαιότητας ΙΙΙ, ως ελάχιστος ανεκτός στόχος αποτίμησης ορίζεται η στάθμη επιτελεστικότητας **Β1** (Προστασία ζωής), για σεισμό σχεδιασμού με πιθανότητα υπέρβασης 10% εντός συμβατικού χρόνου ζωής 50 ετών.

Κατηγορία Σπουδαιότητας	Κτίρια
I	**Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, <u>όπως</u>**: αγροτικά οικήματα και αγροτικές αποθήκες, υπόστεγα, στάβλοι, βουστάσια, χοιροστάσια, ορνιθοτροφεία, κλπ.
II	**Συνήθη κτίρια, <u>όπως</u>**: κατοικίες και γραφεία, βιομηχανικά - βιοτεχνικά κτίρια, ξενοδοχεία (τα οποία δεν περιλαμβάνουν χώρους συνεδρίων), ξενώνες, οικοτροφεία, χώροι εκθέσεων, χώροι εστιάσεως και ψυχαγωγίας (ζαχαροπλαστεία, καφενεία, μπούλινγκ, μπιλιάρδου, ηλεκτρονικών παιχνιδιών, εστιατόρια, μπαρ, κλπ), τράπεζες, ιατρεία, αγορές, υπεραγορές, εμπορικά κέντρα, καταστήματα, φαρμακεία, κουρείς, κομμωτήρια, ινστιτούτα γυμναστικής, βιβλιοθήκες, εργοστάσια, συνεργεία συντήρησης και επισκευής αυτοκινήτων, βαφεία, ξυλουργεία, εργαστήρια ερευνών, παρασκευαστήρια τροφίμων, καθαριστήρια, κέντρα μηχανογράφησης, αποθήκες, κτίρια στάθμευσης αυτοκινήτων, πρατήρια υγρών καυσίμων, ανεμογεννήτριες, γραφεία δημοσίων υπηρεσιών και τοπικής αυτοδιοίκησης που δεν εμπίπτουν στην κατηγορία IV, κλπ.
III	**Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας, καθώς και κτίρια δημόσιων συναθροίσεων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου, <u>όπως</u>**: αίθουσες αεροδρομίων, χώροι συνεδρίων, κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες, εκπαιδευτικά κτίρια, αίθουσες διδασκαλίας, φροντιστήρια, νηπιαγωγεία, χώροι συναυλιών, αίθουσες δικαστηρίων, ναοί, χώροι αθλητικών συγκεντρώσεων, θέατρα, κινηματογράφοι, κέντρα διασκέδασης, αίθουσες αναμονής επιβατών, ψυχιατρεία, ιδρύματα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ιδρύματα χρονίως πασχόντων, οίκοι ευγηρίας, βρεφοκομεία, βρεφικοί σταθμοί, παιδικοί σταθμοί, παιδότοποι, αναμορφωτήρια, φυλακές, εγκαταστάσεις καθαρισμού νερού και αποβλήτων, κλπ.
IV	**Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, <u>όπως</u>**: κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, κλινικές, αγροτικά ιατρεία, υγειονομικοί σταθμοί, κέντρα υγείας, διυλιστήρια, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, πυροσβεστικοί και αστυνομικοί σταθμοί, κτίρια δημόσιων επιτελικών υπηρεσιών για την αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών από σεισμό. Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας, <u>όπως</u>: **μουσεία, αποθήκες μουσείων, κλπ.**

Πίνακας 4.13. Κατηγορίες σπουδαιότητας κτιρίων (Παράρτημα ΚΑΔΕΤ).

Κατηγορία σπουδαιότητας	Ελάχιστοι ανεκτοί στόχοι
I	Γ2
II	Γ1
III	**Β1**

IV	B1 και A2 (ικανοποίηση και των δύο στόχων)

Πίνακας 4.14. Ελάχιστοι ανεκτοί στόχοι αποτίμησης ανά κατηγορία σπουδαιότητας (Παράρτημα ΚΑΔΕΤ). Ο ναός ανήκει στην κατηγορία ΙΙΙ (στόχος Β1).

Σε κάθε περίπτωση θεωρείται ότι ισχύει Α1>Α2, Β1>Β2, Γ1>Γ2, Α1>Β1>Γ1 και Α2>Β2>Γ2.

Στο πλαίσιο της μελέτης, η αποτίμηση γίνεται με την ανωτέρω απόφαση, σε συνδυασμό με την υπ' αριθμ. 1544/ΣΤ8 απόφαση (καθορισμός ελάχιστων υποχρεωτικών απαιτήσεων για τη σύνταξη μελετών αποκατάστασης κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό) και τον ΦΕΚ 455/Β/2014, για ελάχιστο ανεκτό στόχο αποτίμησης **Β1** και σεισμικό φορτίο που αντιστοιχεί σε σεισμική επιτάχυνση $ag = 0,32 \times 1,50 = 0,48g$ για ανελαστική ανάλυση.

4.9 Στάθμη επιτελεστικότητας — παραδοχές

Οι παραδοχές της αποτίμησης των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας και συμπεριφοράς, μόνιμων και κινητών φορτίων, σεισμολογικών δεδομένων και στόχων επιτελεστικότητας συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Παράμετρος	Τιμή
Προσομοίωμα σεισμικών δράσεων — υφιστάμενο δόμημα με έντονες/εκτεταμένες βλάβες (ΚΑΔΕΤ, Πίν. Σ4.1) — γ_{Ed}	1,10
Δράσεις (ΚΑΔΕΤ §4.5.2) — γ_g (G / E)	1,10 / 1,10
Ιδιότητες τοιχοποιίας (ΚΑΔΕΤ §4.5.3, ΣΑΔ Ικανοποιητική) — έλεγχος εντατικών μεγεθών, γ_m	1,35
Ιδιότητες τοιχοποιίας — έλεγχος παραμορφώσεων, γ_m	1,10
Ιδιότητες σκυροδέματος (ΚΑΝ.ΕΠΕ §4.5.3, μέσες τιμές) — $\gamma_m = \gamma_s$	1,30
Ιδιότητες χάλυβα (ΚΑΝ.ΕΠΕ §4.5.3, μέσες τιμές) — $\gamma_m = \gamma_s$	1,15
Δείκτης συμπεριφοράς q΄ (άοπλοι τοίχοι)	1,20 / 1,20
Λόγος q*/q΄ ανά στάθμη Α / Β / Γ	0,60 / 1,00 / 1,40

Πίνακας 4.15. Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας και συμπεριφοράς.

Μόνιμο φορτίο	Τιμή
Ίδιο βάρος σκυροδέματος	25,0 kN/m³
Ίδιο βάρος χάλυβα	78,5 kN/m³
Ίδιο βάρος φέρουσας οπτοπλινθοδομής	18,0 kN/m³
Ίδιο βάρος φέρουσας λιθοδομής	20,0 kN/m³
Βάρος δρομικής οπτοπλινθοδομής	2,1 kN/m²
Βάρος μπατικής οπτοπλινθοδομής	3,6 kN/m²
Επικάλυψη δαπέδων	0,5 kN/m²
Επικάλυψη στέγης	1,2 kN/m²

Επικάλυψη κλιμάκων	3,5 kN/m²

Πίνακας 4.16. Μόνιμα φορτία.

Κινητό / περιβαλλοντικό φορτίο	Τιμή
Δάπεδα / εξώστες	3,00 / 5,00 kN/m²
Άνεμος (EC1)	vb = 33 m/s
Χιόνι (EC1)	sk = 0,40 kN/m²

Πίνακας 4.17. Κινητά και περιβαλλοντικά φορτία.

Σεισμολογικό δεδομένο	Τιμή
Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (Κανονισμός 1959)	III
Εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού (1959) — ε	0,12
Τύπος εδάφους (1959) / κατηγορία EC8	B / C
Επιτρεπόμενη τάση εδάφους	150 kPa

Πίνακας 4.18. Σεισμολογικά δεδομένα.

Παράμετρος	Τιμή
Ελάχιστη στάθμη επιτελεστικότητας (ΚΑΔΕΤ)	B1

Πίνακας 4.19.Ελάχιστη στάθμη επιτελεστικότητας.

Παράμετρος	Τιμή
Ελάχιστη σεισμική κλάση / στάθμη αξιοπιστίας	Ικανοποιητική

Πίνακας 4.20. Ελάχιστη σεισμική κλάση.

4.9.1 Συνοπτική διάκριση πηγών δεδομένων αποτίμησης

Για την αποφυγή σύγχυσης μεταξύ μετρημένων τιμών, κανονιστικών υπολογισμών και παραδοχών της στατικής μελέτης, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην αποτίμηση ταξινομούνται ως εξής:

Τιμές από εργαστηριακές δοκιμές

- Τάση θραύσης λιθοσωμάτων.
- Ειδικό βάρος λιθοσωμάτων.
- Γεωτεχνικές παράμετροι εδάφους.
- Αποτελέσματα πυρηνοληψιών και δοκιμών SPT.

Τιμές από κανονιστικές σχέσεις

- Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας.
- Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας.
- Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας.

- Μέτρο ελαστικότητας τοιχοποιίας.

Παραδοχές της στατικής μελέτης

- Επιλογή τελικών μηχανικών χαρακτηριστικών.
- Συντελεστές ασφαλείας.
- Δείκτες συμπεριφοράς.
- Παραδοχές φόρτισης.
- Σεισμικά σενάρια και στόχοι επιτελεστικότητας.
- Παραδοχές προσομοίωσης στο 3Muri.

4.10 Μέθοδος ανάλυσης – προσομοίωσης – αποτίμηση

Η αποτίμηση εκπονήθηκε στο λογισμικό 3Muri, το οποίο βασίζεται σε τεχνολογία BIM: μέσω του προσθέτου IFC (import/export) αναγνωρίζει τις πληροφορίες του τρισδιάστατου μοντέλου και δημιουργεί αυτόματα τον φορέα με τη μορφή ισοδύναμων πλαισίων, ενώ με την αντίστροφη διαδικασία το μοντέλο εξάγεται σε σχεδιαστικό περιβάλλον για την ολοκλήρωση των σχεδίων.

Σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ, τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και τον Ευρωκώδικα 8, ο στόχος αποτίμησης συνδυάζει μια στάθμη επιτελεστικότητας (στοχευόμενη συμπεριφορά) με μια σεισμική δράση δεδομένης πιθανότητας υπέρβασης εντός της τεχνικής διάρκειας ζωής του έργου. Για το εξεταζόμενο κτίριο, κατηγορίας σπουδαιότητας ΣΙΙ, ως ελάχιστος ανεκτός στόχος ορίζεται η στάθμη επιτελεστικότητας **Β1** «**Σημαντικές Βλάβες**» (Προστασία ζωής) και, συμπληρωματικά, η στάθμη **Γ** «**Οιονεί Κατάρρευση**» με στόχο τη σεισμική κλάση **Γ1**. Η αποτίμηση εκτελείται με μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover), με τους ελέγχους να διεξάγονται σε όρους μετακινήσεων, για δύο σενάρια φάσματος (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959 και Ευρωκώδικας 8) και για τον υφιστάμενο και τον ενισχυμένο φορέα.

Ελαστική ανάλυση (κατά Σπυράκο, 2019)

Οι ελαστικές μέθοδοι-ισοδύναμη στατική ανάλυση απόκρισης και ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης-υιοθετούν τη γραμμική σχέση έντασης–παραμόρφωσης για τα δομικά στοιχεία, με χρήση καθολικών *(q)* ή τοπικών *(m)* δεικτών συμπεριφοράς/πλαστιμότητας. Δίνουν καλή ένδειξη της ελαστικής συμπεριφοράς μέχρι

την πρώτη «**διαρροή**», αλλά δεν προβλέπουν την ανακατανομή των εντάσεων κατά την προοδευτική διαρροή των στοιχείων, ενώ ο συντελεστής συμπεριφοράς q θεωρεί ουσιαστικά σταθερή πλαστιμότητα σε όλα τα στοιχεία-παραδοχές που κατά κανόνα δεν ισχύει σε υφιστάμενες κατασκευές.

Ο υπολογισμός μέσω της γραμμικής ανάλυσης στηρίζεται στον καθορισμό της τέμνουσας δύναμης στη βάση του κτιρίου. Η τέμνουσα βάσης λόγω της σεισμικής δράσης, F_b, για κάθε οριζόντια διεύθυνση στην οποία αναλύεται το κτίριο, προσδιορίζεται από τη σχέση:

$F_b=S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda$

Από αυτήν υπολογίζονται οι καμπτικές ροπές, οι τέμνουσες και οι κύριες τιμές αντίστασης ανά στοιχείο.

Όπου:

Sd(T1): Η τεταγμένη του φάσματος του έργου για την περίοδο T.

T1:Η θεμελιώδους περιόδου ταλάντωσης του κτιρίου για μια ελαστική κίνηση στην Καθοριζόμενη Διεύθυνση.

m: Η συνολική μάζα του κτιρίου πάνω από τη θεμελίωση ή πάνω από την κορυφή μιας άκαμπτης βάσης.

l: Ο συντελεστής διόρθωσης του οποίου οι τιμές λαμβάνονται ίσες με:

l=0.85 εάν T1≥2Tc και το κτίριο έχει πάνω από δυο στάθμες ή αλλιώς l=1

Τα αποτελέσματα της σεισμικής δράσης πρέπει να προσδιορίζονται με την εφαρμογή σε επίπεδο μοντέλου δυο διαστάσεων οριζόντιων δυνάμεων F_i οι οποίες πηγαίνουν σε όλα τα επίπεδα.

$F_i=F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_i \cdot m_i}$

Από την εφαρμογή αυτών των δυνάμεων υπολογίζονται οι καμπτικές ροπές κι τέμνουσες, ενώ προσδιορίζονται οι κύριες τιμές αντίστασης για κάθε στοιχείο.

Μη-γραμμική στατική ανάλυση – pushover (κατά Σπυράκο, 2019)

Η ανελαστική στατική ανάλυση (pushover) εκτελείται υπό σταθερά κατακόρυφα φορτία βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενα οριζόντια φορτία, και περιγράφει το σύστημα αντίστασης έναντι σεισμικών δράσεων μέσω της καμπύλης ικανότητας ενός διαγράμματος τέμνουσας βάσης μετατόπισης του κόμβου ελέγχου. Η ανάλυση καταδεικνύει τους μηχανισμούς αστοχίας και το ενδεχόμενο προοδευτικής κατάρρευσης, ενώ η μέθοδος των μακροστοιχείων *(FME)* μειώνει τους βαθμούς ελευθερίας.

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8, οι απαιτούμενοι έλεγχοι περιλαμβάνουν τη σύγκριση των επιμέρους καμπυλών ικανότητας που δημιουργούνται κατά τις αναλύσεις με τις απαιτούμενες μετακινήσεις. Η ίδια παράγραφος ορίζει δύο τύπους κατανομών των οριζόντιων δυνάμεων που πρέπει να ελεγχθούν:

- κατανομή με βάση τις μάζες κάθε στάθμης:

$$F_i = \frac{m_i}{\sum_\iota m_i}$$

- κατανομή με βάση το γινόμενο των μαζών επί την παραμόρφωση της πρώτης ιδιομορφής

Με τον τρόπο αυτό, η τιμή της μέγιστης μετακίνησης στη βάση του κτιρίου προκύπτει από τον υπολογισμό της κατανομής των δυνάμεων και αποτελεί την οριακή τιμή για το κτίριο. Η μετακίνηση που ελέγχεται για τον καθορισμό της καμπύλης ικανότητας λαμβάνεται στο σημείο του κτιρίου που ονομάζεται κόμβος ελέγχου.

Ο κανονισμός απαιτεί τη διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας σε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα. Ο προσδιορισμός της καμπύλης ως προς το ισοδύναμο σύστημα επιτρέπει τον υπολογισμό της περιόδου στην οποία προκύπτει η μέγιστη σεισμική μετακίνηση, σύμφωνα με τα φάσματα της παραγράφου 3.2.2.2 του Ευρωκώδικα 8. Αντίστοιχα, κατά την παράγραφο 4.3.2 του Ευρωκώδικα 8, η τυχηματική εκκεντρότητα του κέντρου μάζας λαμβάνεται ίση με το 5% της μέγιστης διάστασης του κτιρίου στη διεύθυνση την κάθετη προς τη σεισμική δράση.

Με βάση τη μορφή του κτιρίου και τον κανονισμό, οι μη-γραμμικές αναλύσεις στο πρόγραμμα ορίζονται από τις εξής παραμέτρους:

- **Σεισμικό φορτίο:** η κατανομή φορτίων που θα υπολογιστοούν (με βάση τις μάζες ή την πρώτη ιδιομορφή).
- **Διεύθυνση:** η διεύθυνση στην οποία η κατασκευή υπόκειται σε σεισμικά φορτία (X, Y ή στο καθολικό σύστημα).

Προκειμένου να προσδιοριστεί η δυσμενέστερη κατάσταση από τις σεισμικές δυνάμεις, πραγματοποιούνται επιμέρους αναλύσεις για κάθε κατανομή, για κάθε σεισμική διεύθυνση και για κάθε πιθανή τυχηματική εκκεντρότητα.

4.10.1 Αποτίμηση υφιστάμενου φορέα

Περιγραφή μοντέλου και μηχανικά χαρακτηριστικά

Οι μηχανικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό προσομοίωμα δεν προέρχονται αποκλειστικά από άμεσες μετρήσεις. Οι εργαστηριακές δοκιμές παρείχαν τις βασικές ιδιότητες των λιθοσωμάτων, του κονιάματος και του εδάφους θεμελίωσης, ενώ τα χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας υπολογίσθηκαν μέσω των προβλεπόμενων σχέσεων του ΚΑΔΕΤ, του Ευρωκώδικα 6 και της σχετικής βιβλιογραφίας. Οι τελικές τιμές που εισήχθησαν στο λογισμικό 3Muri προέκυψαν κατόπιν αξιολόγησης των διαθέσιμων δεδομένων από τους μελετητές και αποτελούν τις παραδοχές της στατικής αποτίμησης που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας που εισήχθησαν στο προσομοίωμα προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και τις σχέσεις του ΚΑΔΕΤ (ενότητα 4.7) και συνοψίζονται στον Πίνακα 4.21.

Μηχανικό χαρακτηριστικό	Τιμή
Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας f_{wc}	1,95 MPa (Σπυράκος)
Διατμητική αντοχή f_{vko}	0,10 MPa (EC-6)
Εφελκυστική αντοχή $f_{wt,u}$ / $f_{wt,h}$	0,133 / 0,106 MPa
Μέτρο ελαστικότητας E_{wc}	1,836 GPa (ΚΑΔΕΤ) / 0,87 GPa (Σπυράκος)
Φαινόμενο βάρος γ	20 kN/m³ (≈ 2.000 kg/m³)

Πίνακας 4.21. Μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας (υφιστάμενος φορέας).

No.	Τοίχοι	Υλικό	Ενίσχυση	Υψόμετρο [m]	Απόλυτο Ύψος [m]	Πάχος [m]
258	2	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
267	2	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,620
268	2	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
290	2	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
291	2	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,500
294	3	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,500
295	3	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,500
297	3	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,460
298	3	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,860
299	3	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,460
254	4	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
269	4	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,620
270	4	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
288	4	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
289	4	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,620
286	5	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,800
292	5	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,000
293	5	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,800
233	6	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,960
240	6	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,900
273	6	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,950
280	6	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,950

27	7	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,000
31	8	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,080
260	9	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
263	9	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
264	9	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
275	9	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
276	9	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
63	10	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
245	10	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
250	10	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
277	10	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
278	10	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
317	11	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,300
603	11	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,000
922	11	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,300
923	11	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,300
285	18	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,600
281	19	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,700
119	20	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,800
283	21	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,750
282	22	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,750
235	23	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,400
237	23	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,550
238	23	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,400
266	24	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
271	24	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,850
272	24	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	1,000
704	33	Ag.Paraskies wall (KADET)	-	6,750	6,750	0,720

Πίνακας 4.22. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας (υφιστάμενος φορέας).

Φορτία

Τα μόνιμα και κινητά φορτία που ελήφθησαν υπόψη δίνονται στοω Πίνακα 4.23 (ενότητα 4.9). Στο προσομοίωμα, η κατανομή μάζας και φορτίων ανά στάθμη ορίζεται σύμφωνα με τα εξής: CDM — δυναμική κατανομή της μάζας· C — συγκεντρωμένο [kN]· L — γραμμικό [kN/m].

Δάπεδα

No.	Θέση	Gk1 [kN/m²]	Gk2 [kN/m²]	Qk [kN/m²]	Κύρια μεταβλητή δράση	φ	ψ0	ψ2
1	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	9,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

Θόλοι

No.	Θέση	Gk1 [kN/m²]	Gk2 [kN/m²]	Qk [kN/m²]	Κύρια μεταβλητή δράση	φ	ψ0	ψ2
2	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
3	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
4	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
14	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	16,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
23	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	4,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
24	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	4,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
5	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
6	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
1	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
25	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
26	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

27	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
28	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

Πίνακας 4.23. Φορτία μοντέλου (δάπεδα και θόλοι). Gk: μόνιμα, Qk: κινητά· φ, ψ0, ψ2 συντελεστές συνδυασμού.

Φάσμα σεναρίου — Αντισεισμικός Κανονισμός 1959

Ως στάθμη επιτελεστικότητας ορίζεται οι «**Σημαντικές Βλάβες**» (**Β**). Σύμφωνα με το Παράρτημα 2.1 του ΚΑΔΕΤ (ΦΕΚ 2493/Β/2023), για κτήρια σπουδαιότητας ΣΙΙΙ προβλέπεται σεισμική κλάση «**Β**» για στάθμη επιτελεστικότητας **«B_1»,** συμπληρωματικά, η αποτίμηση γίνεται και για τη στάθμη (**Γ**) «**Οιονεί Κατάρρευση**» με στόχο τη σεισμική κλάση «$Γ_1$».

$\alpha_g / \alpha_{g,ref}$	Στάθμη Επιτελεστικότητας Φέροντος Οργανισμού		
	Α «Περιορισμένες Βλάβες»	Β «Σημαντικές Βλάβες»	Γ «Οιονεί Κατάρρευση»
1.80	**A0**	**B0**	**Γ0**
1.30	**A1+**	**B1+**	**Γ1+**
1.00	**A1**	**B1**	**Γ1**
0.75	**A2+**	**B2+**	**Γ2+**
0.60	**A2**	**B2**	**Γ2**
0.45	**A3+**	**B3+**	**Γ3+**
0.35	**A3**	**B3**	**Γ3**
0.25	**A4+**	**B4+**	**Γ4+**
<0.25	**A4**	**B4**	**Γ4**

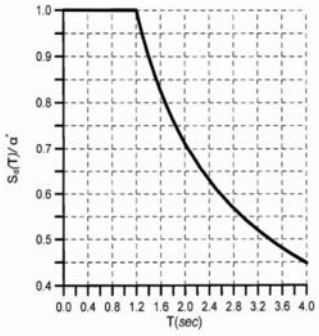
Πίνακας 4.24. Στάθμη επιτελεστικότητας.

Κατηγορία Σπουδαιότητας	Ελάχιστοι Ανεκτοί Στόχοι
I	Γ2
II	Γ1
III	B1
IV	B1 και A2 (Ικανοποίηση **και** των δύο στόχων)

Σε κάθε περίπτωση να θεωρηθεί ότι ισχύει A1>A2, B1>B2, Γ1>Γ2, A1>B1>Γ1 και A2>B2>Γ2

Πίνακας 4.25. Κατηγορία σπουδαιότητας.

Επιλέγεται ανηγμένη οριζόντια επιτάχυνση *a/g = 0,32*. Καθώς εφαρμόζονται μη-γραμμικές μέθοδοι και το κτίριο



$$S_d(T) = \begin{cases} a^*, & 0 \le T \le 1.2\text{sec} \\ a^*\left(\dfrac{1.2}{T}\right)^k, & T > 1.2\text{sec} \end{cases}$$

όπου $k = 2/3$

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: I (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		0.04	0.06	0.08	0.12	0.16
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.09	0.11	0.14	0.21	0.28
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.12	0.16	0.21	0.32	0.34
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: II (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		≤0.06	0.08	0.12	0.16	
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.14	0.14	0.21	0.28	
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.18	0.21	0.32	0.34	
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: III (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		≤0.08	0.12	0.16		
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.21	0.21	0.28		
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.28	0.32	0.34		

είναι προ του 1985, οι τεταγμένες του φάσματος σχεδιασμού πολλαπλασιάζονται με *1,50*, οπότε το σεισμικό φορτίο αντιστοιχεί σε *ag = 0,32 × 1,50 = 0,48g*.

Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	**Σεισμική κλάση**	**Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού**	**$a_g/a_{g,ref}$**	**Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης**
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,48g	1,00	0,48g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,48g

Πίνακας 4.26. Επιτάχυνση — μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover).

Από την ελαστική ανάλυση (όπως περιγράφηκε ανωτέρω κατά Σπυράκο) υπολογίζονται οι καμπτικές ροπές, οι τέμνουσες και οι κύριες τιμές αντίστασης ανά στοιχείο. Στη συνέχεια εκτελείται η μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover), με προσδιορισμό της δυσμενέστερης κατάστασης ανά κατανομή δυνάμεων, διεύθυνση και τυχηματική εκκεντρότητα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα (αποδεκτή/απαιτούμενη επιτάχυνση) δίνονται στο Παράρτημα του κεφαλαίου.

Φάσμα σεναρίου — Ευρωκώδικας 8 (EC-8)

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται η αποτίμηση για το φάσμα του Ευρωκώδικα 8, με την ελαστική ανάλυση και την μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover) να ακολουθούν την προαναφερθείσα διαδικασία. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Παράρτημα του κεφαλαίου.

Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	**Σεισμική κλάση**	**Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού**	**$a_g/a_{g,ref}$**	**Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης**
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,24g	1,00	0,24g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,24g

agR (NC) [m/s2]	agR (SD) [m/s2]	Τύπος εδάφους	S	TB [s]	TC [s]	TD [s]	I
2,40	2,40	C	1,15	0,20	0,60	2,50	1,00

Πίνακας 4.27. Ανάλυση μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover) — φάσμα EC-8

4.10.2 Αποτίμηση ενισχυμένου φορέα

Για τη βελτίωση της απόκρισης του ναού, συνολικά και τοπικά, εφαρμόστηκαν οι εξής επεμβάσεις: βαθύ αρμολόγημα αμφίπλευρα (5 cm ανά πλευρά, νέο κονίαμα θλιπτικής αντοχής 5 MPa), ενέματα ομογενοποίησης με κονίαμα υδραυλικής ασβέστου, σύστημα ανόργανης μήτρας με αμφίπλευρα δομικά πλέγματα δύο διευθύνσεων από ίνες βασάλτη και ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 (Geosteel Grid 400) και κονίαμα υδραυλικής ασβέστου M15 (Geocalce F Antisismico, Kerakoll), ελκυστήρες σε κατάλληλες θέσεις για ενιαία απόκριση και περιορισμό των τοπικών μηχανισμών· και ενίσχυση των θόλων με ενέματα και ανόργανη μήτρα. Τα προκύπτοντα μηχανικά χαρακτηριστικά δίνονται παρακάτω:

Θλιπτική Αντοχή Κονιάματος

$f_{mc,f}=$ $f_{j\delta} + f_{mc,0}(1-\delta) = 5{,}00 * 0{,}125 + 1{,}00 * (1 - 0{,}125) = 0{,}625 + 0{,}875 = 1{,}50\ Mpa$

Θλιπτική Αντοχή τοιχοποιίας

$f_{wc,f}=\xi\left[\left\{\frac{2}{3}\sqrt{f_{bc}} - f_0\right\} + \lambda f_{mc}\right] = 1{,}00 * [\left(\frac{2}{3} * \sqrt{16{,}03} - 1{,}5\right) + 0{,}5 * 1{,}50] = 1{,}92\ Mpa$

$f_{wc,f}<1{,}30\ f_{wc,0}$, *οπότε* $f_{wc,f}=1{,}92\ MPa$

Εφαρμογή Ενεμάτων (ομογενοποίηση) με χρήση κονιάματος υδραυλικής άσβεστου

Σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ:

Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μετά την ομογενοποίηση μπορεί να υπολογίζεται ως εξής:

$f_{wc,fII}=$ $f_{w,f} + \Delta f_0 + \lambda n f_{grc} = 1{,}92 + \frac{f_0}{1+\frac{1}{10n}} + 0{,}50 * 0{,}167 * 15 = 1{,}92 + \frac{1{,}5}{1+0{,}599} + 1{,}25 = 4{,}11 MPa > 1{,}5 f_{wc,f} = 2{,}88\ Mpa$, οπότε η τελική θλιπτική αντοχή σύμφωνα με ΚΑΔΕΤ είναι ίση $f_{wc,fII}=2{,}88\ MPa$

Το μέτρο Ελαστικότητας υπολογίζεται ως εξής:

$E_{wc}= 1300\cdot(1-\frac{f_{wc,fII}}{5})\ f_{wc,fII} \pm 140 f_{wc,fII}^2 = 1300\cdot(0{,}576)\cdot 2{,}88 + 140\cdot 8{,}29 \approx 2.749{,}00\ MPa$

$G_{wc,fII} \approx 0{,}40 \cdot E_{wc,fII} = 1.100{,}00\ MPa$

Ενισχυμένο χαρακτηριστικό	Τιμή
Θλιπτική αντοχή μετά βαθύ αρμολόγημα $f_{_wc,f}$	1,92 MPa
Θλιπτική αντοχή μετά ενέματα $f_{_wc,fII}$	2,88 MPa
Μέτρο ελαστικότητας $E_{_wc,fII}$	≈ 1,10 GPa

Πίνακας 4.28. Μηχανικά χαρακτηριστικά ενισχυμένης τοιχοποιίας.

No.	Τοίχοι	Υλικό	Ενίσχυση	Υψόμετρο [m]	Απόλυτο Ύψος [m]	Πάχος [m]
258	2	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
267	2	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,620
268	2	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
290	2	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
291	2	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,500
294	3	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,500
295	3	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,500
297	3	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,460

298	3	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,860
299	3	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,460
254	4	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
269	4	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,620
270	4	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
288	4	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
289	4	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,620
286	5	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,800
292	5	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,000
293	5	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,800
233	6	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,960
240	6	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,900
273	6	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,950
280	6	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,950
27	7	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,000
31	8	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,080
260	9	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
263	9	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
264	9	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
275	9	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
276	9	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
63	10	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
245	10	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
250	10	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
277	10	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
278	10	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
317	11	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,300
603	11	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,000
922	11	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,300
923	11	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,300

285	18	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,600
281	19	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,700
119	20	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,800
283	21	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,750
282	22	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,750
235	23	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,400
237	23	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,550
238	23	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,400
266	24	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
271	24	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,850
272	24	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	1,000
704	33	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Geosteel Grid 400	6,750	6,750	0,720

Πίνακας 4.29. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενισχυμένου μοντέλου.

No.	Θέση	Gk1 [kN/m²]	Gk2 [kN/m²]	Qk [kN/m²]	Κύρια μεταβλητή δράση	φ	ψ0	ψ2
1	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	9,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

No.	Θέση	Gk1 [kN/m²]	Gk2 [kN/m²]	Qk [kN/m²]	Κύρια μεταβλητή δράση	φ	ψ0	ψ2
1	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
25	Στάθμη 2 (+6,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
26	Στάθμη 2 (+6,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
27	Στάθμη 2 (+6,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
28	Στάθμη 2 (+6,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
2	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
3	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
4	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
14	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	17,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
23	Στάθμη 1 (+9,750 [m])	5,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
24	Στάθμη 1 (+9,750 [m])	5,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
5	Στάθμη 1 (+9,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
6	Στάθμη 1 (+9,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

Πίνακας 4.30. Φορτία και στάθμες ενισχυμένου μοντέλου

Φάσμα σεναρίου — Αντισεισμικός Κανονισμός 1959

Οι παραδοχές και ο στόχος αποτίμησης παραμένουν ίδιοι (στάθμη «**B₁**», συμπληρωματικά **Γ₁**, *ag = 0,48g*). Η ελαστική ανάλυση και η μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover) ακολουθούν την προαναφερθείσα διαδικασία και τα αποτελέσματα δίνονται στο Παράρτημα του κεφαλαίου.

Παράμετρος	Τιμή
Στάθμη επιτελεστικότητας (στόχος)	B1 συμπληρωματικά Γ1

Πίνακας 4.31. Στάθμη επιτελεστικότητας / ανεκτοί στόχοι

Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	Σεισμική κλάση	Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού	$a_g/a_{g,ref}$	Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,48g	1,00	0,48g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,48g

Πίνακας 4.32. Ανάλυση μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover) — ενισχυμένος, 1959

Φάσμα σεναρίου — Ευρωκώδικας 8 (EC-8)

Αντίστοιχα εκτελείται η αποτίμηση του ενισχυμένου φορέα για το φάσμα του Ευρωκώδικα 8. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 4.33 και η ανάλυση pushover στον Πίνακα 4.34 και τα αποτελέσματα δίνονται στο Παράρτημα του κεφαλαίου.

Ενισχυμένο χαρακτηριστικό (EC-8)	Τιμή
Θλιπτική αντοχή $f_{wc,fII}$	2,88 MPa
Μέτρο ελαστικότητας $E_{wc,fII}$	≈ 1,10 GPa

Πίνακας 4.33. Μηχανικά χαρακτηριστικά ενισχυμένου φορέα (Ευρωκώδικας 8).

Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	Σεισμική κλάση	Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού	$a_g/a_{g,ref}$	Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,24g	1,00	0,24g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,24g

Πίνακας 4.34.Ανάλυση μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover) — ενισχυμένος, EC-8.

4.11 Έλεγχος τοπικών μηχανισμών (κινηματική ανάλυση)

Πέρα από την καθολική αποτίμηση με μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover), σε κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία απαιτείται και ο έλεγχος των τοπικών μηχανισμών εκτός επιπέδου. Οι μηχανισμοί αυτοί αποκτούν σημασία όταν δεν είναι εξασφαλισμένη η συνολική, «κιβωτιοειδής» συμπεριφορά του κτιρίου, λόγω ανεπαρκών συνδέσεων είτε μεταξύ ορθογώνιων τοίχων είτε μεταξύ των δαπέδων και των τοίχων. Όπως επισημαίνει ο Σπυράκος (2019), η ανάπτυξη τοπικών μηχανισμών αστοχίας μπορεί να προκληθεί από σημαντικά ασθενέστερη σεισμική διέγερση από εκείνη που απαιτείται για τον σχηματισμό μηχανισμού εντός επιπέδου, γεγονός που καθιστά τον έλεγχό τους κρίσιμο.

Προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι στο υπό ανάλυση κτίριο, κρίθηκε σκόπιμο να εκτελεστεί η ανάλυση ανάπτυξης πιθανών τοπικών μηχανισμών. Οι τμηματικές

καταρρεύσεις συμβαίνουν συχνά σε υφιστάμενα κτίρια από τοιχοποιία, λόγω απώλειας ισορροπίας τμημάτων των τοίχων που έλεγχος αυτών των μηχανισμών αποκτά σημασία εφόσον είναι εξασφαλισμένη μια ορισμένη μονολιθικότητα του τοίχου (δηλαδή αποφεύγονται οι κρίσιμες καταρρεύσεις λόγω αποσύνθεσης της τοιχοποιίας).

Μέθοδος ανάλυσης

Ο έλεγχος πραγματοποιείται με οριακή ανάλυση κατά την κινηματική προσέγγιση, η οποία στηρίζεται στην εκ των προτέρων ταυτοποίηση του μηχανισμού κατάρρευσης και στην αξιολόγηση της οριζόντιας δράσης που τον ενεργοποιεί. Οι πιθανοί μηχανισμοί επιλέγονται με βάση τη γνώση της σεισμικής συμπεριφοράς παρόμοιων, ήδη κατεστραμμένων κατασκευών και με βάση την παρουσία ρωγμών. Λαμβάνονται επιπλέον υπόψη η ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ των τοίχων, η υφή της τοιχοποιίας, η παρουσία ράβδων σύνδεσης (ελκυστήρων) και οι αλληλεπιδράσεις με άλλα στοιχεία της κατασκευής.

Για κάθε σημαντικό τοπικό μηχανισμό, η μέθοδος αρθρώνεται στα εξής βήματα:

- Παρακολούθηση του μετασχηματισμού ενός μέρους του κτιρίου, μέσω αναγνώρισης άκαμπτων σωμάτων (κινηματική αλυσίδα).
- Ορισμός των πιθανών επιπέδων θραύσης, ικανών να περιστρέφονται ή να ολισθαίνουν μεταξύ τους.
- Αξιολόγηση του πολλαπλασιαστή οριζόντιου φορτίου α_0 που ενεργοποιεί τον μηχανισμό, με χρήση της αρχής των δυνατών (εικονικών) έργων.
- Προσδιορισμός του φάσματος και της επιτάχυνσης ενεργοποίησης, ξεκινώντας από τον οριζόντιο πολλαπλασιαστή α_0.

Στη γραμμική κινηματική ανάλυση, με εφαρμογή της αρχής των δυνατών έργων, υπολογίζεται ο πολλαπλασιαστής α_0 των οριζόντιων φορτίων που ενεργοποιεί τον μηχανισμό, από τον οποίο προκύπτει η φασματική επιτάχυνση ενεργοποίησης. Ο μηχανισμός θεωρείται ότι αποτελείται από άκαμπτα σώματα (μακροστοιχεία), τα οποία διαχωρίζονται τόσο μεταξύ τους όσο και από την υπόλοιπη κατασκευή με ζώνες

ασυνέχειας και δύνανται να περιστρέφονται ή να ολισθαίνουν μεταξύ τους (Σπυράκος, 2019).

Στη μη-γραμμική κινηματική ανάλυση προσδιορίζεται η καμπύλη ικανότητας του τοπικού μηχανισμού, καθώς αυτός εξελίσσεται μέχρι την τοπική κατάρρευση: ο πολλαπλασιαστής α αξιολογείται όχι μόνο για την αρχική διαμόρφωση, αλλά και για τις διαδοχικές, τροποποιημένες διαμορφώσεις της κινηματικής αλυσίδας, ως συνάρτηση της μετατόπισης ενός σημείου ελέγχου το α μειώνεται προοδευτικά έως ότου μηδενιστεί.

Έλεγχος και οριακές καταστάσεις

Ο έλεγχος στις αντίστοιχες οριακές καταστάσεις πραγματοποιείται μέσω μη-γραμμικής κινηματικής ανάλυσης ως προς τη μετατόπιση. Για την οριακή κατάσταση οιονεί κατάρρευσης (Near Collapse, στάθμη επιτελεστικότητας «**Γ**»):

- όταν ο έλεγχος αφορά απομονωμένα στοιχεία ή τμήμα της κατασκευής που στηρίζεται ουσιαστικά στο έδαφος, η επιτυχία του ελέγχου παρέχεται από την ανισότητα:

$$\alpha_z \geq \alpha_z(z=0) = S_e(T=0) = \alpha_g$$

$$\alpha_z = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^x \cdot FC} \cdot q$$

- όταν ο τοπικός μηχανισμός επηρεάζει τμήμα του κτιρίου που βρίσκεται σε ορισμένο ύψος z (και όχι στο έδαφος), πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η απόλυτη επιτάχυνση στο ύψος αυτό γενικά ενισχύεται σε σχέση με τον έλεγχο που θα γινόταν αν ο τοίχος βρισκόταν στο έδαφος· η επιτυχία του ελέγχου παρέχεται από την ανισότητα

$$\alpha_z \geq \max(\alpha_z(z=0), \alpha_z \cdot (\mathrm{z}))$$

$$\alpha_z(z) = \sqrt{\sum \alpha_{3k}^2} \cdot (z)$$

$$\alpha_{zk}(z) = S_e(T_k \cdot \xi_\kappa) \cdot |\gamma_\kappa \cdot \Psi_\kappa(z)| \cdot \sqrt{1 + 0.0004 \cdot \xi_\kappa^2}$$

Επιτρέπεται να γίνεται χρήση μόνο της πρώτης κυρίαρχης ιδιομορφής ταλάντωσης για την κύρια διεύθυνση, οπότε θεωρείται k = 1

$$\alpha_z(z) = S_e(T_1 \cdot \xi_1) \cdot |\gamma_1 \cdot \Psi_1(z)| \cdot \sqrt{1 + 0.0004 \cdot \xi_1^2}$$

όπου:

- *Se(T, ξ): φάσμα ελαστικής απόκρισης στο έδαφος, αξιολογημένο για την ισοδύναμη περίοδο T και την ισοδύναμη απόσβεση ξ = 5% του εξεταζόμενου μη δομικού στοιχείου, εγκατάστασης ή τοπικού μηχανισμού·*
- *γ_k: k-οστός συντελεστής πραγματικής συμμετοχής της κατασκευής·*
- *ψk(z): τιμή της ιδιομορφής στο ύψος z, στη θέση του επιπέδου όπου βρίσκεται ο τοπικός μηχανισμός που ελέγχεται·*
- *$\alpha_{z,k}$: συνεισφορά της ιδιομορφής στη μέγιστη επιτάχυνση του ορόφου.*

Η καμπύλη πολλαπλασιαστή – μετατόπισης που προκύπτει από τη μη-γραμμική κινηματική ανάλυση μετατρέπεται στην καμπύλη επιτάχυνσης–μετατόπισης (a–d) του ισοδύναμου μη-γραμμικού μονοβάθμιου ταλαντωτή

$$\alpha_z = \frac{\alpha_0\,(d_k) \cdot g}{e^x \cdot FC}$$

$$d = d_k \frac{\sum_{k=1}^{N}(P_k + Q_k)\ \cdot S_{1/pQxk}}{d_{ek} \sum_{k=1}^{N}(P_k + Q_k)\ \cdot S_{pQxk}}$$

όπου:

- *P_k, Q_k: αντίστοιχα, το αποτέλεσμα των δυνάμεων βάρους που ασκούνται στο k-οστό μπλοκ (το ίδιο βάρος του μπλοκ στο κέντρο βάρους του, προσαυξημένο με τα άλλα*

μεταφερόμενα βάρη) και το αποτέλεσμα των δυνάμεων που δεν ασκούνται στο μπλοκ, αλλά των οποίων η μάζα δημιουργεί οριζόντια σεισμική δύναμη σε αυτό, καθώς δεν μεταδίδεται αποτελεσματικά σε άλλα μέρη του κτιρίου.

- *$\delta P_{y,k}$: η κατακόρυφη εικονική μετατόπιση του κέντρου βάρους του ίδιου βάρους Pk.*
- *$\delta Q_{x,k}$: η οριζόντια εικονική μετατόπιση του κέντρου βάρους των οριζόντιων δυνάμεων α(Pk + Qk) που δρουν στο k-οστό μπλοκ.*

Ο έλεγχος πραγματοποιείται προσδιορίζοντας, από την καμπύλη ικανότητας επιτάχυνσης–μετατόπισης (a–d), την οριακή φασματική μετατόπιση d_c, η οποία λαμβάνεται ως η μικρότερη από:

- το 40% της μετατόπισης d_0 για την οποία μηδενίζεται η εκτιμώμενη φασματική επιτάχυνση, σε καμπύλη ικανότητας όπου θεωρείται ότι δρουν μόνο δράσεις των οποίων η παρουσία επαληθεύεται μέχρι την κατάρρευση.
- ή τη μετατόπιση που αντιστοιχεί σε καταστάσεις με ρηγματώσεις στοιχείων σύνδεσης (π.χ. ελκυστήρων ή άλλων συνδέσεων) οι οποίες, ενώ δεν συνεπάγονται προβλήματα ισορροπίας, προκαλούν μείωση της ικανότητας ως προς την επιτάχυνση μεγαλύτερη από το 50% της μέγιστης τιμής.

Αφού καθοριστεί το κατώφλι μετατόπισης d_c, η αντίστοιχη τιμή επιτάχυνσης *a(dc)* λαμβάνεται από την καμπύλη *a–d*.

Η επαλήθευση σε μετατόπιση πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της απαίτησης μετατόπισης d_t που αντιστοιχεί στην επίτευξη της εν λόγω οριακής κατάστασης, για τον σκοπό αυτό αξιολογείται η χαρακτηριστική ισοδύναμη περίοδος της κατάστασης.

$$T = 1.68\pi\sqrt{\frac{d_c}{a(d_c)}}$$

Όταν ο τοπικός μηχανισμός βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους και ο έλεγχος γίνεται με χρήση σχετικού φάσματος, η απαίτηση d_t υπολογίζεται από το φάσμα απόκρισης ελαστικής μετατόπισης *Sde(T)*

$$d_t = S_e(T) \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

Για μηχανισμούς σε επίπεδο z του κτιρίου, γίνεται αναφορά στο φάσμα μετασχηματισμένο σε «κινούμενο» φάσμα ορόφου στο επίπεδο z

$$d_t = S_e(T, \xi, z) \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$S_{ez}(T,\xi,z) = \begin{cases} \dfrac{1.1\xi^{-0,5}\eta(\xi)a_z(z)}{1 + (1.1\xi^{-0,5}\eta(\xi) - 1)(1 - \frac{T}{0.8T_1})^{1.6}} \\ \dfrac{1.1\xi^{-0,5}\eta(\xi)a_z(z)}{1 + (1.1\xi^{-0,5}\eta(\xi) - 1)(\frac{T}{1.1T_1} - 1)^{1.6}} \end{cases}$$

δεδομένου ότι οι περίοδοι ενδιαφέροντος είναι γενικά μεγάλες, αρκεί να ληφθεί υπόψη μόνο ο πρώτος τρόπος ταλάντωσης (k = 1). Για την οριακή αυτή κατάσταση, η τιμή της απόσβεσης (ιξώδους) ορίζεται σε 8%.

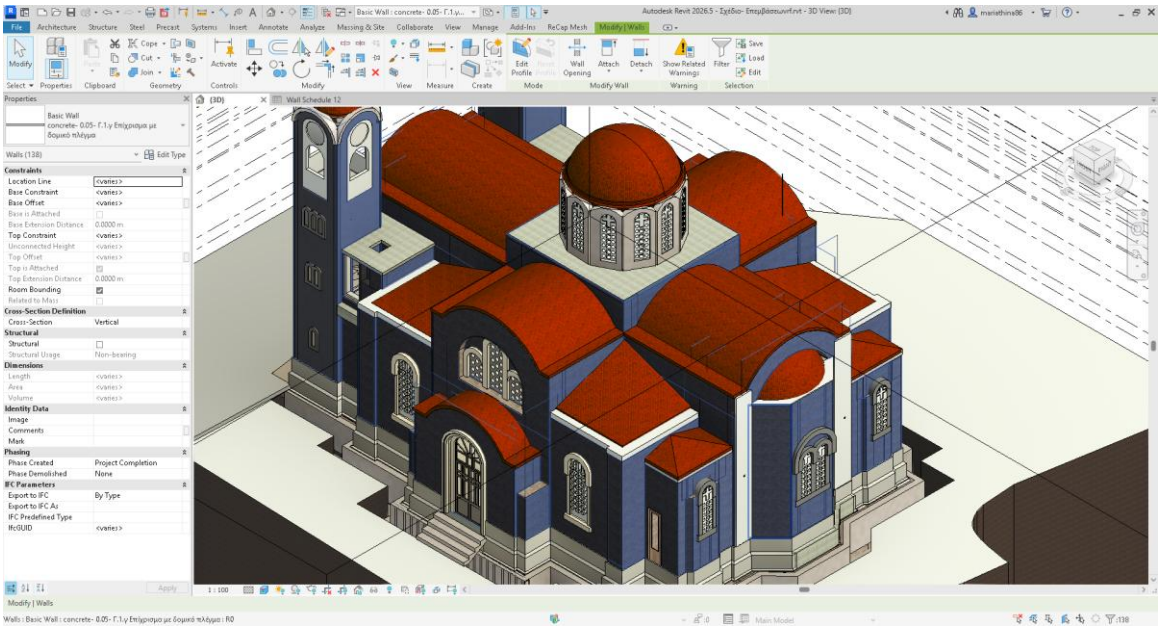
Η επαλήθευση ικανοποιείται όταν η ικανότητα σε μετατόπιση είναι μεγαλύτερη ή ίση της απαίτησης, $d_c \geq d_t$. Ισοδύναμα, από τον προσδιορισμό του d_t υπολογίζεται η επιτάχυνση εδάφους PGAc, η οποία συγκρίνεται με την επιτάχυνση αναφοράς PGAd (που αξιολογείται για τη δυνατότητα υπέρβασης της οριακής κατάστασης εντός της διάρκειας ζωής αναφοράς), όταν ο λόγος PGAc/PGAd είναι μεγαλύτερος της μονάδας, ο έλεγχος ικανοποιείται.

Στην περίπτωση του ναού εξετάστηκαν οι χαρακτηριστικοί μηχανισμοί εκτός επιπέδου (περιπτώσεις Α, Β και Γ), καθώς και μηχανισμοί εντός επιπέδου. Οι απόψεις των

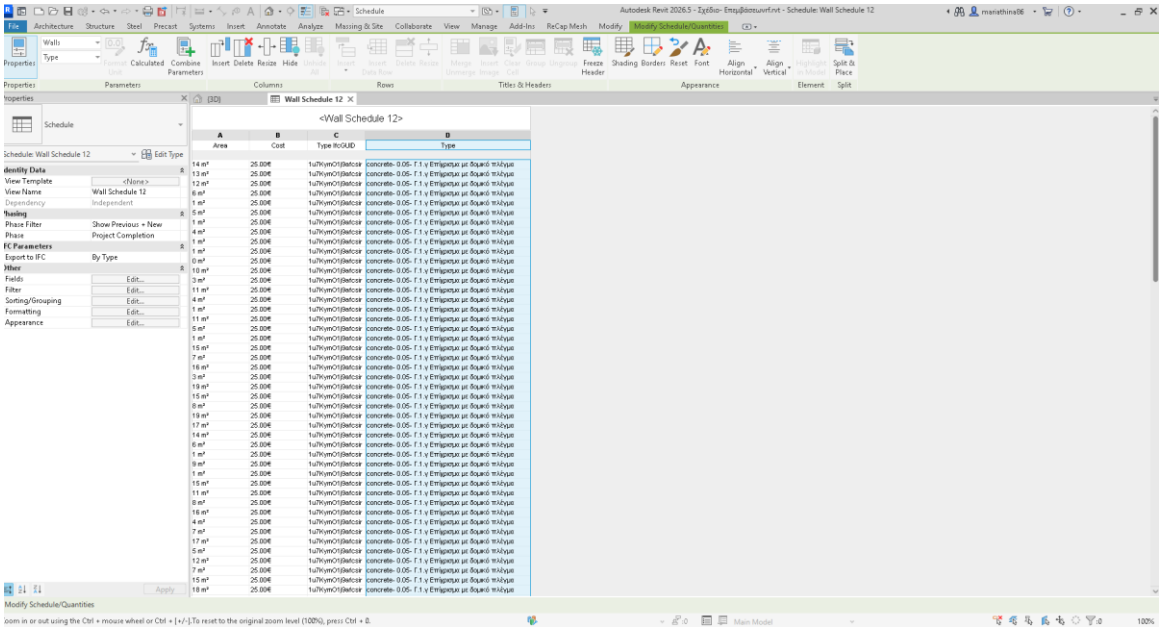
αντίστοιχων μοντέλων και τα αναλυτικά αποτελέσματα της κινηματικής ανάλυσης από το 3Muri παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.12 Σχέδιο επεμβάσεων και προϋπολογισμός

Οι επιφάνειες επέμβασης (π.χ. ενισχυμένο επίχρισμα) υπολογίστηκαν αυτόματα μέσω των Schedules του Revit και μεταφέρθηκαν στον πρότυπο προϋπολογισμό εργασιών επισκευής του ΔΑΕΦΚ. Η διαδικασία εξασφαλίζει άμεση και ανιχνεύσιμη σύνδεση του μοντέλου με τις ποσότητες και το κόστος, με ενιαία ονοματοδοσία των στοιχείων (βλ. Κεφ. 3).



Εικόνα 4.24. Τρισδιάστατο σχέδιο επεμβάσεων



Εικόνα 4.25. Πίνακες ποσοτήτων των επεμβάσεων και μεταφορά των εξαγόμενων επιφανειών στον πρότυπο προϋπολογισμό ΔΑΕΦΚ.

5. Εφαρμογή της ροής εργασίας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πρακτική εφαρμογή της ροής εργασίας BIM/HBIM που έχει περιγράφει στο Κεφάλαιο 3, στο συγκεκριμένο κτίριο της μελέτης περίπτωσης. Παρουσιάζονται, βήμα προς βήμα, τα ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα κάθε σταδίου, νέφος σημείων (point cloud), μοντέλο HBIM, καταγραφή βλαβών, προετοιμασία και μεταφορά στοιχείων για τη δομική ανάλυση, μοντελοποίηση επεμβάσεων και εξαγωγή ποσοτήτων και κόστους μαζί με τα αντίστοιχα στιγμιότυπα από τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν (Autodesk ReCap, Autodesk Revit και Λογισμικό δομικής ανάλυσης (3Muri)).

5.1 Νέφος σημείων και μοντελοποίηση στο Revit

5.1.1 Σάρωση με τον 3D σαρωτή FJD Trion P1

Ο FJD Trion P1 είναι ένας φορητός (χειρός) τρισδιάστατος σαρωτής LiDAR που στηρίζεται σε τεχνολογία SLAM. Πρόκειται για σαρωτή περίπου *1 kg*, ο οποίος δημιουργεί το νέφος σημείων (point cloud) καθώς ο χειριστής περπατά, χαρτογραφώντας τον χώρο από την ίδια την κίνηση, χωρίς σταθερή εγκατάσταση. Καταγράφει έως 200.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, με οπτικό πεδίο 360° × 59° και εμβέλεια σάρωσης έως 70 m (40 m σε ανακλαστικότητα 10% και 70 m σε ανακλαστικότητα 80%), με σχετική ακρίβεια της τάξης των 2 cm. Προαιρετική πανοραμική κάμερα αποδίδει και το χρώμα (RGB) στο νέφος σημείων (point cloud).

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ταυτόχρονη εντόπιση και χαρτογράφηση (SLAM): το όργανο εκτιμά συνεχώς τη θέση και τον προσανατολισμό του και, ταυτόχρονα, συρράπτει τις διαδοχικές σαρώσεις σε ένα ενιαίο νέφος. Επειδή δεν στηρίζεται σε GPS, λειτουργεί εξίσου σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, ακόμη και υπό άμεσο ηλιακό φως ή τη νύχτα. Το νέφος σημείων (point cloud) απεικονίζεται σε πραγματικό χρόνο μέσω ειδικής εφαρμογής, μαζί με τη διαδρομή του χειριστή, ώστε να αποφεύγεται η διπλή σάρωση και να διασφαλίζεται η πληρότητα της αποτύπωσης.

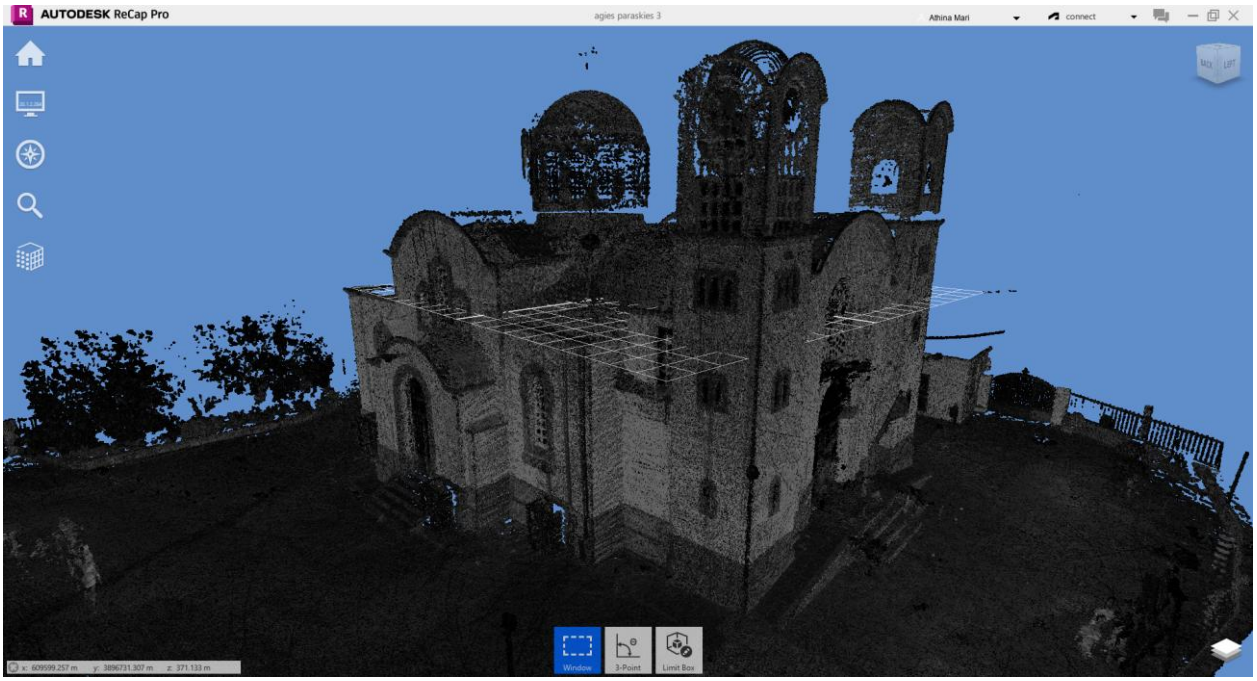
Στην πράξη, η τρισδιάστατη σάρωση του ναού εκτελέστηκε από την ΕΝΙΚ με συνεχή διαδρομή σάρωσης. Οι χειριστές της ΕΝΙΚ, κρατώντας τον σαρωτή, διέτρεξαν αργά και ομαλά τους εσωτερικούς χώρους (κυρίως ναό, κλίτη και ιερό) και περιμετρικά το κτίριο,

φροντίζοντας να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ διαδοχικών περασμάτων και να «κλείνει» η διαδρομή σε βρόχους (loop closure), για τον περιορισμό της συσσωρευτικής απόκλισης του SLAM. Η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο επέτρεπε τον άμεσο εντοπισμό και τη συμπλήρωση τυχόν κενών. Το αποτέλεσμα ήταν ένα πυκνό νέφος σημείων (point cloud) (αρχείο τύπου .laz), το οποίο παραδόθηκε στη φοιτήτρια. Στη συνέχεια, η φοιτήτρια πραγματοποίησε την εισαγωγή, τον καθαρισμό (αφαίρεση περιττών σημείων) και την ευθυγράμμιση του νέφους σημείων στο Autodesk ReCap Pro, προκειμένου να καταστεί κατάλληλο για τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας και της μοντελοποίησης.

Ο σαρωτής έχει, ωστόσο, εγγενείς περιορισμούς που καθόρισαν και τη στρατηγική αποτύπωσης. Ο κατασκευαστής αναφέρει ότι το όργανο δυσκολεύεται σε μεγάλες γυάλινες επιφάνειες (οι ανακλάσεις μπερδεύουν τον αισθητήρα), σε επαναλαμβανόμενες ή χωρίς χαρακτηριστικά δομές και σε ανοικτούς, «άδειους» χώρους, ενώ αποφεύγεται η σάρωση κοντά σε κινούμενα άτομα ή οχήματα. Για τον λόγο αυτό, οι όψεις και κυρίως η στέγη, σημεία υψηλά, με σύνθετη καμπύλη γεωμετρία (θόλοι, τρούλος) και δύσκολα προσβάσιμα, αποτυπώθηκαν συμπληρωματικά με φωτογραμμετρία και επιτόπου μετρήσεις, ώστε να καλυφθούν τα κενά της σάρωσης. Η φωτογραμμετρική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε από τη φοιτήτρια μέσω λήψεων από μη επανδρωμένο αεροσκάφος (drone), παρέχοντας συμπληρωματικά γεωμετρικά δεδομένα για τις εξωτερικές επιφάνειες και τη στέγη του ναού.

Καθοριστικό βήμα για την αξιοποίηση του νέφους ήταν ο ορισμός ενός κοινού συστήματος αναφοράς. Ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων ορίστηκε το κέντρο του τρούλου (x = 0), ενώ ως κατακόρυφη στάθμη αναφοράς λήφθηκε το y = 6,75 m, που αντιστοιχεί στη στάθμη γένεσης των θόλων (Στάθμη 1, +6,750 m). Η επιλογή αυτή δίνει ένα σαφές, γεωμετρικά αναγνωρίσιμο σημείο αναφοράς για ολόκληρη τη ροή εργασίας: το ίδιο σύστημα συντεταγμένων διατηρείται κατά τη μοντελοποίηση στο Revit, την καταγραφή των βλαβών και τη μεταφορά του φορέα στο Λογισμικό δομικής ανάλυσης (3Muri), εξασφαλίζοντας τη συνέπεια και την ανιχνευσιμότητα των δεδομένων σε όλα τα επόμενα

στάδια.



Εικόνα 5.1. Νέφος σημείων του ναού στο ReCap Pro μετά τον καθαρισμό και την ευθυγράμμιση, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως γεωμετρικό υπόβαθρο για τη μοντελοποίηση HBIM.

5.1.2 Φωτογραμμετρική αποτύπωση με drone

Η φωτογραμμετρία είναι η επιστήμη και τεχνική εξαγωγής αξιόπιστων, τρισδιάστατων πληροφοριών, μετρήσεων και μοντέλων από δισδιάστατες, επικαλυπτόμενες φωτογραφίες. Με λήψεις από μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV/drone) και επεξεργασία σε κατάλληλο λογισμικό, παράγονται ορθοφωτογραφίες, ψηφιακά μοντέλα επιφανείας, τρισδιάστατα πλέγματα (meshes) και νέφη σημείων.

Στην παρούσα εργασία, η φωτογραμμετρική αποτύπωση με drone πραγματοποιήθηκε από τη φοιτήτρια, συμπληρωματικά της τρισδιάστατης σάρωσης, για την αποτύπωση των εξωτερικών επιφανειών και κυρίως της στέγης (θόλοι, τρούλος). Πρόκειται για σημεία υψηλά και δύσκολα προσβάσιμα, τα οποία δεν ήταν ορατά ή δεν αποδίδονταν αξιόπιστα από το νέφος σημείων (point cloud) της σάρωσης και όπου η μέτρηση διαστάσεων με συμβατικά μέσα δεν ήταν εφικτή (π.χ. λόγω μεγάλου ύψους).

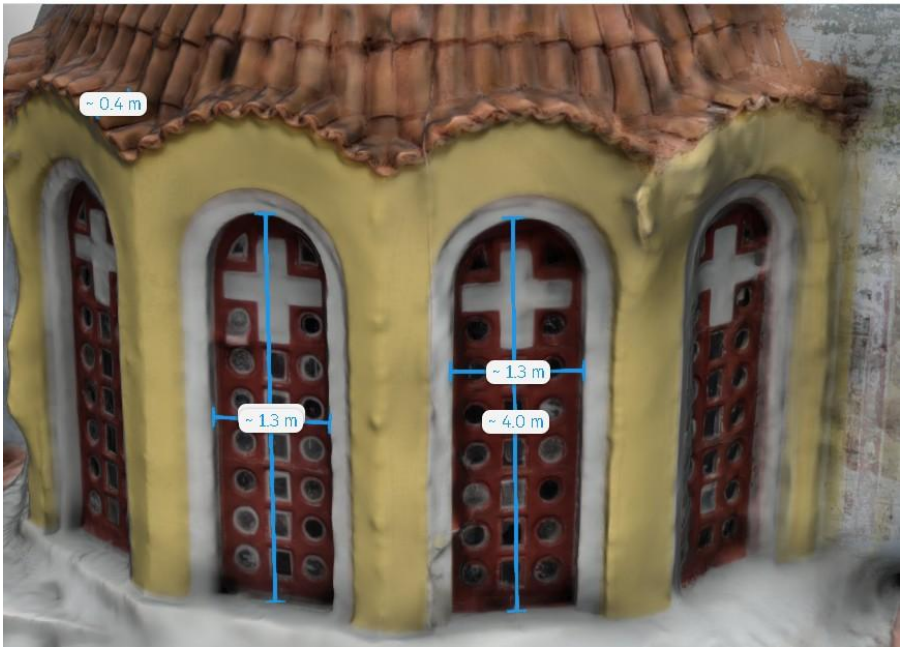
Οι φωτογραφίες κάθε επιφάνειας ελήφθησαν ανά περίπου ένα μέτρο, με σαρωτική κίνηση από την κατώτερη στάθμη του κτιρίου προς την ανώτερη και αντίστροφα, ώστε να μην παραμείνει καμία επιφάνεια ακάλυπτη από φωτογραφικό υλικό και να εξασφαλιστεί επαρκής επικάλυψη μεταξύ διαδοχικών λήψεων, προϋπόθεση απαραίτητη για την αξιόπιστη φωτογραμμετρική ανακατασκευή.

Ο φωτισμός κατά τη φωτογράφιση επιδιώχθηκε να γίνει, ιδανικά, υπό συνθήκες σκιάς (συννεφιά), ώστε να αποφευχθούν εσφαλμένα αποτελέσματα από έντονες σκιάσεις που δημιουργούνται γύρω από το κτίριο υπό ηλιοφάνεια. Στη συνέχεια έγινε διαλογή των φωτογραφιών που αποτύπωσαν το κτίριο με τη μεγαλύτερη ακρίβεια, ώστε το τρισδιάστατο μοντέλο να προκύψει χωρίς ιδιαίτερα σφάλματα.

Επισημαίνεται ότι η παραγωγή νέφους σημείων από φωτογραμμετρία απαιτεί συνδρομή στο Autodesk ReCap Photo, η οποία δεν παρέχεται δωρεάν για εκπαιδευτική χρήση. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία το φωτογραμμετρικό υλικό δεν μετατράπηκε σε νέφος σημείων (point cloud), αλλά σε τρισδιάστατο πλέγμα (mesh) μορφής .fbx. Η επιλογή αυτή είχε ως πρακτική συνέπεια ότι το φωτογραμμετρικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε κυρίως ως γεωμετρικό υπόβαθρο οπτικοποίησης και μέτρησης, χωρίς να παρέχει τις δυνατότητες επεξεργασίας και διαχείρισης που προσφέρει ένα νέφος σημείων (point cloud), όπως η άμεση εξαγωγή τομών, η διαχείριση πυκνότητας σημείων ή η ολοκληρωμένη ενσωμάτωση σε διαδικασίες που βασίζονται σε δεδομένα σημειακής νέφωσης. Παρόλα αυτά, το παραγόμενο πλέγμα διατήρησε με επάρκεια τη γεωμετρία των αποτυπωμένων επιφανειών και επέτρεψε τη λήψη διαστάσεων και την τεκμηρίωση βλαβών σε περιοχές που δεν ήταν ορατές ή επαρκώς αποτυπωμένες στο νέφος σημείων (point cloud) της σάρωσης.

Το πλέγμα αυτό αξιοποιήθηκε για τη μέτρηση βλαβών και διαστάσεων σε σημεία που δεν ήταν ορατά από το νέφος σημείων (point cloud) της σάρωσης, όπως στη στέγη, στους θόλους, στον τρούλο και σε άλλα υψηλά ή δυσπρόσιτα τμήματα του μνημείου, λειτουργώντας συμπληρωματικά προς το νέφος σημείων (point cloud) που προέκυψε από την τρισδιάστατη σάρωση. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε συνδυαστική αξιοποίηση δύο διαφορετικών πηγών γεωμετρικών δεδομένων, καλύπτοντας τις ελλείψεις της καθεμίας και βελτιώνοντας τη συνολική πληρότητα της τεκμηρίωσης του ναού.

Εικόνα 5.2. Λήψη φωτογραφίας με drone



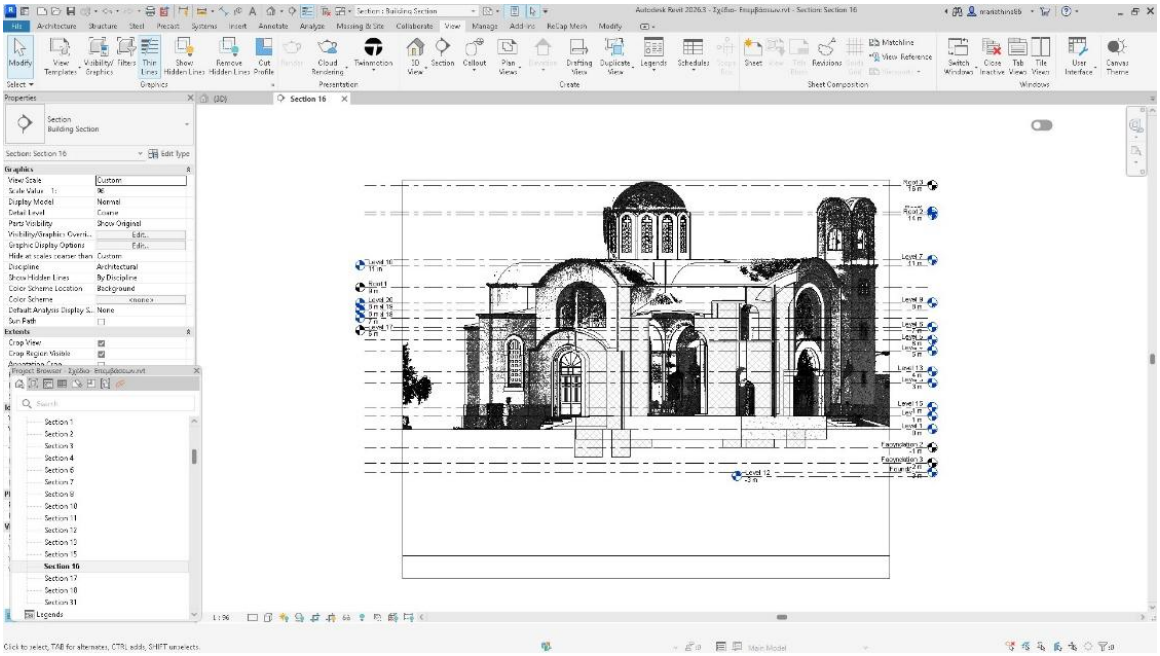
Εικόνα 5.3. Τρισδιάστατη φωτογραμμετρική (.fbx) απεικόνιση του τρούλου.

5.1.3 Επεξεργασία νέφους και μοντελοποίηση στο Revit

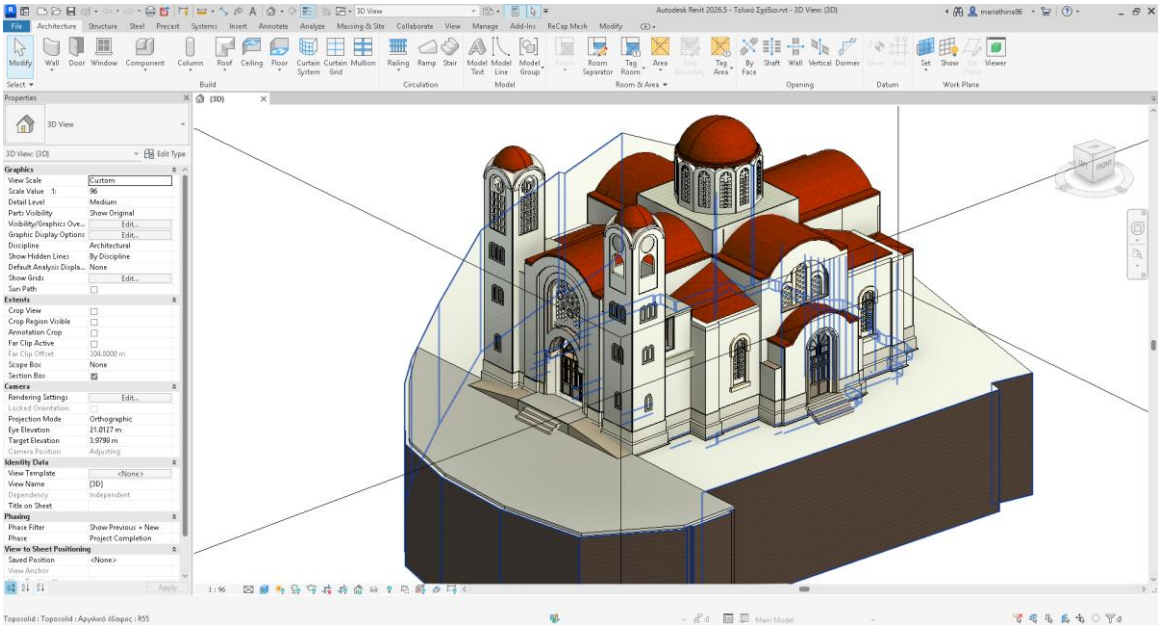
Το επεξεργασμένο νέφος σημείων (point cloud) της σάρωσης, σε μορφή ReCap (.rcp), εισήχθη στο Autodesk Revit ως υπόβαθρο, με το κοινό σύστημα αναφοράς που είχε οριστεί (αρχή x = 0 στο κέντρο του τρούλου, στάθμη y = 6,75 m). Πάνω στο νέφος, το κτίριο μοντελοποιήθηκε απευθείας σε τρισδιάστατη μορφή, χωρίς ενδιάμεση δισδιάστατη σχεδίαση. Στα σημεία όπου πυκνώνει το νέφος ορίζονταν τα γεωμετρικά όρια των δομικών στοιχείων, με διάκριση μεταξύ φερόντων στοιχείων (τοίχοι, πεσσοί, υπέρθυρα, θόλοι, τρούλος, κωδωνοστάσια) και μη φερόντων στοιχείων. Επειδή η σάρωση αποδίδει και εσωτερικά ή αφανή σημεία, κατέστη δυνατή η αναγνώριση μεταγενέστερων παρεμβάσεων και προηγούμενων ενισχύσεων, καθώς και ο διαχωρισμός διαφορετικών κατασκευαστικών φάσεων.

Η καμπύλη γεωμετρία της ανωδομής (θόλοι και τρούλος), καθώς και τα υψηλά ή μη ορατά σημεία που δεν αποδίδονταν αξιόπιστα από το νέφος της σάρωσης, μοντελοποιήθηκαν με τη βοήθεια του φωτογραμμετρικού πλέγματος (mesh,.fbx) και συμπληρωματικών επιτόπου μετρήσεων. Για τη μοντελοποίηση των καμπύλων επιφανειών υιοθετήθηκε η παραδοχή ότι οι γεωμετρικές μορφές των θόλων και του τρούλου μπορούν να προσεγγιστούν από ομαλές, συνεχείς επιφάνειες, οι οποίες περιγράφονται βάσει των κυρίαρχων γεωμετρικών χαρακτηριστικών που προέκυπταν από το φωτογραμμετρικό πλέγμα (mesh) και το νέφος σημείων (point cloud). Μικρές τοπικές ανωμαλίες, αποκλίσεις κατασκευής, φθορές ή παραμορφώσεις που παρατηρούνταν στις επιφάνειες δεν αποδόθηκαν πλήρως στη γεωμετρία του μοντέλου, αλλά θεωρήθηκαν δευτερεύουσες ως προς τον σκοπό της δομικής αποτίμησης και της τεκμηρίωσης του φορέα. Επιπλέον, σε περιοχές όπου η φωτογραμμετρική κάλυψη ή το νέφος σημείων (point cloud) παρουσίαζαν περιορισμένη πυκνότητα δεδομένων, η γεωμετρία συμπληρώθηκε με βάση τη συνέχεια των γειτονικών επιφανειών και τη μορφολογική συμμετρία των αντίστοιχων αρχιτεκτονικών στοιχείων. Το πλέγμα λειτούργησε ως οπτική και μετρητική αναφορά, επιτρέποντας την εκτίμηση διαστάσεων και την ανακατασκευή της γεωμετρίας σε θέσεις μη προσβάσιμες με συμβατικά μέσα.

Από το ολοκληρωμένο μοντέλο HBIM εξήχθησαν τα δισδιάστατα σχέδια (κατόψεις, όψεις και τομές) και, κατ' επέκταση, τα σχέδια βλαβών, τα οποία αξιοποιήθηκαν στα επόμενα στάδια της ροής εργασίας.



Εικόνα 5.4. Νέφος σημείων (point cloud) σε περιβάλλον Revit.



Εικόνα 5.5. Τρισδιάστατο μοντέλο HBIM του ναού στο Revit, το οποίο αναπτύχθηκε από το νέφος σημείων (point cloud)και χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την τεκμηρίωση βλαβών, την αναπαράσταση των επεμβάσεων και την εξαγωγή ποσοτήτων.

5.2 Τεκμηρίωση Βλαβών

Η καταγραφή των βλαβών σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο HBIM μπορεί, καταρχήν, να γίνει με την απευθείας αποτύπωσή τους πάνω στα ίδια τα δομικά στοιχεία του μοντέλου. Οι ρωγμές, οι αποκολλήσεις επιχρισμάτων, οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο και οι λοιπές φθορές μπορούν να αποδοθούν γεωμετρικά στη θέση τους και, ιδανικά, να κωδικοποιηθούν παραμετρικά ανά στοιχείο (τύπος, θέση, μέγεθος, βαθμός βλάβης), ώστε το μοντέλο να λειτουργεί ως ενιαία, δομημένη βάση πληροφορίας της βλάβης. Με τη βοήθεια των τομών του νέφους σημείων, η θέση και το εύρος κάθε ρωγμής μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από ό,τι σε ένα συμβατικό δισδιάστατο σχέδιο, ενώ η οπτικοποίηση των βλαβών στο τρισδιάστατο περιβάλλον διευκολύνει την εποπτεία και την τεκμηρίωσή τους.

Στην παρούσα εργασία, οι βλάβες τεκμηριώθηκαν με αξιοποίηση τομών του νέφους σημείων και δισδιάστατων αρχείων DWG που παρήχθησαν από το μοντέλο και τα δεδομένα αποτύπωσης. Η διαδικασία υποστήριξε τη μέτρηση, τη χαρτογράφηση και την ταξινόμηση των βλαβών ανά δομικό στοιχείο, χωρίς όμως πλήρη παραμετρική ενσωμάτωση των ρωγμών στο μοντέλο HBIM. Ο περιορισμός αυτός ήταν ιδιαίτερα εμφανής στις καμπύλες επιφάνειες των θόλων και του τρούλου, όπου η σύνθετη γεωμετρία δεν επέτρεψε την άμεση παραμετρική αποτύπωση των ρωγμών στο περιβάλλον του μοντέλου. Ως εκ τούτου, η τεκμηρίωση των βλαβών πραγματοποιήθηκε κυρίως σε δισδιάστατες όψεις και τομές, με υπόβαθρο το νέφος σημείων (point cloud) και το φωτογραμμετρικό μοντέλο.

Ο βαθμός βλάβης των φερόντων στοιχείων προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία εκτίμησης της απομένουσας φέρουσας ικανότητας που προβλέπεται στο Άρθρο 1, Ενότητα *Γ «Εκτίμηση της Απώλειας της Φέρουσας Ικανότητας» της ΚΤΙΡΙΑ-ΦΕΡΟΥΣΑ-ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ* (ΦΕΚ 2661 Β 2013). Αρχικά, κάθε κατακόρυφο φέρον στοιχείο ταξινομήθηκε σε τυπικό βαθμό βλάβης (Α, Β, Γ ή Δ) βάσει της μορφής και της έκτασης

των παρατηρούμενων βλαβών. Στη συνέχεια, σε κάθε στοιχείο αποδόθηκε η αντίστοιχη τιμή απομένουσας φέρουσας ικανότητας φ_i, ανάλογα με τον βαθμό βλάβης και την ηλικία της κατασκευής, σύμφωνα με τον Πίνακα 1 του Κανονισμού. Η απώλεια φέρουσας ικανότητας του στοιχείου υπολογίσθηκε από τη σχέση $\alpha_i = 1 - \varphi_i$.

όπου φ_i είναι η απομένουσα φέρουσα ικανότητα του στοιχείου ως ποσοστό της αρχικής του φέρουσας ικανότητας.

Για κάθε κύρια διεύθυνση του κτιρίου (x και y), η απομένουσα φέρουσα ικανότητα υπολογίσθηκε ως σταθμισμένος μέσος όρος των επιμέρους συντελεστών φ_i των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων της αντίστοιχης διεύθυνσης, με συντελεστή στάθμισης την επιφάνεια οριζόντιας τομής A_i κάθε στοιχείου:

$$\varphi_\chi = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varphi_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

και αντίστοιχα για την άλλη κύρια διεύθυνση:

$$\varphi_y = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varphi_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

όπου φ είναι η απομένουσα φέρουσα ικανότητα της εξεταζόμενης διεύθυνσης, φ_i η απομένουσα φέρουσα ικανότητα του μεμονωμένου στοιχείου, A_i η επιφάνεια οριζόντιας τομής του στοιχείου και n το πλήθος των κατακόρυφων στοιχείων της διεύθυνσης. Η εξίσωση εφαρμόστηκε ανεξάρτητα για τις δύο κύριες διευθύνσεις του φορέα, ώστε να προκύψουν οι συντελεστές φ_x και φ_y.

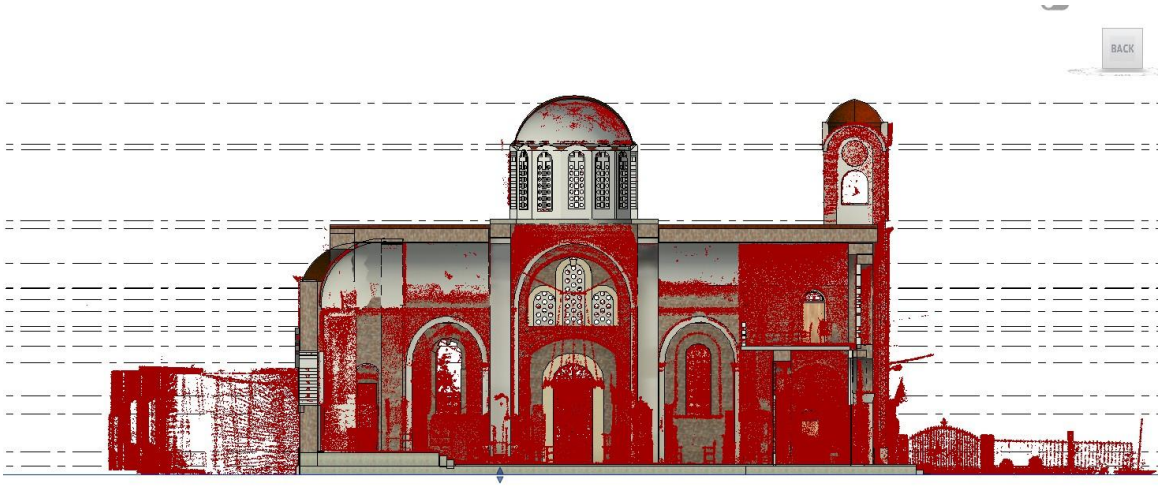
Οι συντελεστές απώλειας φέρουσας ικανότητας ανά διεύθυνση υπολογίσθηκαν από τις σχέσεις:

$$\alpha_\chi = 1 - \varphi_\chi$$

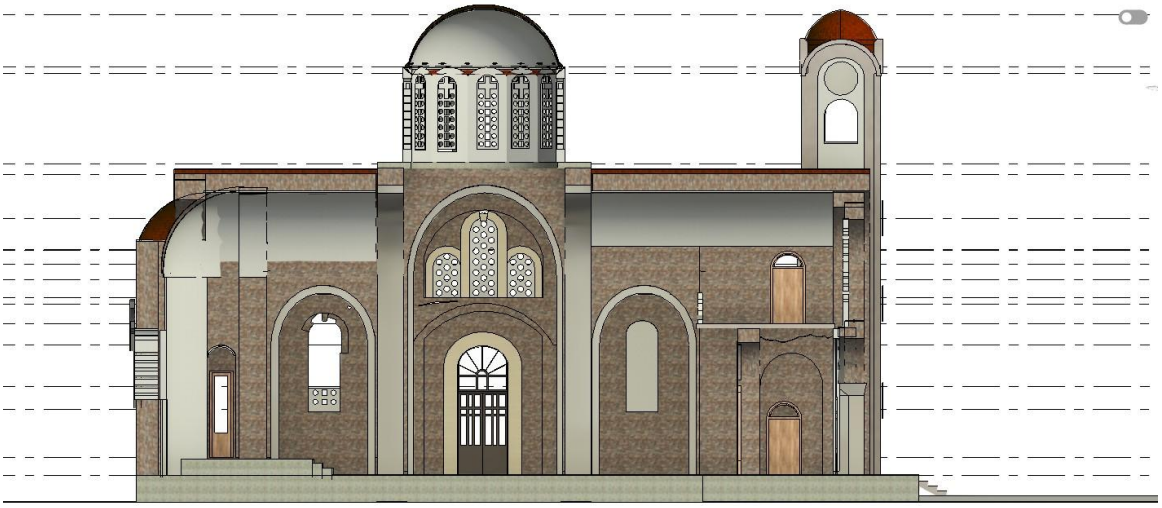
$$\alpha_y = 1 - \varphi_y$$

όπου α_x και α_y εκφράζουν το ποσοστό απώλειας της φέρουσας ικανότητας του φορέα κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για την ποσοτική αξιολόγηση της βλάβης και τη μετέπειτα δομική αποτίμηση του μνημείου. Η ανωτέρω διαδικασία ακολουθεί τη μεθοδολογία του *ΚΤΙΡΙΑ-ΦΕΡΟΥΣΑ-ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ* (ΦΕΚ 2661 Β 2013) *, Άρθρο 1, Ενότητα Γ «Εκτίμηση της Απώλειας της Φέρουσας Ικανότητας».*

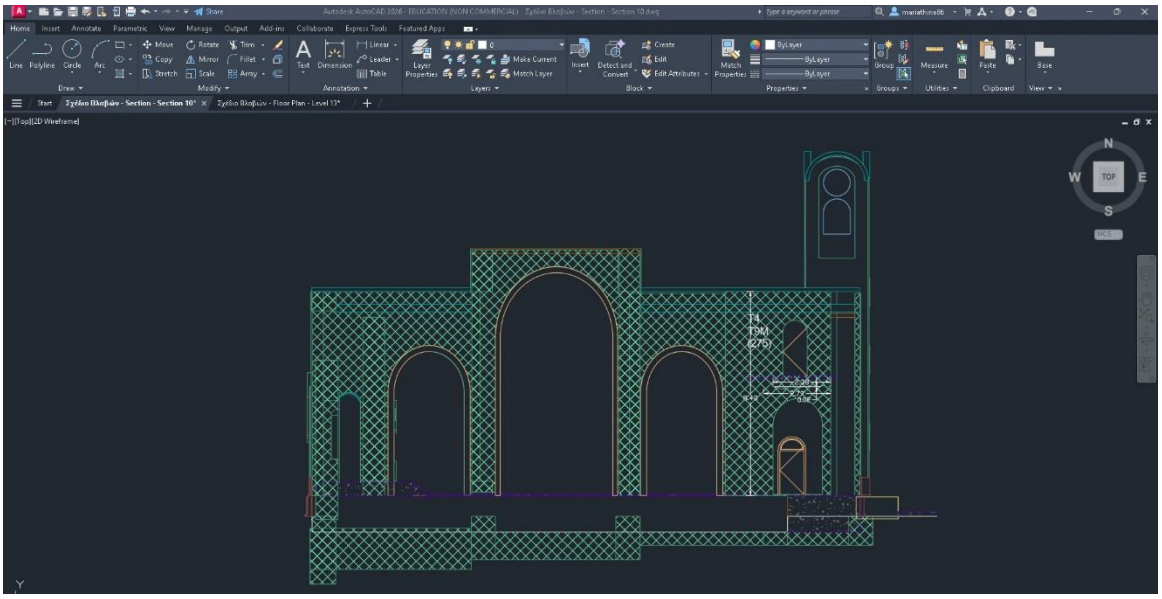
Το βασικό πλεονέκτημα που θα προσέφερε η πλήρης αξιοποίηση της τεχνολογίας BIM είναι ότι η πληροφορία των βλαβών θα μπορούσε να είναι ενσωματωμένη στο ίδιο το ψηφιακό μοντέλο και να μεταφέρεται απευθείας σε λογισμικό δομικής ανάλυσης. Στην περίπτωση αυτή, η αποτίμηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί πάνω στο ίδιο το μοντέλο HBIM, χωρίς ανάγκη επανακατασκευής του προσομοιώματος. Το βήμα αυτό δεν κατέστη δυνατό να επιδειχθεί στην παρούσα μελέτη, καθώς αξιοποιήθηκε η μελέτη της ΕΝΙΚ, η οποία εισήγαγε στο λογισμικό δομικής ανάλυσης 3Muri δικό του υπολογιστικό προσομοίωμα, βασισμένο στις παραδοχές και στα αποτελέσματα των διερευνητικών εργασιών. Κατά συνέπεια, η δομική αποτίμηση στηρίχθηκε σε ανεξάρτητο προσομοίωμα και όχι απευθείας στο μοντέλο HBIM με τις καταγεγραμμένες βλάβες. Η άμεση διασύνδεση μεταξύ μοντέλου HBIM, τεκμηρίωσης βλαβών και δομικής ανάλυσης παραμένει, επομένως, αντικείμενο μελλοντικής έρευνας και εφαρμογής.



Εικόνα 5.6. Τομή αποτύπωσης ρωγμών με το νέφος σημείων (point cloud).



Εικόνα 5.7. Τομή αποτύπωσης ρωγμών χωρίς το νέφος σημείων (point cloud).



· *Εικόνα 5.8. Σχέδια βλαβών σε DWG.*

5.3 Μεταφορά στοιχείων για δομική ανάλυση

Η μεταφορά του μοντέλου από το περιβάλλον μοντελοποίησης στο πρόγραμμα δομικής ανάλυσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του προτύπου IFC (Industry Foundation Classes), του ανοικτού και ουδέτερου προτύπου διαλειτουργικότητας που αναπτύσσεται από την building SMART International και αποτελεί το επίσημο πρότυπο ISO 16739 για το openBIM. Το IFC επιτρέπει την ανταλλαγή γεωμετρικών και σημασιολογικών

δεδομένων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών BIM, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή τους, διευκολύνοντας τη συνεργασία μεταξύ των επιμέρους ειδικοτήτων.

Στην περίπτωση της δομικής ανάλυσης κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας, το μοντέλο μπορεί να εξαχθεί από το Autodesk Revit σε μορφή IFC και να εισαχθεί σε εξειδικευμένο λογισμικό, όπως το 3Muri. Μέσω της διαδικασίας αυτής, γεωμετρικά χαρακτηριστικά και βασικές πληροφορίες των δομικών στοιχείων μεταφέρονται στο υπολογιστικό περιβάλλον, μειώνοντας την ανάγκη επαναδημιουργίας του προσομοιώματος.

Το πρότυπο IFC έχει εξελιχθεί σε διαδοχικές εκδόσεις. Η IFC2x3 αποτέλεσε την πρώτη ευρέως διαδεδομένη έκδοση, ενώ η IFC4 βελτίωσε σημαντικά τη γεωμετρική αναπαράσταση σύνθετων μορφών και την ανταλλαγή παραμετρικών δεδομένων. Η νεότερη έκδοση IFC4.3 επεκτείνει τις δυνατότητες γεωαναφοράς και υποδομών, ενώ η υπό ανάπτυξη IFC5 στοχεύει σε μια περισσότερο ευέλικτη αρχιτεκτονική δεδομένων, συμβατή με εφαρμογές Digital Twins, GIS και Internet of Things.

Συνοψίζοντας, η IFC2x3 αποτελεί μια ώριμη αλλά περιορισμένη έκδοση, η IFC4 προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη υποστήριξη σύνθετων γεωμετριών, όπως οι θόλοι και ο τρούλος του εξεταζόμενου μνημείου, ενώ η IFC5 εκφράζει τη μελλοντική κατεύθυνση της διαλειτουργικότητας BIM. Για τον λόγο αυτό, η IFC4 θεωρείται σήμερα η καταλληλότερη βάση για τη σύνδεση περιβαλλόντων HBIM με λογισμικά δομικής ανάλυσης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει τη δυνατότητα μεταφοράς ενός εμπλουτισμένου μοντέλου HBIM προς λογισμικά δομικής ανάλυσης μέσω IFC, έτσι ώστε η γεωμετρία, τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και ενδεχομένως η πληροφορία των βλαβών να μπορούν να αξιοποιούνται άμεσα κατά την ανάπτυξη του υπολογιστικού προσομοιώματος. Μια τέτοια διαδικασία θα περιόριζε τις επαναλαμβανόμενες εργασίες και θα εξασφάλιζε μεγαλύτερη συνέπεια μεταξύ τεκμηρίωσης και ανάλυσης.

Ωστόσο, στη μελέτη περίπτωσης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία η διαδικασία αυτή δεν εφαρμόστηκε στην πράξη. Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό 3Muri δεν προήλθε από εξαγωγή του μοντέλου HBIM μέσω IFC, αλλά είχε ήδη δημιουργηθεί ανεξάρτητα από τον στατικό μελετητή, με βάση τα διαθέσιμα σχέδια και τα αποτελέσματα των διερευνητικών εργασιών. Κατά συνέπεια, η διαδρομή Revit → IFC →

3Muri παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία ως μια τεχνολογικά εφικτή και ιδιαίτερα σημαντική δυνατότητα της μεθοδολογίας BIM, χωρίς όμως να αποτελεί τμήμα της εφαρμοσμένης διαδικασίας δομικής αποτίμησης του εξεταζόμενου μνημείου.

5.4 Δομική αποτίμηση και επεμβάσεις

Η διαλειτουργικότητα μεταξύ του περιβάλλοντος HBIM και των λογισμικών δομικής ανάλυσης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους της σύγχρονης έρευνας στον χώρο του BIM. Αν και η αυτόματη μεταφορά του μοντέλου μέσω IFC δεν εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη περίπτωσης, η ανάπτυξη του μοντέλου HBIM επέτρεψε τη συστηματική διαχείριση της γεωμετρικής και παθολογικής πληροφορίας του μνημείου. Με βάση αυτό το υπόβαθρο, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα κύρια αποτελέσματα της δομικής αποτίμησης και της μελέτης επεμβάσεων που εκπονήθηκαν από τον στατικό μελετητή και αξιοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση των επεμβάσεων στο περιβάλλον HBIM.

Η δομική αποτίμηση και η μελέτη των επεμβάσεων δεν εκπονήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά παραλήφθηκαν από τον στατικό μελετητή του έργου. Ειδικότερα, το υπολογιστικό προσομοίωμα, οι αναλύσεις και οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό 3Muri δεν τροφοδοτήθηκαν από το μοντέλο HBIM που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αλλά βασίστηκαν σε ανεξάρτητο προσομοίωμα το οποίο είχε ήδη δημιουργηθεί για τις ανάγκες της στατικής μελέτης.

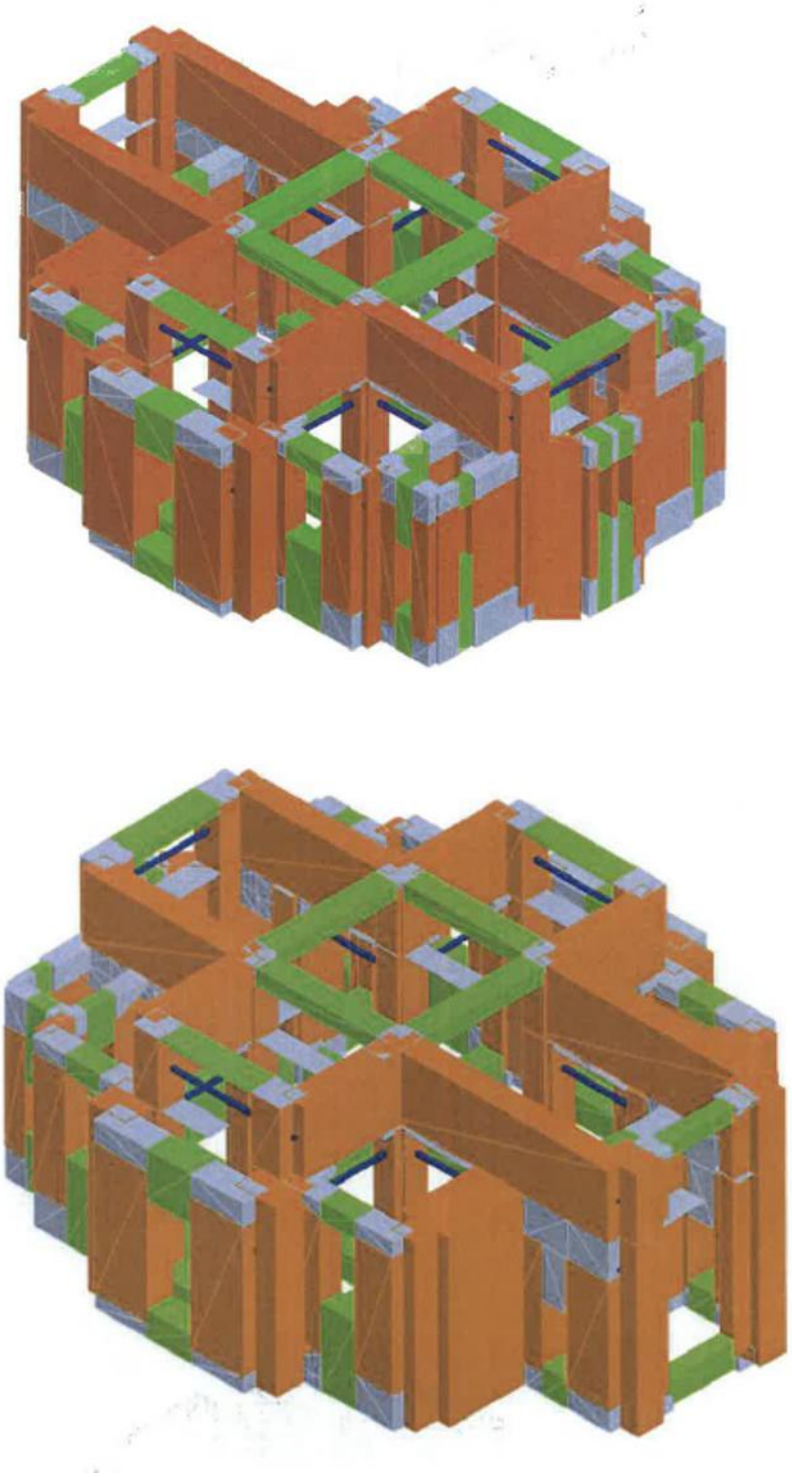
Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας αξιοποιήθηκαν τα κύρια αποτελέσματα της δομικής αποτίμησης αποκλειστικά για την τεκμηρίωση των απαιτούμενων επεμβάσεων, τη χωρική αναπαράστασή τους στο περιβάλλον HBIM και την εξαγωγή των αντίστοιχων ποσοτήτων. Για τον λόγο αυτό, το κύριο κείμενο επικεντρώνεται στη μεθοδολογία της αποτίμησης, στον επιδιωκόμενο στόχο επιτελεστικότητας, στα βασικά αποτελέσματα του υφιστάμενου και του ενισχυμένου φορέα και στη σύνδεσή τους με τις προτεινόμενες επεμβάσεις.

Οι αναλυτικοί υπολογισμοί, οι καμπύλες συμπεριφοράς, οι πίνακες ελέγχων και οι πλήρεις εκτυπώσεις του λογισμικού 3Muri παρατίθενται στο Παράρτημα, καθώς υπερβαίνουν τους στόχους της παρούσας εργασίας, η οποία εστιάζει πρωτίστως στην τεκμηρίωση, μοντελοποίηση και διαχείριση της πληροφορίας μέσω της προσέγγισης HBIM.

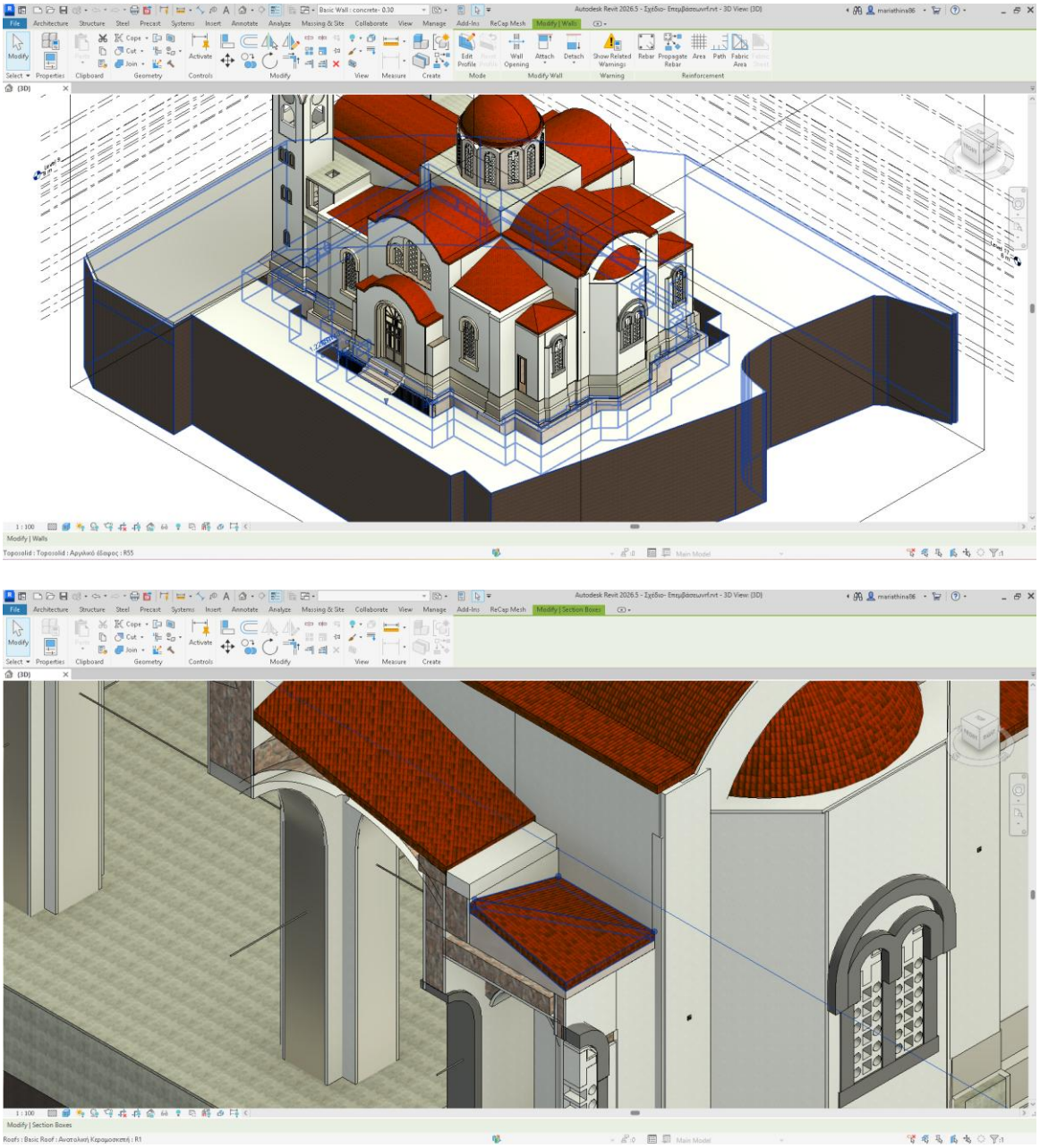
5.5 Μοντελοποίηση των επεμβάσεων

Μετά την αποτίμηση του υφιστάμενου φορέα, οι επεμβάσεις ενίσχυσης μοντελοποιούνται πάνω στο ίδιο μοντέλο, αντιστοιχισμένες στα συγκεκριμένα στοιχεία και στις επιφάνειες που αφορούν (βαθύ αρμολόγημα, ενέματα ομογενοποίησης, σύστημα ανόργανης μήτρας Geosteel Grid 400 / Geocalce F Antisismico της Kerakoll, ελκυστήρες και ενίσχυση των θόλων). Η μοντελοποίηση των επεμβάσεων στο περιβάλλον BIM προσφέρει δύο βασικά πλεονεκτήματα:

- **Μεταφορά στο στατικό μοντέλο.** Ο ενισχυμένος φορέας μπορεί να μεταφερθεί εκ νέου στο πρόγραμμα δομικής ανάλυσης, ώστε να αποτιμηθεί η βελτιωμένη απόκριση της κατασκευής και να επαληθευτεί η επάρκεια των επεμβάσεων. Έτσι, το ίδιο μοντέλο τροφοδοτεί με συνέπεια τόσο την αρχική αποτίμηση όσο και τον έλεγχο του ενισχυμένου φορέα, χωρίς εκ νέου σχεδίαση.
- **Εξαγωγή ποσοτήτων μέσω schedules.** Οι επιφάνειες και οι ποσότητες των επεμβάσεων (π.χ. εμβαδά ενισχυμένου επιχρίσματος, μήκη ελκυστήρων) υπολογίζονται αυτόματα μέσα από τη λειτουργία schedules του Revit. Ο πίνακας ποσοτήτων εξάγεται σε αρχείο και μεταφέρεται σε υπολογιστικό φύλλο (Excel), όπου συντάσσεται ο προϋπολογισμός σύμφωνα με το πρότυπο εργασιών επισκευής του ΔΑΕΦΚ. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται άμεση, ιχνηλάσιμη και επικαιροποιήσιμη σύνδεση του μοντέλου με τις ποσότητες και το κόστος αποκατάστασης.



· *Εικόνα 5.9. Ενισχυμένο μοντέλο τρισδιάστατο στο 3Muri.*



· *Εικόνα 5.10. Ενισχυμένο μοντέλο τρισδιάστατο σχέδιο επεμβάσεων.*

5.6 Ποσότητες και προϋπολογισμός

Η παραγωγή ποσοτήτων και η σύνδεσή τους με τον προϋπολογισμό των εργασιών αποκατάστασης αποτελεί ένα από τα πλέον άμεσα και πρακτικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας HBIM. Μέσω της παραμετρικής οργάνωσης των στοιχείων και των επεμβάσεων στο μοντέλο, κατέστη δυνατή η αυτόματη εξαγωγή γεωμετρικών

δεδομένων και η αξιοποίησή τους για τη σύνταξη του προϋπολογισμού εργασιών επισκευής.

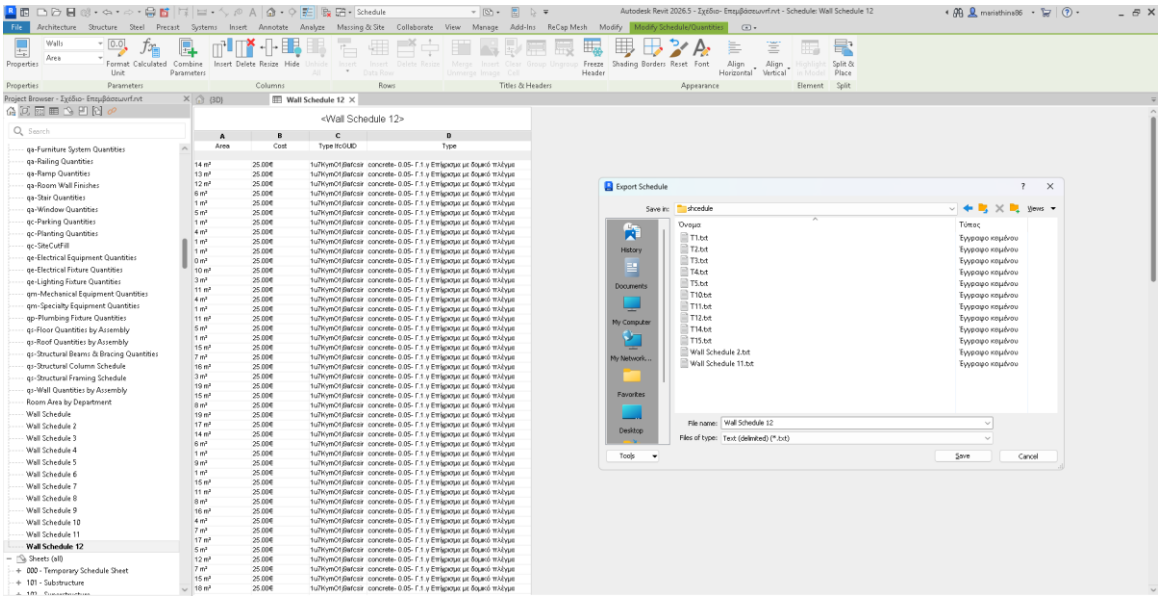
Στο περιβάλλον του Revit δημιουργήθηκαν πίνακες ποσοτήτων (Schedules) για τα δομικά στοιχεία και τις προβλεπόμενες επεμβάσεις. Ως παράδειγμα, για την επέμβαση εφαρμογής ενισχυμένου επιχρίσματος σε τοιχοποιία, το αντίστοιχο δομικό στοιχείο περιλάμβανε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και καταγραφόταν στον πίνακα ποσοτήτων μαζί με το μοναδικό αναγνωριστικό του, την ονομασία του στοιχείου και το συνολικό εμβαδόν επέμβασης. Από το Schedules εξαγόταν αυτόματα η επιφάνεια εφαρμογής (m^2), η οποία αποτελούσε τη βασική ποσότητα για τη σύνταξη του προϋπολογισμού.

Οι πίνακες ποσοτήτων εξήχθησαν από το Revit σε μορφή αρχείου κειμένου και στη συνέχεια εισήχθησαν σε υπολογιστικό φύλλο. Από το μοντέλο εξάγονταν αυτόματα στοιχεία όπως η ονομασία του στοιχείου, ο τύπος του στοιχείου, οι διαστάσεις του και τα αντίστοιχα εμβαδά ή μήκη που προέκυπταν από τη γεωμετρία του μοντέλου. Αντίθετα, η αντιστοίχιση των εξαγόμενων ποσοτήτων με τις αντίστοιχες εργασίες του πρότυπου προϋπολογισμού επισκευών του ΔΑΕΦΚ πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα στο υπολογιστικό φύλλο, όπως επίσης και η εισαγωγή των αντίστοιχων τιμών μονάδας και των περιγραφών των εργασιών.

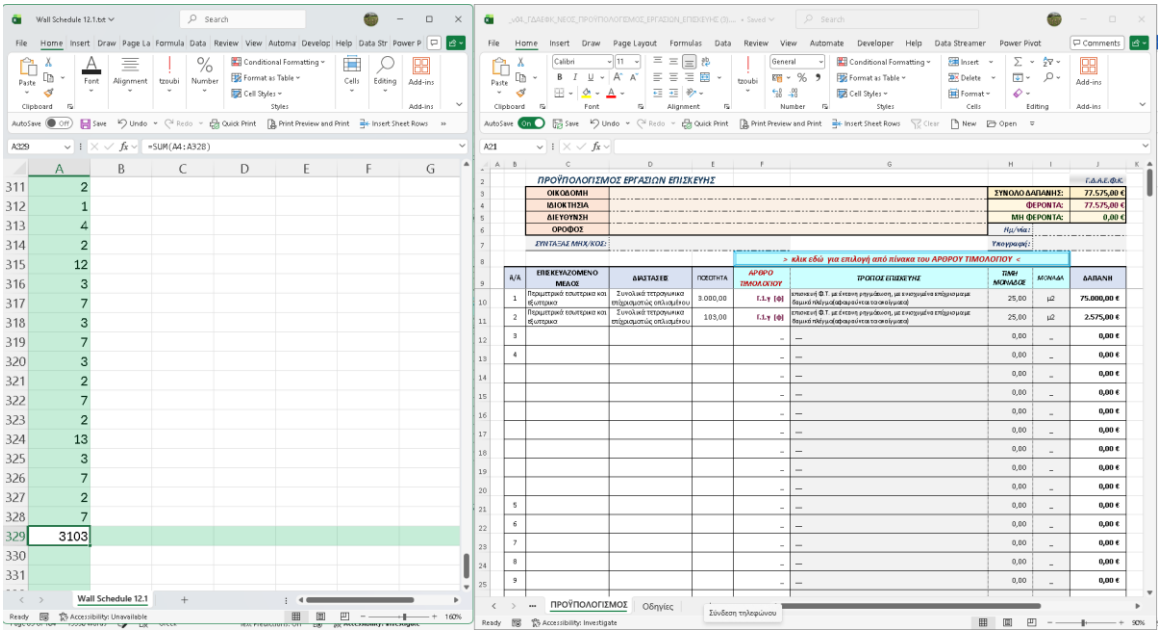
Στη συνέχεια, οι εξαγόμενες ποσότητες μεταφέρθηκαν στις αντίστοιχες γραμμές του πρότυπου προϋπολογισμού ΔΑΕΦΚ. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε σαφής συσχέτιση μεταξύ των επεμβάσεων που αποτυπώνονται στο μοντέλο, των ποσοτήτων που υπολογίζονται μέσω των Schedule και του τελικού προϋπολογισμού του έργου. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την ανιχνευσιμότητα των δεδομένων, καθώς κάθε ποσότητα μπορεί να αναχθεί στο αντίστοιχο στοιχείο και στην αντίστοιχη επέμβαση που περιλαμβάνεται στο μοντέλο.

Οι αλλαγές στο μοντέλο ενημερώνουν τις ποσότητες μέσω των Schedules και μπορούν, μετά από νέα εξαγωγή και αντίστοιχη ενημέρωση του υπολογιστικού φύλλου, να μεταφερθούν στον προϋπολογισμό ΔΑΕΦΚ. Κατά συνέπεια, η διαδικασία μειώνει τον κίνδυνο ασυμφωνιών μεταξύ σχεδίων, ποσοτήτων και προϋπολογισμού, χωρίς ωστόσο να

καταργεί την ανάγκη ελέγχου και αντιστοίχισης των ποσοτήτων από τον μελετητή.



· Εικόνα 5.11. Πίνακας ποσοτήτων (Wall Schedules) στο Revit, από τον οποίο εξάχθηκαν τα εμβαδά των επεμβάσεων για τη σύνταξη του προϋπολογισμού ΔΑΕΦΚ.



Εικόνα 5.12. Μεταφορά των εξαγόμενων ποσοτήτων από τους πίνακες ποσοτήτων του Revit στον πρότυπο προϋπολογισμό εργασιών επισκευής του ΔΑΕΦΚ.

6. Αποτελέσματα και αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης ροής εργασίας HBIM στον εξεταζόμενο ναό. Η παρουσίαση οργανώνεται με βάση τα παραδοτέα που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια της εργασίας, από τα δεδομένα αποτύπωσης και το μοντέλο HBIM έως την τεκμηρίωση των βλαβών, τη μοντελοποίηση των επεμβάσεων, την παραγωγή ποσοτήτων και τη σύνδεσή τους με τον προϋπολογισμό εργασιών επισκευής.

Παράλληλα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά αποτελέσματα της διερεύνησης και της δομικής αποτίμησης, αποκλειστικά στον βαθμό που αυτά τεκμηριώνουν τις αποφάσεις επέμβασης και τα αντίστοιχα παραδοτέα του μοντέλου. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί, οι πίνακες ελέγχων και τα πλήρη αποτελέσματα της στατικής μελέτης παρατίθενται στα προηγούμενα κεφάλαια και στο παράρτημα της εργασίας.

6.1 Ψηφιακά δεδομένα αποτύπωσης και μοντέλο HBIM

Από την εφαρμογή της προτεινόμενης ροής εργασίας παρήχθησαν τα πρωτογενή και δευτερογενή ψηφιακά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση και μοντελοποίηση του ναού. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν το νέφος σημείων (point cloud) που προέκυψε από την τρισδιάστατη σάρωση LiDAR, το φωτογραμμετρικό πλέγμα (mesh)(.fbx) των εξωτερικών επιφανειών και της στέγης, καθώς και το ολοκληρωμένο μοντέλο HBIM που αναπτύχθηκε στο Autodesk Revit.

Το μοντέλο HBIM οργανώνει σε ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μνημείου, τα δομικά στοιχεία, τις κατασκευαστικές φάσεις και τις πληροφορίες που προέκυψαν από την αποτύπωση. Το παραδοτέο αυτό αποτέλεσε τη βάση για την παραγωγή όλων των επόμενων αποτελεσμάτων της εργασίας.

6.2 Δισδιάστατα σχέδια και τεκμηρίωση των βλαβών

Από το μοντέλο HBIM εξήχθησαν οι απαιτούμενες κατόψεις, όψεις και τομές του μνημείου. Τα σχέδια αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση των βλαβών και την καταγραφή της παθολογίας του φορέα.

Η τεκμηρίωση των βλαβών πραγματοποιήθηκε με αξιοποίηση τομών του νέφους σημείων, του φωτογραμμετρικού πλέγματος και δισδιάστατων αρχείων DWG. Η διαδικασία επέτρεψε λεπτομερέστερη και χωρικά σαφέστερη τεκμηρίωση των βλαβών σε σχέση με τη συμβατική σχεδιαστική αποτύπωση, χωρίς όμως να πραγματοποιηθεί ποσοτική σύγκριση της ακρίβειας των δύο προσεγγίσεων.

Η καταγραφή των βλαβών οδήγησε στον υπολογισμό της απομένουσας φέρουσας ικανότητας του φορέα. Για τη διεύθυνση X προέκυψε $\varphi_x = 0,33$ και $\alpha_x = 0,67$, ενώ για τη διεύθυνση Y προέκυψε $\varphi_y = 0,41$ και $\alpha_y = 0,59$, γεγονός που κατέταξε τις βλάβες ως γενικού χαρακτήρα και στις δύο κύριες διευθύνσεις.

6.3 Μοντελοποιημένες επεμβάσεις

Με βάση την υφιστάμενη στατική μελέτη και τα αποτελέσματα της δομικής αποτίμησης που παραλήφθηκαν από τον στατικό μελετητή, αναπαραστάθηκαν στο περιβάλλον HBIM οι προβλεπόμενες επεμβάσεις αποκατάστασης και ενίσχυσης του μνημείου.

Οι επεμβάσεις περιλάμβαναν βαθύ αρμολόγημα, ενέματα ομογενοποίησης, εφαρμογή συστημάτων ανόργανης μήτρας, τοποθέτηση ελκυστήρων και επεμβάσεις ενίσχυσης των θόλων. Το ενισχυμένο μοντέλο αποτυπώνει χωρικά τη θέση και την έκταση κάθε επέμβασης και αποτέλεσε τη βάση για την παραγωγή ποσοτήτων.

Η δομική αποτίμηση και οι σχετικοί έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν ανεξάρτητα στο λογισμικό 3Muri από τον στατικό μελετητή και δεν προήλθαν από άμεση μεταφορά του μοντέλου HBIM μέσω IFC. Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν μόνο τα κύρια αποτελέσματα της μελέτης, τα οποία τεκμηριώνουν την επιλογή των επεμβάσεων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα.

6.4 Πίνακες ποσοτήτων (Schedules) από το Revit

Από το μοντέλο HBIM δημιουργήθηκαν πίνακες ποσοτήτων (Schedules) για τα δομικά στοιχεία και τις επεμβάσεις. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα, για τις επιφάνειες εφαρμογής ενισχυμένου επιχρίσματος εξήχθησαν αυτόματα από το μοντέλο τα αντίστοιχα εμβαδά, μαζί με τις πληροφορίες ταυτοποίησης των στοιχείων στα οποία εφαρμόζονται.

Τα στοιχεία που εξάγονταν αυτόματα από το Revit περιλάμβαναν την ονομασία του στοιχείου, τον τύπο του, τα μήκη, τις επιφάνειες και τις συνολικές ποσότητες που προέκυπταν από τη γεωμετρία του μοντέλου. Οι πίνακες αυτοί αποτέλεσαν ένα από τα βασικά παραδοτέα της εργασίας, καθώς συνδέουν τη μοντελοποίηση των επεμβάσεων με μετρήσιμα τεχνικά δεδομένα.

6.5 Σύνδεση ποσοτήτων και προϋπολογισμού ΔΑΕΦΚ

Οι πίνακες ποσοτήτων εξήχθησαν από το Revit και μεταφέρθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο. Στο περιβάλλον αυτό πραγματοποιήθηκε η αντιστοίχιση των ποσοτήτων με τις αντίστοιχες εργασίες του πρότυπου προϋπολογισμού επισκευών του ΔΑΕΦΚ.

Η διαδικασία επέτρεψε την παρακολούθηση της σχέσης μεταξύ μοντέλου, ποσοτήτων και προϋπολογισμού, καθώς κάθε ποσότητα μπορεί να συνδεθεί με το αντίστοιχο στοιχείο και την αντίστοιχη επέμβαση του μοντέλου. Οι αλλαγές στο μοντέλο ενημερώνουν τις ποσότητες μέσω των schedules και μπορούν, μετά από νέα εξαγωγή και αντίστοιχη ενημέρωση του υπολογιστικού φύλλου, να μεταφερθούν στον προϋπολογισμό ΔΑΕΦΚ.

6.6 Αξιολόγηση της ροής εργασίας

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας κατέδειξε ότι η συνδυαστική αξιοποίηση τρισδιάστατης σάρωσης, φωτογραμμετρίας και HBIM μπορεί να υποστηρίξει τη συστηματική τεκμηρίωση μνημείων φέρουσας τοιχοποιίας. Η χρήση του νέφους σημείων και του φωτογραμμετρικού πλέγματος διευκόλυνε την ανάπτυξη του μοντέλου HBIM, ενώ η παραγωγή schedules και η σύνδεσή τους με τον προϋπολογισμό αποτέλεσε το πιο ολοκληρωμένο και άμεσα αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα της εφαρμογής.

Παράλληλα, καταγράφηκαν ορισμένοι περιορισμοί. Το φωτογραμμετρικό υλικό αξιοποιήθηκε ως τρισδιάστατο πλέγμα (.fbx) και όχι ως νέφος σημείων (point cloud). Οι ρωγμές στις θολωτές επιφάνειες δεν κατέστη δυνατό να ενσωματωθούν παραμετρικά στο περιβάλλον Revit και τεκμηριώθηκαν σε δισδιάστατα σχέδια. Επιπρόσθετα, η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ HBIM και λογισμικού δομικής ανάλυσης παρουσιάστηκε ως δυνατότητα της μεθόδου, χωρίς να εφαρμοστεί πλήρως στη συγκεκριμένη μελέτη, καθώς το προσομοίωμα του 3Muri αναπτύχθηκε ανεξάρτητα από τον στατικό μελετητή. Συνεπώς,

η διαλειτουργικότητα αξιολογείται ως δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων με περιορισμούς και ανάγκη χειροκίνητων ελέγχων.

Τέλος, επισημαίνεται ότι τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης ροής εργασίας τεκμηριώνονται ποιοτικά, βάσει της εμπειρίας εφαρμογής και των παραδοτέων που παρήχθησαν. Δεν πραγματοποιήθηκε ποσοτική αξιολόγηση με δείκτες χρόνου, ακρίβειας, κόστους ή μείωσης σφαλμάτων και, κατά συνέπεια, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα υπεροχής έναντι άλλων μεθόδων.

7. Συζήτηση

Στο κεφάλαιο αυτό συζητούνται τα ευρήματα της εφαρμογής της προτεινόμενης ροής εργασίας HBIM στο εξεταζόμενο μνημείο. Ειδικότερα, εξετάζεται η συνεισφορά της μεθόδου στην τεκμηρίωση και διαχείριση της πληροφορίας, τα βήματα που παρέμειναν χειροκίνητα, οι περιορισμοί της διαλειτουργικότητας, η σχέση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς και οι δυνατότητες και οι περιορισμοί μελλοντικής εφαρμογής της διαδικασίας.

7.1 Τι προσφέρει στην πράξη η εφαρμογή

Η εφαρμογή προσέφερε ενιαία τρισδιάστατη τεκμηρίωση της γεωμετρίας του μνημείου και οργανωμένη σύνδεση του μοντέλου με τις επεμβάσεις, τις ποσότητες και τον προϋπολογισμό εργασιών επισκευής. Η συγκέντρωση των δεδομένων αποτύπωσης, των σχεδίων, των στοιχείων του φορέα και των πληροφοριών των επεμβάσεων σε ένα κοινό ψηφιακό περιβάλλον διευκόλυνε τη διαχείριση της πληροφορίας κατά τη διάρκεια της μελέτης.

Η αξιοποίηση του νέφους σημείων και του φωτογραμμετρικού πλέγματος διευκόλυνε τη χωρική κατανόηση του μνημείου και τη μέτρηση των βλαβών, ιδιαίτερα σε δυσπρόσιτα ή μη άμεσα ορατά σημεία. Ωστόσο, δεν πραγματοποιήθηκε ποσοτική σύγκριση ακρίβειας με συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης και τεκμηρίωσης και, συνεπώς, δεν μπορεί να τεκμηριωθεί με μετρήσιμους δείκτες κάποια υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης.

Ιδιαίτερα χρήσιμη αποδείχθηκε η σύνδεση του μοντέλου με τις ποσότητες των επεμβάσεων μέσω των Schedules του Revit και η μεταφορά τους στον προϋπολογισμό του ΔΑΕΦΚ. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την οργανωμένη συσχέτιση μεταξύ μοντέλου, ποσοτήτων και κόστους. Οι αλλαγές στο μοντέλο μπορούν, μετά από νέα εξαγωγή των Schedules και αντίστοιχη ενημέρωση του υπολογιστικού φύλλου, να μεταφερθούν στον προϋπολογισμό.

Τέλος, η εργασία ανέδειξε τη δυνατότητα αξιοποίησης του προτύπου IFC για τη σύνδεση περιβαλλόντων HBIM και λογισμικών δομικής ανάλυσης, χωρίς όμως η δυνατότητα αυτή να εφαρμοστεί πλήρως στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης.

7.2 Χειροκίνητα βήματα και προβλήματα διαλειτουργικότητας

Η εφαρμογή κατέδειξε ότι σημαντικό μέρος της διαδικασίας εξακολουθεί να απαιτεί χειροκίνητες ενέργειες και ελέγχους. Η επεξεργασία του νέφους σημείων στο Autodesk ReCap Pro, ο καθαρισμός των δεδομένων και η ανάπτυξη του μοντέλου HBIM βασίστηκαν σε αποφάσεις και παρεμβάσεις του χρήστη και δεν ήταν δυνατό να αυτοματοποιηθούν πλήρως.

Παράλληλα, η φωτογραμμετρία δεν αξιοποιήθηκε ως νέφος σημείων (point cloud). αλλά ως τρισδιάστατο πλέγμα (.fbx), λόγω περιορισμών πρόσβασης στο απαιτούμενο λογισμικό παραγωγής φωτογραμμετρικού νέφους σημείων. Ως αποτέλεσμα, το φωτογραμμετρικό μοντέλο λειτούργησε κυρίως ως μέσο οπτικοποίησης και μέτρησης και όχι ως πλήρως ισοδύναμη πηγή δεδομένων με το νέφος σημείων (point cloud) της σάρωσης.

Επιπλέον, οι ρωγμές στις θολωτές επιφάνειες δεν κατέστη δυνατό να αποτυπωθούν παραμετρικά στο περιβάλλον του Revit και τεκμηριώθηκαν σε δισδιάστατα σχέδια. Ο περιορισμός αυτός αναδεικνύει τη δυσκολία παραμετρικής αναπαράστασης σύνθετων μορφών βλάβης σε καμπύλες γεωμετρίες.

Όσον αφορά τη διαλειτουργικότητα, η παρούσα μελέτη δεν περιλάμβανε πλήρη εφαρμογή της διαδικασίας μεταφοράς του μοντέλου μέσω IFC προς το λογισμικό 3Muri. Επομένως, ζητήματα όπως πιθανές απώλειες δεδομένων, ανάγκες διορθώσεων μετά την εισαγωγή ή περιορισμοί του σχήματος IFC δεν αποτελούν αποτελέσματα της παρούσας εφαρμογής, αλλά ζητήματα που έχουν αναφερθεί στη σχετική βιβλιογραφία και θα πρέπει να διερευνηθούν σε μελλοντικές εφαρμογές της μεθόδου.

7.3 Σύγκριση με τη βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα της εργασίας παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η ανάγκη συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών αποτύπωσης, όπως η τρισδιάστατη σάρωση και η φωτογραμμετρία, επιβεβαιώνει τη διαπίστωση ότι καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν επαρκεί από μόνη της για την πλήρη τεκμηρίωση σύνθετων ιστορικών κατασκευών.

Παράλληλα, η δυσκολία παραμετρικής αναπαράστασης των βλαβών, ιδίως σε καμπύλες επιφάνειες, συμφωνεί με τα συμπεράσματα ερευνητικών εργασιών που επισημαίνουν ότι τα σημερινά περιβάλλοντα BIM και τα πρότυπα ανταλλαγής δεδομένων δεν υποστηρίζουν ακόμη πλήρως την έννοια της παθολογίας και της φθοράς των ιστορικών κατασκευών.

Επιπλέον, η αντιμετώπιση του μοντέλου ως κεντρικού αποθετηρίου γεωμετρικών και τεχνικών πληροφοριών, από το οποίο παράγονται σχέδια, ποσότητες και τεκμηρίωση επεμβάσεων, ακολουθεί τη γενική κατεύθυνση της σύγχρονης έρευνας στο πεδίο του HBIM. Η παρούσα εφαρμογή διαφοροποιείται από μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας επειδή αφορά μνημείο φέρουσας λιθοδομής και όχι κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα.

7.4 Δυνατότητα μεταφοράς της μεθόδου

Η δομή της προτεινόμενης διαδικασίας παρουσιάζει δυνατότητα εφαρμογής σε παρόμοια σεισμόπληκτα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία και, γενικότερα, σε κτίρια ιστορικού ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Τα βασικά στάδια της διαδικασίας, δηλαδή η αποτύπωση, η ανάπτυξη μοντέλου HBIM, η τεκμηρίωση των βλαβών, η μοντελοποίηση των επεμβάσεων και η παραγωγή ποσοτήτων, δεν εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μόνο του συγκεκριμένου μνημείου.

Ωστόσο, η δυνατότητα αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως τεκμηριωμένη από μία μόνο εφαρμογή. Απαιτείται δοκιμή της διαδικασίας σε περισσότερες μελέτες περίπτωσης, διαφορετικού τύπου κατασκευές και διαφορετικά λογισμικά, ώστε να θεωρηθούν τα αποτελέσματα αξιόλογα προς γενίκευση.

Αντίστοιχα, η χρήση του προτύπου IFC παρέχει τη δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών, χωρίς όμως να εγγυάται από μόνη της πλήρη ανεξαρτησία από συγκεκριμένες πλατφόρμες ή πλήρη μεταφορά της πληροφορίας χωρίς απώλειες και ανάγκη ελέγχων.

7.5 Περιορισμοί

Η εργασία υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

- Μία μόνο μελέτη περίπτωσης. Τα συμπεράσματα προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου σε ένα μόνο μνημείο και δεν μπορούν να γενικευθούν στατιστικά χωρίς περαιτέρω εφαρμογές.
- Εξάρτηση από προϋπάρχουσα στατική μελέτη. Η δομική αποτίμηση δεν εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και δεν προέκυψε από το μοντέλο HBIM, αλλά βασίστηκε σε ανεξάρτητο υπολογιστικό προσομοίωμα που είχε ήδη αναπτυχθεί από τον στατικό μελετητή.
- Μη ολοκληρωμένη σύνδεση HBIM και δομικής ανάλυσης. Η απευθείας μετάβαση από το μοντέλο HBIM σε λογισμικό δομικής ανάλυσης δεν εφαρμόστηκε στην πράξη και παρουσιάζεται ως δυνατότητα της μεθόδου και όχι ως επιβεβαιωμένο αποτέλεσμα της εφαρμογής.
- Χειροκίνητες μεταβάσεις δεδομένων. Η επεξεργασία των δεδομένων αποτύπωσης, η ανάπτυξη του μοντέλου, η εξαγωγή ποσοτήτων και η σύνδεσή τους με τον προϋπολογισμό περιλάμβαναν χειροκίνητες ενέργειες και ελέγχους.
- Αδυναμία παραμετρικής αναπαράστασης ορισμένων βλαβών. Οι ρωγμές σε καμπύλες επιφάνειες, όπως οι θόλοι και ο τρούλος, δεν κατέστη δυνατό να αποτυπωθούν παραμετρικά στο μοντέλο HBIM.
- Απουσία ποσοτικής σύγκρισης. Δεν πραγματοποιήθηκε ποσοτική σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με συμβατικές διαδικασίες ως προς τον χρόνο εφαρμογής, το κόστος, την ακρίβεια ή τη μείωση σφαλμάτων. Ως εκ τούτου, τα πλεονεκτήματα που αναδεικνύονται στην παρούσα εργασία τεκμηριώνονται ποιοτικά και όχι μέσω μετρημένων δεικτών απόδοσης.

Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν τη χρησιμότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, αλλά οριοθετούν το πεδίο ισχύος των συμπερασμάτων και αναδεικνύουν κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή.

8. Συμπεράσματα και προτάσεις

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο τη διερεύνηση της αξιοποίησης της τεχνολογίας HBIM στη διαχείριση της αποκατάστασης σεισμόπληκτων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, με εφαρμογή στον Ιερό Ναό Αγίου Γεωργίου Αγιών Παρασκιών. Μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής της προτεινόμενης διαδικασίας εξετάστηκε η δυνατότητα ενσωμάτωσης δεδομένων αποτύπωσης, τεκμηρίωσης βλαβών, μοντελοποίησης επεμβάσεων και παραγωγής ποσοτήτων σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον.

8.1 Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόστηκε επιτυχώς στα στάδια της ψηφιακής αποτύπωσης, της ανάπτυξης του μοντέλου HBIM, της τεκμηρίωσης των βλαβών, της μοντελοποίησης των επεμβάσεων και της εξαγωγής ποσοτήτων και στοιχείων κόστους. Τα στάδια αυτά παρήγαγαν συγκεκριμένα και αξιοποιήσιμα παραδοτέα για τη διαχείριση της πληροφορίας του έργου.
- Ο συνδυασμός τρισδιάστατης σάρωσης LiDAR και φωτογραμμετρίας αποδείχθηκε απαραίτητος για την αποτύπωση της σύνθετης γεωμετρίας του ναού. Ειδικότερα, η φωτογραμμετρία συμπλήρωσε τα δεδομένα της σάρωσης σε δυσπρόσιτες περιοχές της στέγης, των θόλων και του τρούλου.
- Η αξιοποίηση του νέφους σημείων, του φωτογραμμετρικού πλέγματος και του μοντέλου HBIM υποστήριξε λεπτομερέστερη και χωρικά σαφέστερη οργάνωση των δεδομένων των βλαβών και των επεμβάσεων. Ωστόσο, δεν πραγματοποιήθηκε ποσοτική σύγκριση με συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης και τεκμηρίωσης και συνεπώς δεν τεκμηριώνεται με μετρήσιμα στοιχεία υπεροχή ως προς την ακρίβεια ή την ταχύτητα εφαρμογής.
- Το περισσότερο ώριμο και άμεσα αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα της εφαρμογής είναι η σύνδεση του μοντέλου με τις ποσότητες των επεμβάσεων και τον προϋπολογισμό εργασιών επισκευής του ΔΑΕΦΚ. Η αξιοποίηση των Schedules του Revit επέτρεψε

την εξαγωγή ποσοτήτων από το μοντέλο και τη συσχέτισή τους με τον προϋπολογισμό μέσω υπολογιστικού φύλλου.

- Η δομική αποτίμηση ενσωματώθηκε στην εργασία μέσω των αποτελεσμάτων του ανεξάρτητου προσομοιώματος που αναπτύχθηκε από τον στατικό μελετητή. Η απευθείας σύνδεση του μοντέλου HBIM με το λογισμικό δομικής ανάλυσης δεν εφαρμόστηκε στην πράξη και παραμένει αντικείμενο μελλοντικής εφαρμογής και επαλήθευσης.
- Η εφαρμογή ανέδειξε ότι σημαντικά τμήματα της διαδικασίας εξακολουθούν να απαιτούν χειροκίνητες ενέργειες, τόσο κατά την επεξεργασία των δεδομένων αποτύπωσης όσο και κατά τη μεταφορά και διαχείριση των πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών λογισμικών.
- Η δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης διαδικασίας σε άλλα σεισμόπληκτα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία αξιολογείται ως ιδιαίτερα ελπιδοφόρα. Ωστόσο, η γενίκευση των συμπερασμάτων απαιτεί πρόσθετες μελέτες περίπτωσης και συστηματική αξιολόγηση με μετρήσιμους δείκτες απόδοσης.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι προτάσεις που προκύπτουν άμεσα από τα ευρήματα και τους περιορισμούς της παρούσας εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Πραγματοποίηση πλήρους δοκιμής της διαδικασίας μεταφοράς δεδομένων **HBIM → IFC → λογισμικό δομικής ανάλυσης**, με συστηματική καταγραφή των πληροφοριών που μεταφέρονται, των πιθανών απωλειών δεδομένων και των απαιτούμενων διορθώσεων.
- Ανάπτυξη μεθόδων παραμετρικής αναπαράστασης βλαβών σε καμπύλες επιφάνειες, όπως θόλοι και τρούλοι, ώστε η πληροφορία των ρωγμών να ενσωματώνεται απευθείας στο μοντέλο HBIM.
- Διεξαγωγή ποσοτικής σύγκρισης μεταξύ της προτεινόμενης διαδικασίας και συμβατικών προσεγγίσεων αποτύπωσης, τεκμηρίωσης και παραγωγής ποσοτήτων, με χρήση δεικτών όπως χρόνος εργασίας, ακρίβεια μετρήσεων, πληρότητα δεδομένων και αριθμός σφαλμάτων.

- Εφαρμογή της μεθόδου σε πρόσθετες μελέτες περίπτωσης που να περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους ιστορικών κτιρίων και κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας, προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων.
- Διερεύνηση της πληρέστερης ενσωμάτωσης των αποτελεσμάτων της δομικής αποτίμησης στο περιβάλλον HBIM, ώστε η πληροφορία των βλαβών, των επεμβάσεων και της ανάλυσης να διαχειρίζεται από ένα κοινό ψηφιακό μοντέλο.

Έτσι τα συμπεράσματα απαντούν άμεσα στους στόχους της εργασίας, χωρίς να υποστηρίζουν ότι επιτεύχθηκε πλήρης διαλειτουργικότητα, πλήρης αυτοματοποίηση ή αποδεδειγμένο τρόπο μεταφοράς των δεδομένων της μεθόδου.

Βιβλιογραφία

Álvarez-Romero, S. O., González-Fajardo, J. A., Zaragoza-Grifé, J. N., & Audeves-Pérez, S. A. (2018). The effectiveness of different methodologies in gathering information for developing BIM models to support the operation and maintenance of existing buildings. Journal of Building Construction and Planning Research, 6(4), 298–316. https://doi.org/10.4236/jbcpr.2018.64020

buildingSMART International. (2024). Industry Foundation Classes (IFC): ISO 16739. https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/

Εργαστήριο Σεισμολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. (n.d.). Βάση δεδομένων σεισμολογικών σταθμών. http://www.geophysics.geol.uoa.gr/stations/gmapv3_db/index.php

Georgiou, C., & Christodoulou, S. (2014). BIM-based damage assessment and scheduling for post-earthquake building rehabilitation. In S. RazaviAlavi & W. Kim (Eds.), Proceedings of the 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (pp. 500-507). American Society of Civil Engineers (ASCE). https://doi.org/10.1061/9780784413616.050

Γεωργίλας, Α. (2024). Γεωτεχνική έρευνα και μελέτη υφιστάμενου κτιρίου: Επισκευή Ιερού Ναού Αγίου Γεωργίου Αγιών Παρασκιών. Περιφέρεια Κρήτης, Δήμος Αρχανών-Αστερουσίων.

Heyman, J. (1966). The stone skeleton: Structural behaviour of masonry. Cambridge University Press.

Καμπιτάκης, Ν., & Φιλίππου, Κ. (2024). Τεχνική περιγραφή εργασιών και τεύχος στατικών υπολογισμών (Κωδ. Μελέτης ΣΜ_046). ΕΝΙΚ Τεχνική Εταιρεία.

Liu, E., Luo, C., Yang, C., & Huang, Y. (2023). Research on 3D laser scanning reconstruction of ancient buildings combined with BIM technology. Journal of Computer and Communications, 11(7), 206–220. https://doi.org/10.4236/jcc.2023.117015

Livesley, R. K. (1978). Limit analysis of structures formed from rigid blocks. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 12(12), 1853–1871. https://doi.org/10.1002/nme.1620121207

Ma, L., Sacks, R., & Zeibak-Shini, R. (2015). Information modeling of earthquake-damaged reinforced concrete structures. Advanced Engineering Informatics, 29(3), 396–407. https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.007

Musella, C., Serra, M., Salzano, A., Menna, C., & Asprone, D. (2020). Open BIM standards: A review of the processes for managing existing structures in the pre- and post-earthquake phases. CivilEng, 1(3), 291-309. https://doi.org/10.3390/civileng1030019

Musella, C., Serra, M., Salzano, A., Menna, C., & Asprone, D. (2020). BIM & AI: Advanced technologies for the digitalization of seismic damage in masonry buildings. Structural Concrete. Advance online publication. https://doi.org/10.1002/suco.202000029

Oktavianus, A., Chen, P.-H., & Lin, J. J. (2024). Intelligent post-earthquake building recovery system: A framework combining BIM and deep learning. Journal of Building Engineering, 98, 111366. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111366

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας. (2022). Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) (3η αναθ.). Αθήνα: ΟΑΣΠ. https://oasp.gr

Original Crete. (n.d.). Αγιές Παρασκιές. https://www.originalcrete.gr/article/agies-paraskies

Özdemir, A., Ozbay, B., Bulbul, R., Gokdemir, A., Irgın, M. F., & Kopraman, Y. (2025) Experimental investigation of material mechanics in seismic performance and rehabilitation of a historical masonry building. Case Studies in Construction Materials, 23, e05284. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e0528

Σπυράκος, Κ. (2019). Κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία: Αποτίμηση και επεμβάσεις για σεισμικά φορτία. Αθήνα: ΕΡΓΟΝΟΜΟΣ ΙΚΕ.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος - Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας. (2009). Μηχανική της τοιχοποιίας: Σύνθεση φέροντος οργανισμού, απόκριση και τυπολογία βλαβών υπό κατακόρυφα και σεισμικά φορτία. Θεσσαλονίκη: ΤΕΕ/ΤΚΜ.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2023). Κανονισμός Αποτίμησης και Δομικών Επεμβάσεων Τοιχοποιίας (ΚΑΔΕΤ). ΦΕΚ Β΄ 2493/18.04.2023. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο. https://www.et.gr

Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων. (2013). Καθορισμός ελάχιστων υποχρεωτικών απαιτήσεων για την κατάθεση φακέλων επισκευής κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία που έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό. ΦΕΚ Β΄ 2661/18.10.2013. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο. https://www.et.gr

Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων. (2014). Φάσμα σχεδιασμού σεισμόπληκτων κτιρίων. ΦΕΚ Β΄ 455/25.02.2014. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο. https://www.et.gr

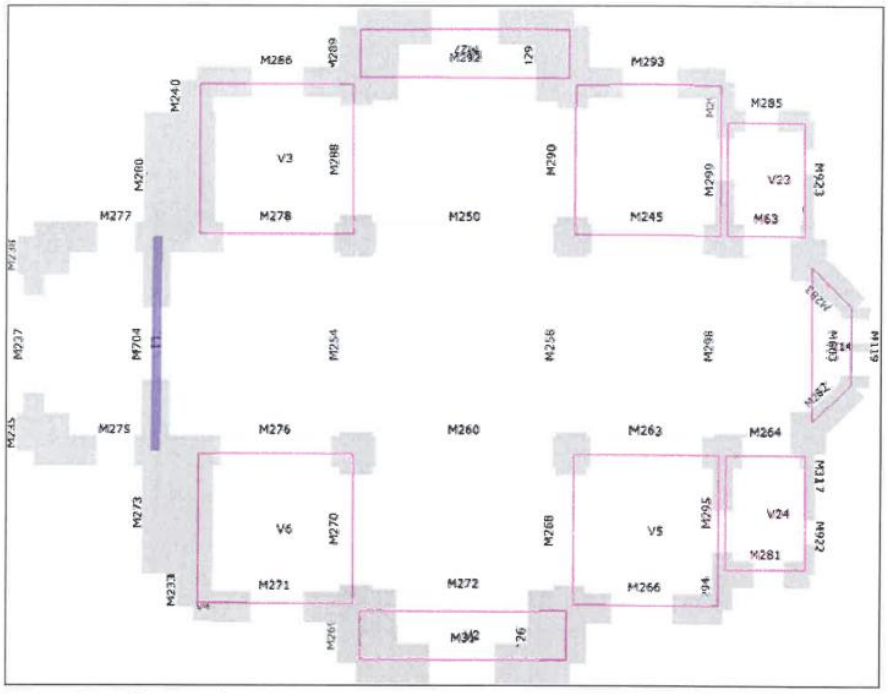
Vitiello, U., Ciotta, V., Salzano, A., Asprone, D., Manfredi, G., & Cosenza, E. (2019). BIM-based approach for the cost-optimization of seismic retrofit strategies on existing buildings. Automation in Construction, 98, 90–101. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.023 [iris.unina.it]

Παράρτημα κεφαλαίου 4 - (4.10) Αποτελέσματα αποτίμησης (3Muri)

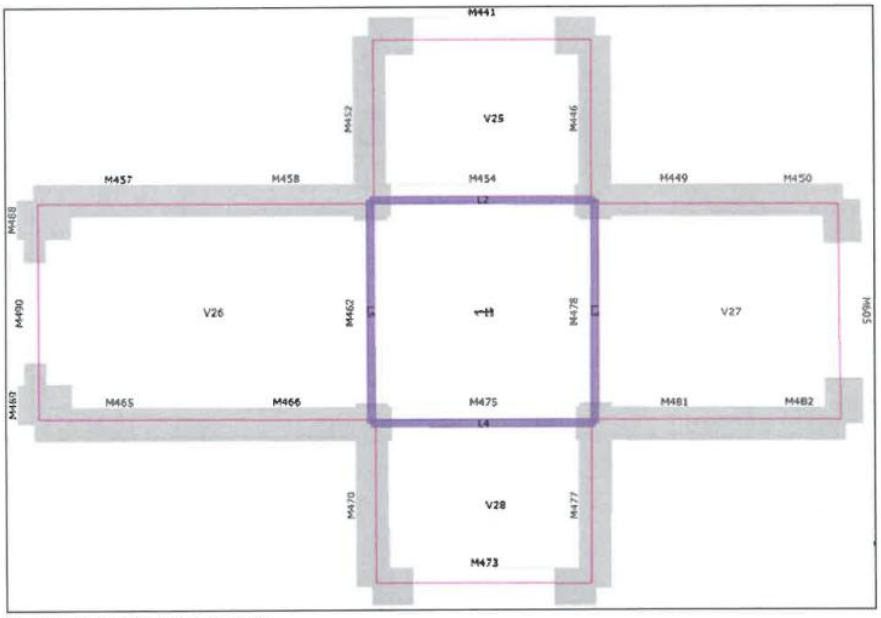
Στο παράρτημα αυτό συγκεντρώνονται οι πίνακες αποτελεσμάτων της αποτίμησης (αποδεκτή και απαιτούμενη επιτάχυνση, δείκτες διακινδύνευσης) ανά σενάριο. Τα στιγμιότυπα των μοντέλων και οι καμπύλες ικανότητας από το 3Muri παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Υφιστάμενος φορέας — Αντισεισμικός 1959:

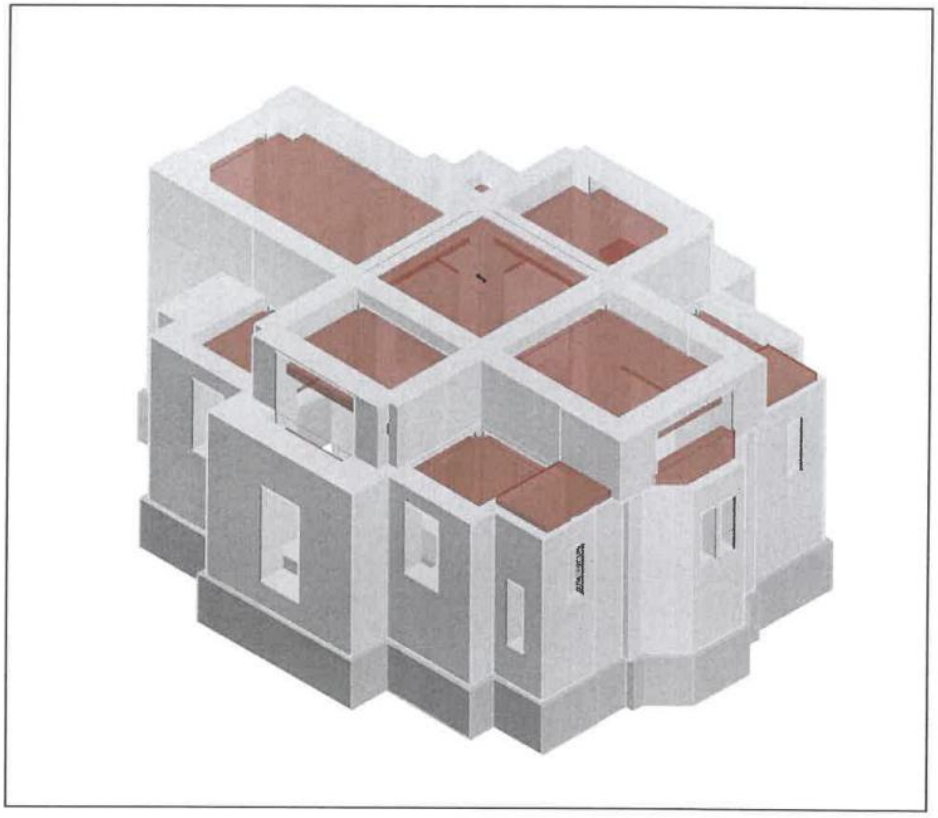
Ανάλυση



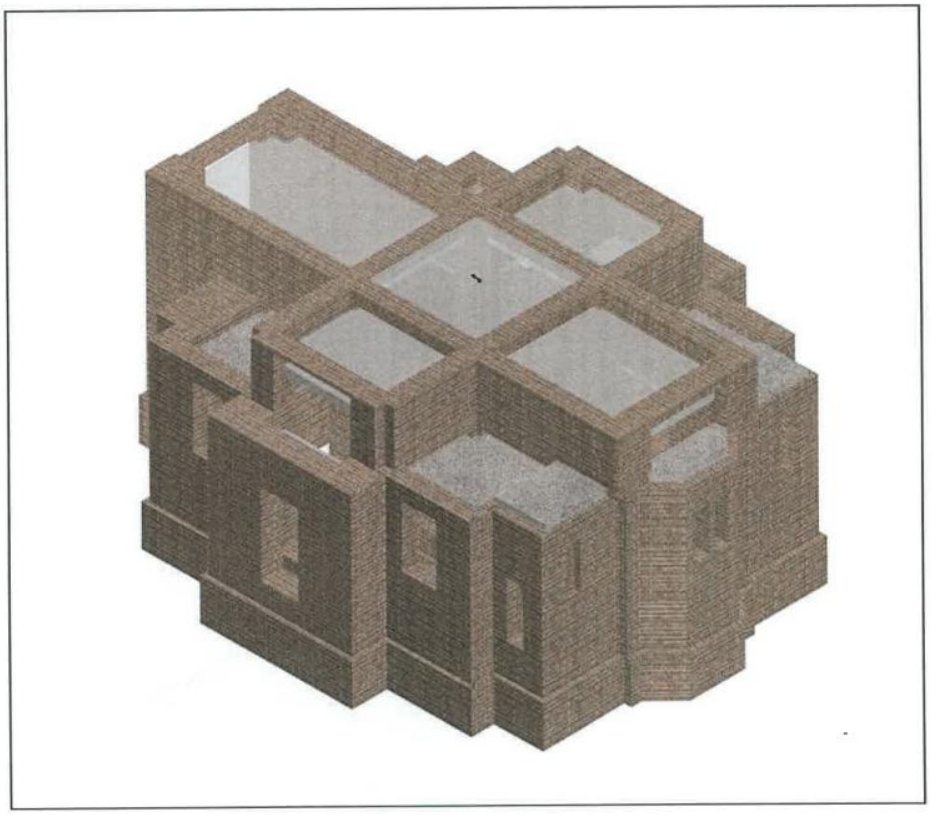
Άποψη του επιπέδου του ορόφου 1



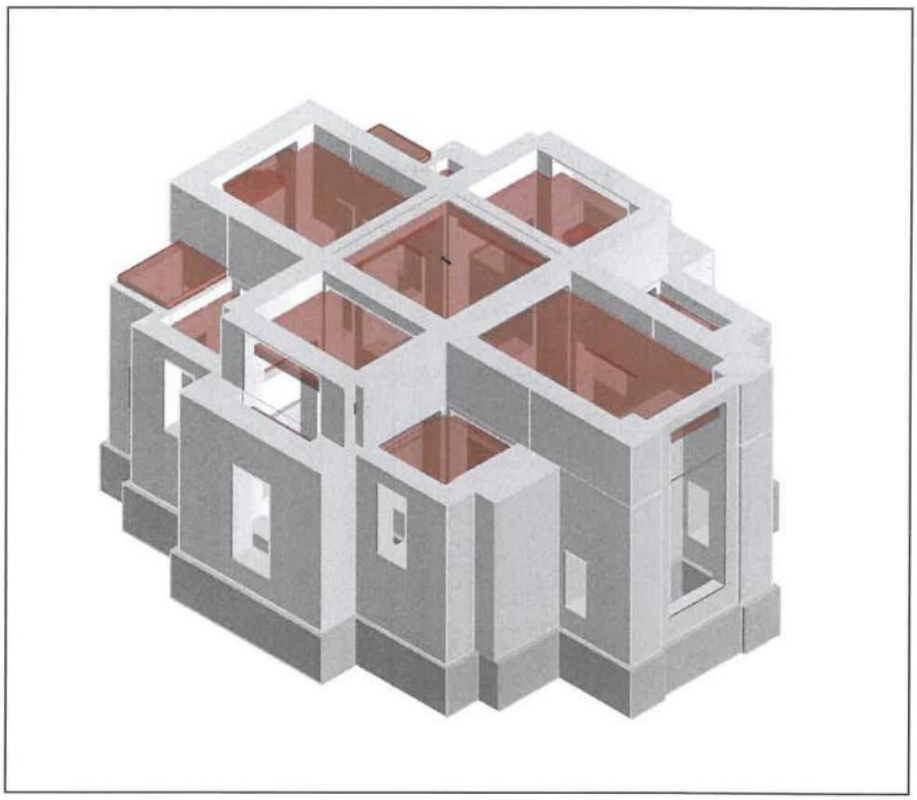
Άποψη του επιπέδου του ορόφου 2



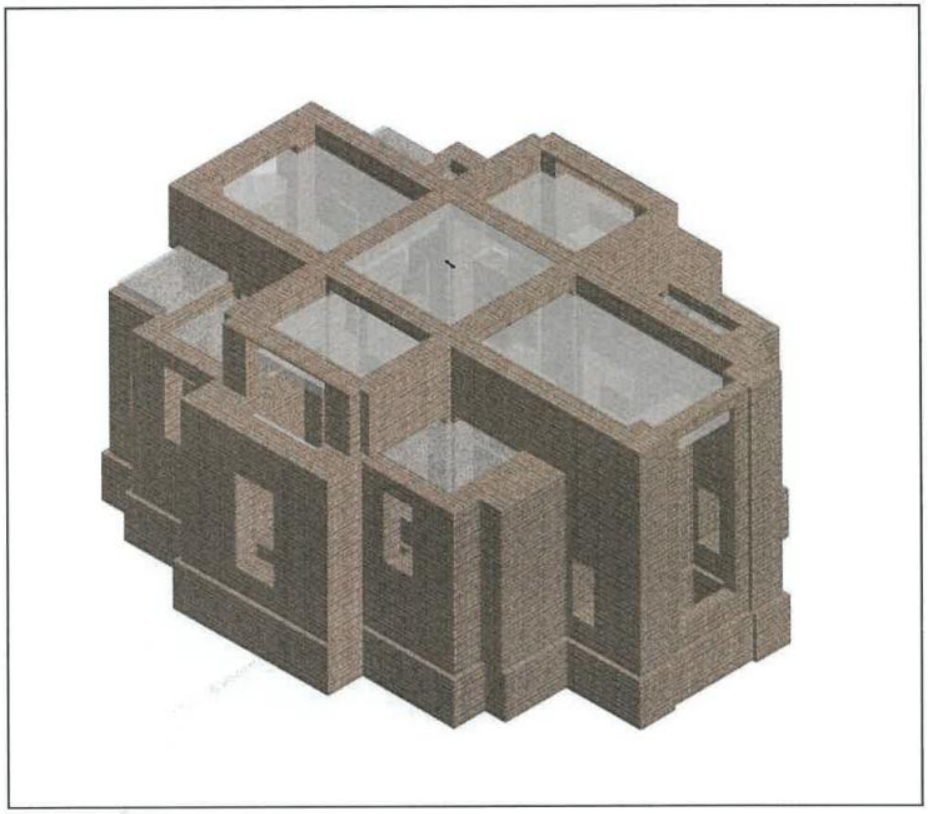
3D άποψη (1)



3D άποψη (2)

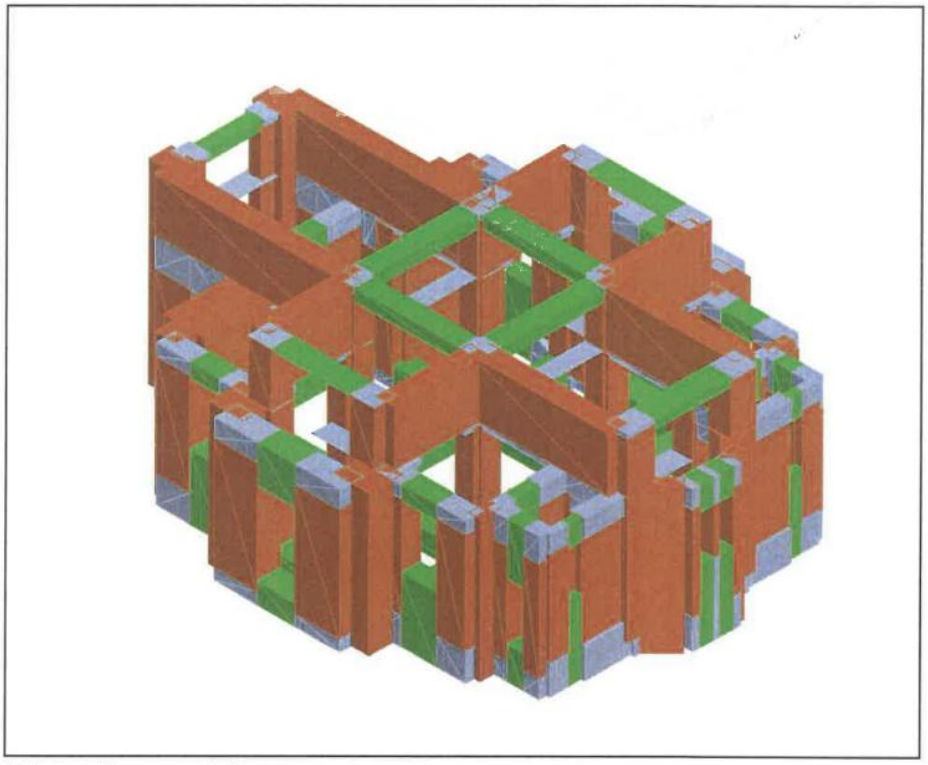


3D άποψη (2)

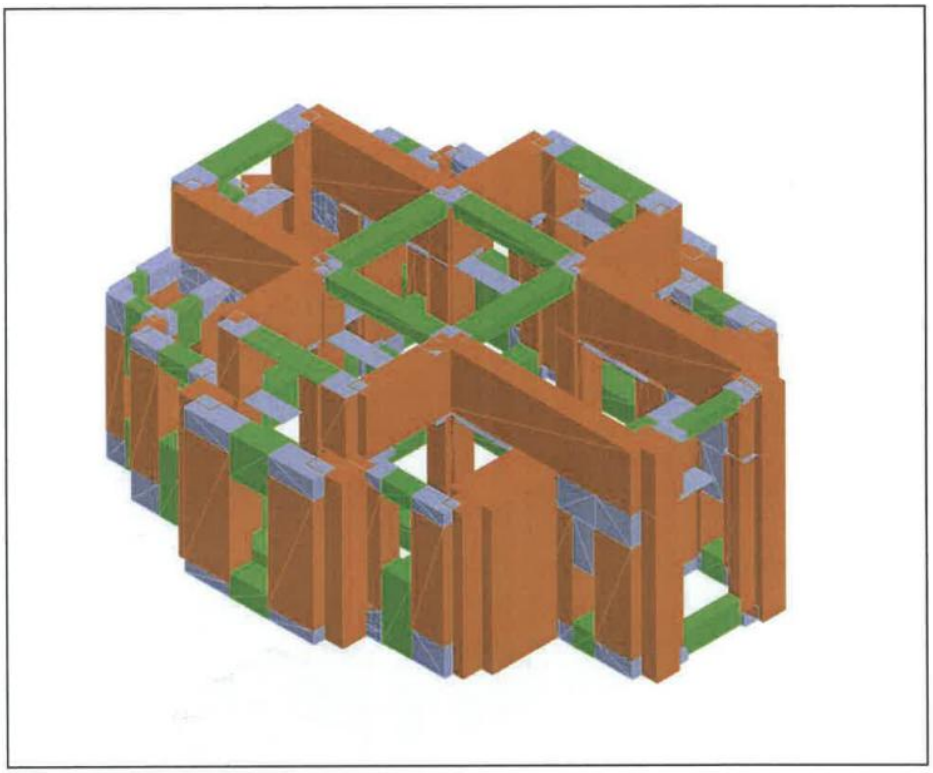


3D άποψη (4)

Αποτίμηση Υφιστάμενου Φορέα



3D άποψη - Μακροστοιχεία (1)



3D άποψη - Μακροστοιχεία (2)

Αποτίμηση υφιστάμενου φορέα

Φάσμα Σεναρίου – Αντισεισμικός 1959

Σύμφωνα με το Παράρτημα2.1 του ΚΑΔΕΤ (ΦΕΚ 2493 ΄Β /18-04-2023) ως ελάχιστοι στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού υφιστάμενων κτηρίων σπουδαιότητας ΣΙΙΙ προβλέπεται η σεισμική κλάση Β για στάθμη επιτελεστικότητας Β1 (Σημαντικές βλάβες) Συμπληρωματικά, η αποτίμηση γίνεται για τη στάθμη επιτελεστικότητας Γ (Οιονεί κατάρρευση) με στόχο τη σεισμική κλάση **Γ1.**

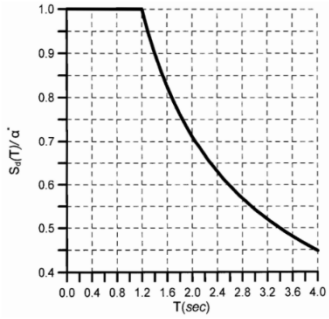
$a_g/a_{g,ref}$	Στάθμη Επιτελεστικότητας Φέροντος Οργανισμού		
	Α «Περιορισμένες Βλάβες»	Β «Σημαντικές Βλάβες»	Γ «Οιονεί Κατάρρευση»
1.80	A0	B0	Γ0
1.30	A1+	B1+	Γ1+
1.00	A1	B1	Γ1
0.75	A2+	B2+	Γ2+
0.60	A2	B2	Γ2
0.45	A3+	B3+	Γ3+
0.35	A3	B3	Γ3
0.25	A4+	B4+	Γ4+
<0.25	A4	B4	Γ4

Κατηγορία Σπουδαιότητας	Ελάχιστοι Ανεκτοί Στόχοι
I	Γ2
II	Γ1
III	B1
IV	B1 και A2 (Ικανοποίηση και των δύο στόχων)

Σε κάθε περίπτωση να θεωρηθεί ότι ισχύει A1>A2, B1>B2, Γ1>Γ2, A1>B1>Γ1 και A2>B2>Γ2

Φάσμα Σεναρίου- Επιτάχυνση Σχεδιασμού (ΦΕΚ 455΄Β/25-02-2014)

Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, ανηγμένη τιμή οριζόντιας επιτάχυνσης α/g=0,32. Εφόσον γίνεται εφαρμογή μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης και η περίοδος κατασκευής του κτιρίου είναι προ του 1985, οι τιμές των τεταγμένων του φάσματος σχεδιασμού πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή 1,50. Οπότε ως σεισμικό φορτίο λαμβάνεται αυτό που αντιστοιχεί για τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ag=0.32*1.50=0.48g με βάση το οριζόντιο φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού προκύπτει από την εξής σχέση:



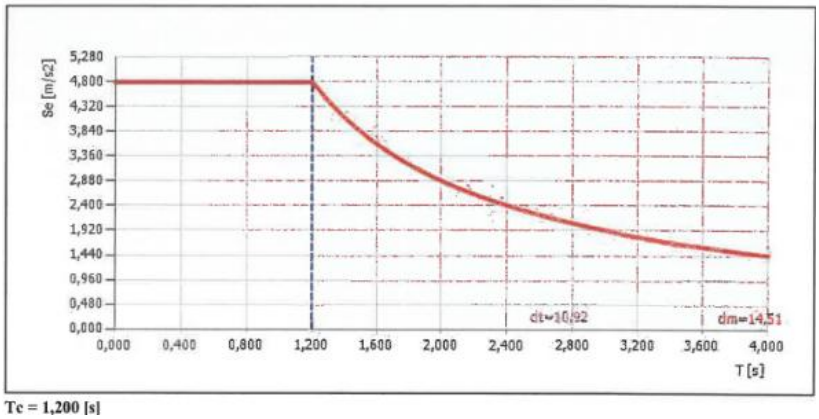
$$S_d(T)=\begin{cases} a^*, & 0\le T\le 1.2\sec \\ a^*\left(\dfrac{1.2}{T}\right)^k, & T>1.2\sec \end{cases}$$

όπου $k=2/3$

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: I (ΕΑΚ2003)					
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		0.04	0.06	0.08	0.12	0.16
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.09	0.11	0.14	0.21	0.28
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.12	0.16	0.21	0.32	0.34
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: II (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		≤0.06	0.08	0.12	0.16
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.14	0.14	0.21	0.28
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.18	0.21	0.32	0.34
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: III (ΕΑΚ2003)					
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		≤0.08	0.12	0.16
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.21	0.21	0.28
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.28	0.32	0.34

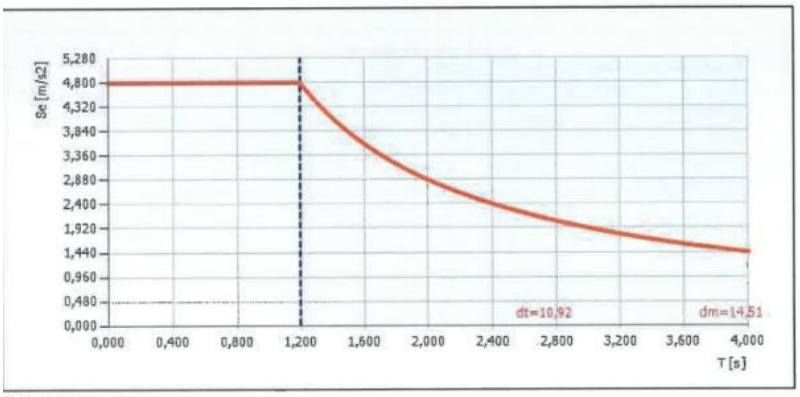
Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	**Σεισμική κλάση**	**Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού**	**$a_g/a_{g,ref}$**	**Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης**
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,48g	1,00	0,48g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,48g

Φάσμα απόκρισης: ULS



Tc = 1,200 [s]

Φάσμα απόκρισης: SLSPGA



Tc = 1,200 [s]

Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τον κανονισμό, εκτελούνται μια σειρά από ελέγχους:

Οριακή κατάσταση : Οιονεί κατάρρευση (Near collapse-NC):

$$d_t^{NC} \leq d_m^{NC}$$

d_t^{NC}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό και υπολογίζεται στο ελαστικό φάσμα.

d_m^{NC}: Μέγιστη μετακίνηση που διαθέτει η κατασκευή.

Οριακή κατάσταση : Σημαντικές βλάβες (Significant Damage-SD):

$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}$

d_t^{SD}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό.

d_m^{SD}: Καθολική ικανότητα στην οριακή κατάσταση - Significant Damage (SD)

Σεισμική διακινδύνευση

Για κάθε οριακή κατάσταση χρειάζεται να υπολογίζεται ο παράγοντας διακινδύνευσης α (a_{NC},a_{SD},a_{DL})

Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$a_{NC}=\frac{PGA_{CNC}}{PGA_{DNC}}$

$a_{SD}=\frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}}$

Αποδεκτή Επιτάχυνση: το μέγιστο σύνολο των δράσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους αναμενόμενους συνδυασμούς για το έργο για τους οποίους η κατασκευή θα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί.

PGA_{CNC}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην NC

PGA_{CSD}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην SD

Απαιτούμενη επιτάχυνση: τιμές αναφοράς των επιταχύνσεων λόγω σεισμικής ενέργειας.

Οι τιμές αυτές καθορίζονται από τα σεισμικά εκείνα φορτία τα οποία καθορίζονται από το σχήμα του φάσματος.

PGA_{DNC}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην NC

PGA_{DSD}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην SD

Αναλυτικά αποτελέσματα

No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	dt NC [cm]	dm NC [cm]	NC Ελεγ.	dt SD [cm]	dm SD [cm]	SD Ελεγ.
1	+X	Μάζες	0,000	6,94	14,85	ΝΑΙ	6,94	11,14	ΝΑΙ
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	7,14	16,42	ΝΑΙ	7,14	12,32	ΝΑΙ
3	-X	Μάζες	0,000	6,10	6,76	ΝΑΙ	6,10	5,07	ΟΧΙ
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	6,21	6,75	ΝΑΙ	6,21	5,06	ΟΧΙ
5	+Y	Μάζες	0,000	6,56	7,41	ΝΑΙ	6,56	5,56	ΟΧΙ
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	6,73	7,89	ΝΑΙ	6,73	5,91	ΟΧΙ
7	-Y	Μάζες	0,000	6,46	7,83	ΝΑΙ	6,46	5,88	ΟΧΙ
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	6,63	7,91	ΝΑΙ	6,63	5,93	ΟΧΙ
9	+X	Μάζες	0,899	7,05	21,47	ΝΑΙ	7,05	16,10	ΝΑΙ
10	+X	Μάζες	-0,899	7,11	7,13	ΝΑΙ	7,11	5,35	ΟΧΙ
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	7,50	56,39	ΝΑΙ	7,50	42,30	ΝΑΙ
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	7,31	7,30	ΟΧΙ	7,31	5,47	ΟΧΙ
13	-X	Μάζες	0,899	6,30	7,01	ΝΑΙ	6,30	5,25	ΟΧΙ
14	-X	Μάζες	-0,899	6,23	7,20	ΝΑΙ	6,23	5,40	ΟΧΙ
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	6,32	7,08	ΝΑΙ	6,32	5,31	ΟΧΙ
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	6,28	7,33	ΝΑΙ	6,28	5,50	ΟΧΙ
17	+Y	Μάζες	1,145	6,73	7,96	ΝΑΙ	6,73	5,97	ΟΧΙ
18	+Y	Μάζες	-1,145	6,44	7,66	ΝΑΙ	6,44	5,74	ΟΧΙ
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	6,91	7,76	ΝΑΙ	6,91	5,82	ΟΧΙ
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	6,56	7,85	ΝΑΙ	6,56	5,88	ΟΧΙ
21	-Y	Μάζες	1,145	6,70	8,04	ΝΑΙ	6,70	6,03	ΟΧΙ
22	-Y	Μάζες	-1,145	6,40	7,72	ΝΑΙ	6,40	5,79	ΟΧΙ
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	6,87	8,12	ΝΑΙ	6,87	6,09	ΟΧΙ
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	6,59	7,78	ΝΑΙ	6,59	5,83	ΟΧΙ

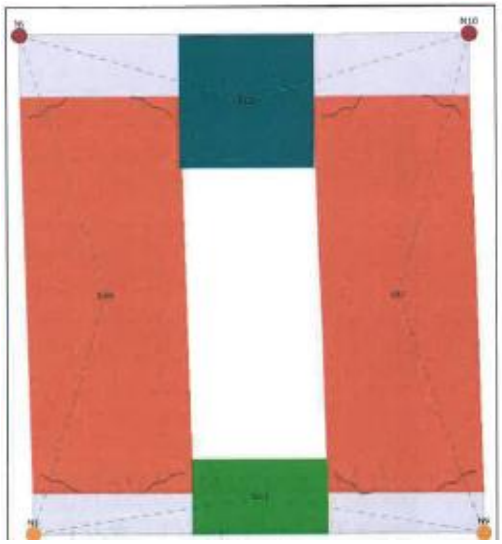
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται για την κάθε ανάλυση η τιμή του συντελεστή διακινδύνευσης για την NC και SD (αNC – αSD). Επάρκεια στο μοντέλο υπάρχει όταν αNC > 1,00 και αSD > 1,00.

No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	α NC	α SD	dm/dt NC
1	+X	Μάζες	0,000	1,962	1,511	2,140
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2,104	1,616	2,300
3	-X	Μάζες	0,000	1,091	0,857	1,108
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,073	0,843	1,087
5	+Y	Μάζες	0,000	1,110	0,871	1,130
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,148	0,895	1,172
7	-Y	Μάζες	0,000	1,183	0,923	1,212
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,166	0,909	1,193
9	+X	Μάζες	0,899	2,735	2,089	3,045
10	+X	Μάζες	-0,899	1,003	0,790	1,003
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	6,565	4,960	7,519
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	0,999	0,786	0,999
13	-X	Μάζες	0,899	1,096	0,859	1,113
14	-X	Μάζες	-0,899	1,132	0,887	1,156
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	1,102	0,864	1,120
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	1,141	0,894	1,167
17	+Y	Μάζες	1,145	1,155	0,904	1,183
18	+Y	Μάζες	-1,145	1,162	0,908	1,189
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,104	0,865	1,123
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,165	0,912	1,197
21	-Y	Μάζες	1,145	1,173	0,914	1,200
22	-Y	Μάζες	-1,145	1,177	0,918	1,206
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,158	0,902	1,182
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,155	0,902	1,181

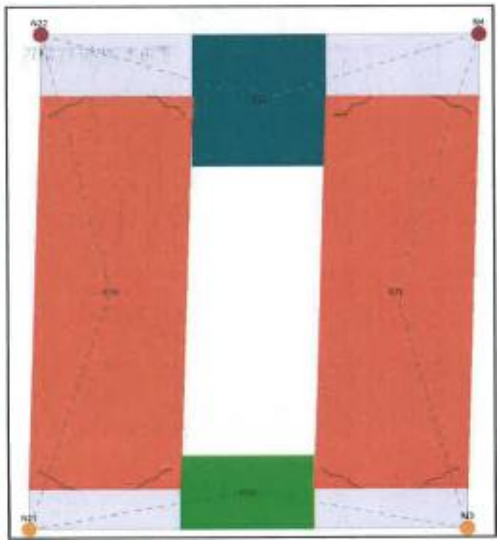
Σημείωση: Προκύπτει ανεπάρκεια σε πλήθος αναλύσεων, τόσο για την NC όσο και για την SD.

Σεισμική ανάλυση n. 12 Διεύθυνση X

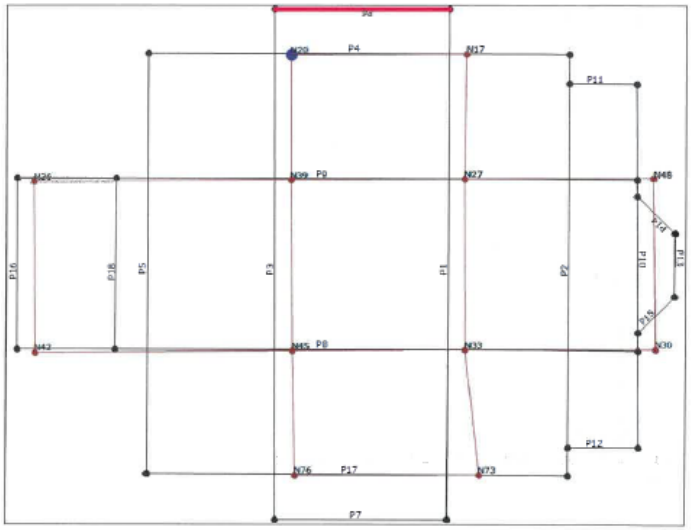
Σεισμική ανάλυση n.12 Τοίχος 6 Βήμα 82



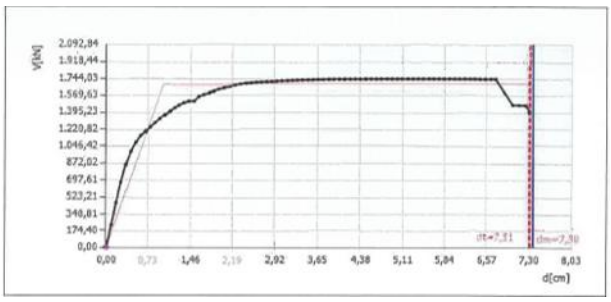
Σεισμική ανάλυση n.12 Τοίχος 7 Βήμα 82



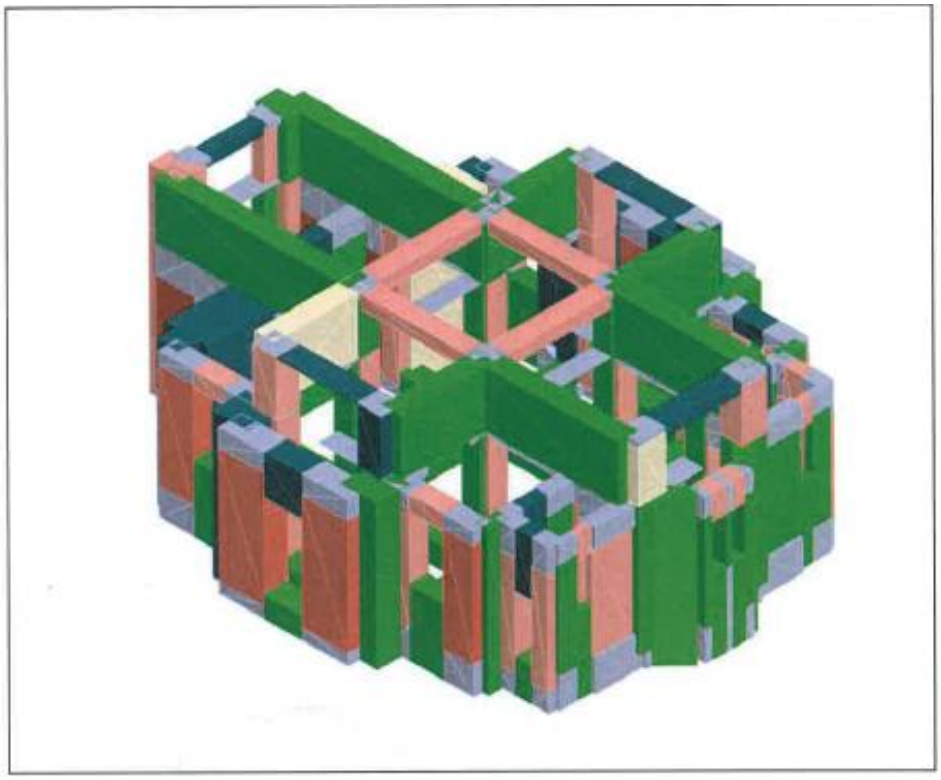
Μορφή παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (ανάλυση n.12)



Σεισμική ανάλυση n.12 Βήμα 82 – 3D Μοντέλο



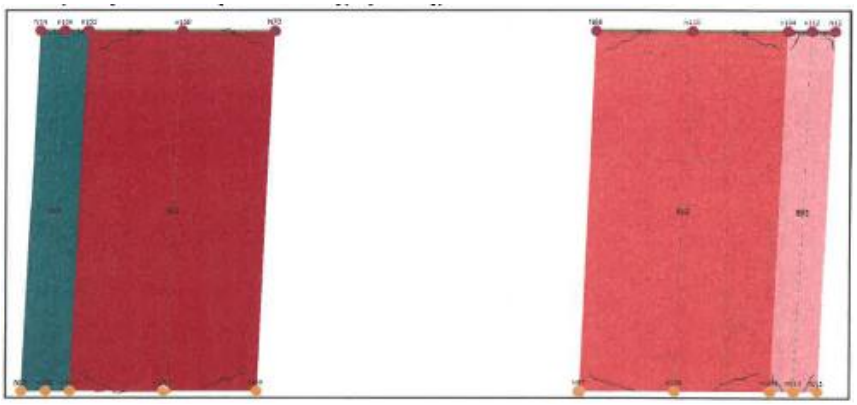
Ετικέτες αποτελεσμάτων

Τοιχοποιία

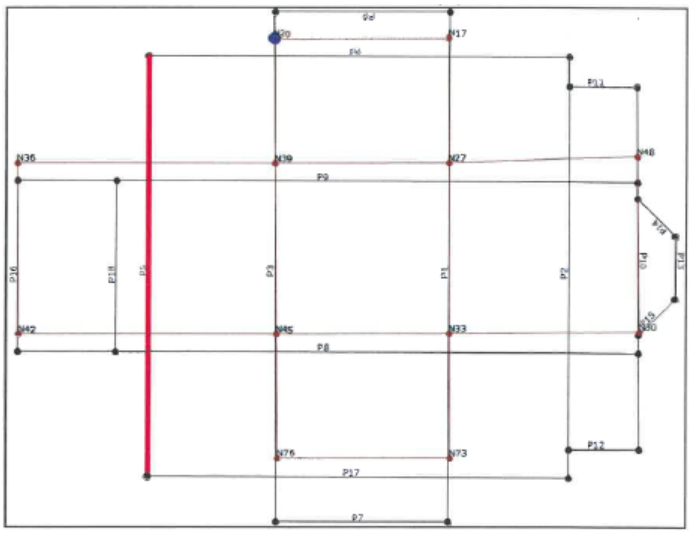
	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

Σεισμική ανάλυση n. 19 Διεύθυνση Y

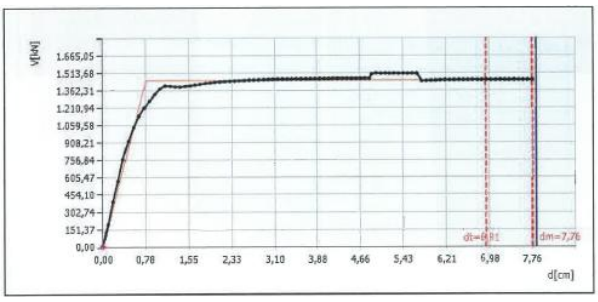
Σεισμική ανάλυση n.19 Τοίχος 5 Βήμα 92



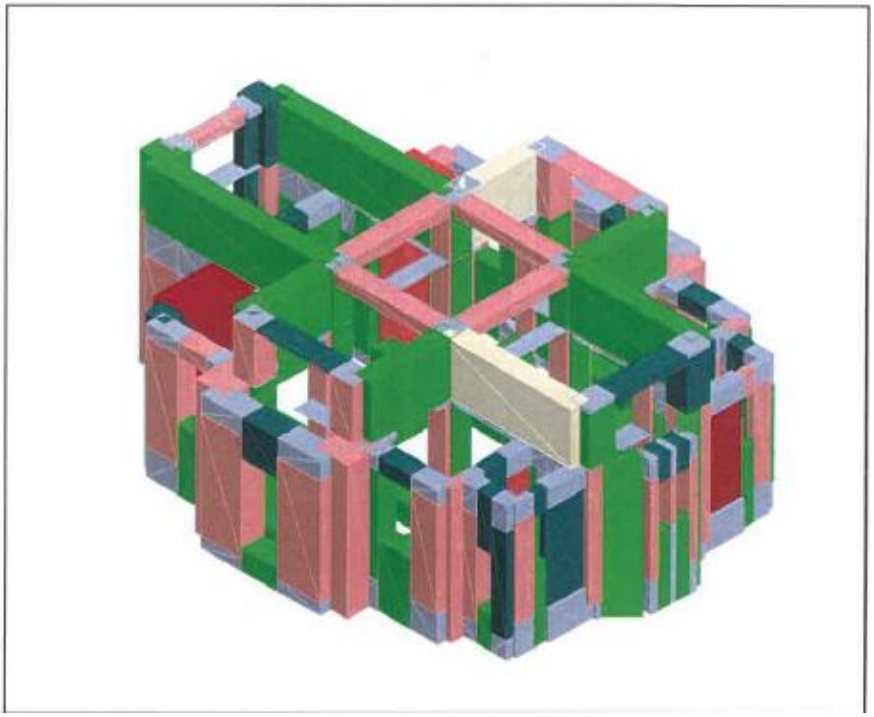
Μορφή παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (ανάλυση n.19)



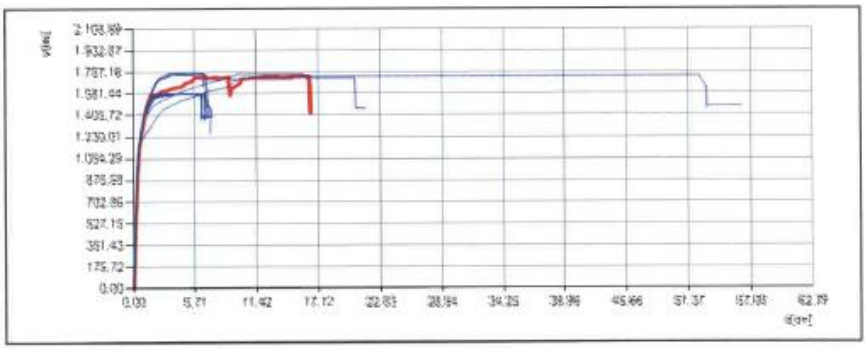
Σεισμική ανάλυση n.19 Βήμα 92 – 3D Μοντέλο



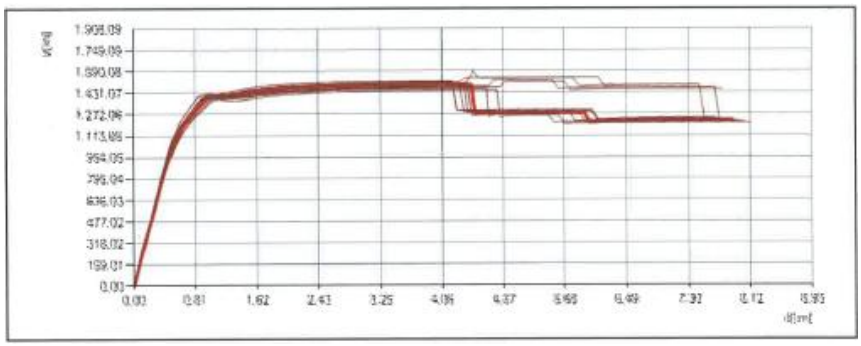
Ετικέτες αποτελεσμάτων

	Τοιχοποιία
	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά X



Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά Y



Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	**Σεισμική κλάση**	**Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού**	**$a_g/a_{g,ref}$**	**Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης**
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,24g	1,00	0,24g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,24g

agR (NC) [m/s2]	agR (SD) [m/s2]	Τύπος εδάφους	S	TB [s]	TC [s]	TD [s]	I
2,40	2,40	C	1,15	0,20	0,60	2,50	1,00

Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τον κανονισμό, εκτελούνται μια σειρά από ελέγχους:

Οριακή κατάσταση : Οιονεί κατάρρευση (Near collapse-NC):

$$d_t^{NC} \leq d_m^{NC}$$

d_t^{NC}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό και υπολογίζεται στο ελαστικό φάσμα.

d_m^{NC}: Μέγιστη μετακίνηση που διαθέτει η κατασκευή.

Οριακή κατάσταση : Σημαντικές βλάβες (Significant Damage-SD):

$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}$

d_t^{SD}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό.

d_m^{SD}: Καθολική ικανότητα στην οριακή κατάσταση - Significant Damage (SD)

Σεισμική διακινδύνευση

Για κάθε οριακή κατάσταση χρειάζεται να υπολογίζεται ο παράγοντας διακινδύνευσης α (a_{NC},a_{SD},a_{DL})

Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$a_{NC}=\frac{PGA_{CNC}}{PGA_{DNC}}$

$a_{SD}=\frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}}$

Αποδεκτή Επιτάχυνση: το μέγιστο σύνολο των δράσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους αναμενόμενους συνδυασμούς για το έργο για τους οποίους η κατασκευή θα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί.

PGA_{CNC}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην NC

PGA_{CSD}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην SD

Απαιτούμενη επιτάχυνση: τιμές αναφοράς των επιταχύνσεων λόγω σεισμικής ενέργειας.

Οι τιμές αυτές καθορίζονται από τα σεισμικά εκείνα φορτία τα οποία καθορίζονται από το σχήμα του φάσματος.

PGA_{DNC}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην NC

PGA_{DSD}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην SD

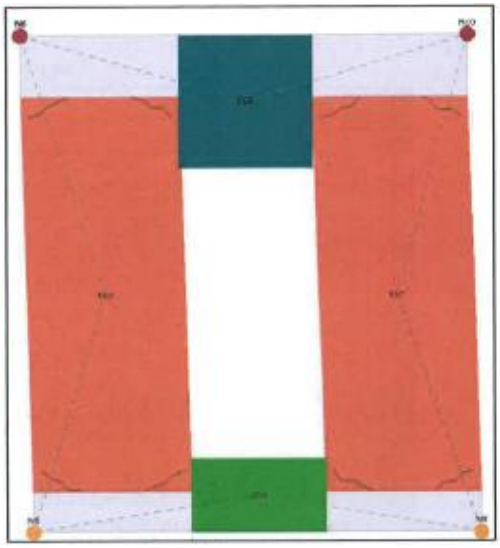
No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	dt NC [cm]	dm NC [cm]	NC Ελεγ.	dt SD [cm]	dm SD [cm]	SD Ελεγ.
1	+X	Μάζες	0,000	5,73	14,85	ΝΑΙ	5,73	11,14	ΝΑΙ
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	5,88	16,42	ΝΑΙ	5,88	12,32	ΝΑΙ
3	-X	Μάζες	0,000	4,95	6,76	ΝΑΙ	4,95	5,07	ΝΑΙ
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	5,04	6,75	ΝΑΙ	5,04	5,06	ΝΑΙ
5	+Y	Μάζες	0,000	5,34	7,41	ΝΑΙ	5,34	5,56	ΝΑΙ
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	5,42	7,89	ΝΑΙ	5,42	5,91	ΝΑΙ
7	-Y	Μάζες	0,000	5,19	7,83	ΝΑΙ	5,19	5,88	ΝΑΙ
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	5,33	7,91	ΝΑΙ	5,33	5,93	ΝΑΙ
9	+X	Μάζες	0,899	5,80	21,47	ΝΑΙ	5,80	16,10	ΝΑΙ
10	+X	Μάζες	-0,899	5,86	7,13	ΝΑΙ	5,86	5,35	ΟΧΙ
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	6,19	56,39	ΝΑΙ	6,19	42,30	ΝΑΙ
12	**+X**	**Πρώτη ιδιομορφή**	**-0,899**	**6,03**	**7,30**	**ΝΑΙ**	**6,03**	**5,47**	**ΟΧΙ**
13	-X	Μάζες	0,899	5,10	7,01	ΝΑΙ	5,10	5,25	ΝΑΙ
14	-X	Μάζες	-0,899	5,05	7,20	ΝΑΙ	5,05	5,40	ΝΑΙ
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	5,13	7,08	ΝΑΙ	5,13	5,31	ΝΑΙ
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	5,09	7,33	ΝΑΙ	5,09	5,50	ΝΑΙ
17	+Y	Μάζες	1,145	5,48	7,96	ΝΑΙ	5,48	5,97	ΝΑΙ
18	+Y	Μάζες	-1,145	5,19	7,66	ΝΑΙ	5,19	5,74	ΝΑΙ
19	**+Y**	**Πρώτη ιδιομορφή**	**1,145**	**5,62**	**7,76**	**ΝΑΙ**	**5,62**	**5,82**	**ΝΑΙ**
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	5,35	7,85	ΝΑΙ	5,35	5,88	ΝΑΙ
21	-Y	Μάζες	1,145	5,38	8,04	ΝΑΙ	5,38	6,03	ΝΑΙ
22	-Y	Μάζες	-1,145	5,15	7,72	ΝΑΙ	5,15	5,79	ΝΑΙ
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	5,51	8,12	ΝΑΙ	5,51	6,09	ΝΑΙ
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	5,30	7,78	ΝΑΙ	5,30	5,83	ΝΑΙ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται για την κάθε ανάλυση η τιμή του συντελεστή διακινδύνευσης για την NC και SD (**αNC – αSD**). Επάρκεια στο μοντέλο υπάρχει όταν **αNC > 1,00 και αSD > 1,00**.

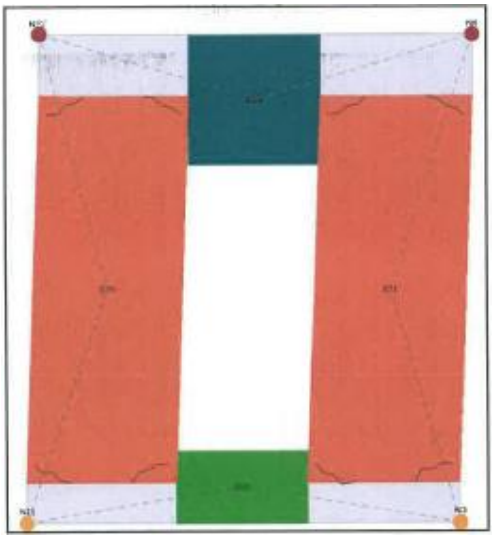
No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	α NC	α SD	dm/dt NC
1	+X	Μάζες	0,000	2,545	1,916	2,592
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2,744	2,065	2,793
3	-X	Μάζες	0,000	1,349	1,023	1,366
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,323	1,003	1,339
5	+Y	Μάζες	0,000	1,372	1,039	1,388
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,440	1,088	1,456
7	-Y	Μάζες	0,000	1,489	1,127	1,509
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,467	1,109	1,484
9	+X	Μάζες	0,899	3,622	2,724	3,702
10	+X	Μάζες	-0,899	1,210	**0,914**	1,217
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	8,950	6,718	9,110
12	**+X**	**Πρώτη ιδιομορφή**	**-0,899**	**1,205**	**0,910**	**1,211**
13	-X	Μάζες	0,899	1,357	1,028	1,375
14	-X	Μάζες	-0,899	1,407	1,066	1,426
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	1,366	1,035	1,380
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	1,420	1,075	1,440
17	+Y	Μάζες	1,145	1,437	1,087	1,453
18	+Y	Μάζες	-1,145	1,457	1,103	1,476
19	**+Y**	**Πρώτη ιδιομορφή**	**1,145**	**1,368**	**1,034**	**1,381**
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,448	1,096	1,467
21	-Y	Μάζες	1,145	1,476	1,116	1,494
22	-Y	Μάζες	-1,145	1,478	1,119	1,499
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,457	1,101	1,474
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,450	1,097	1,468

Σεισμική ανάλυση n. 12 Διεύθυνση X

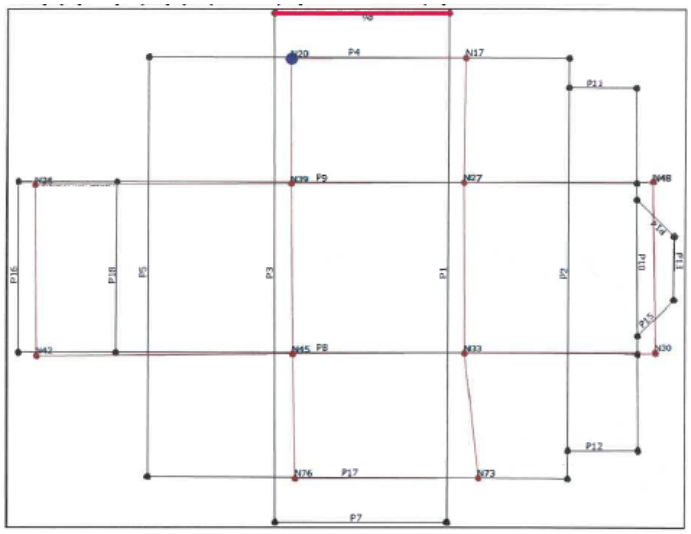
Σεισμική ανάλυση n.12 Τοίχος 6 Βήμα 82



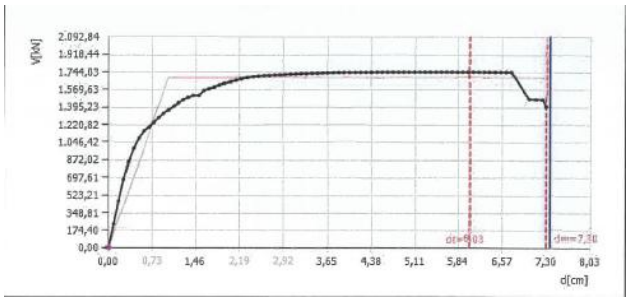
Σεισμική ανάλυση n.12 Τοίχος 7 Βήμα 82



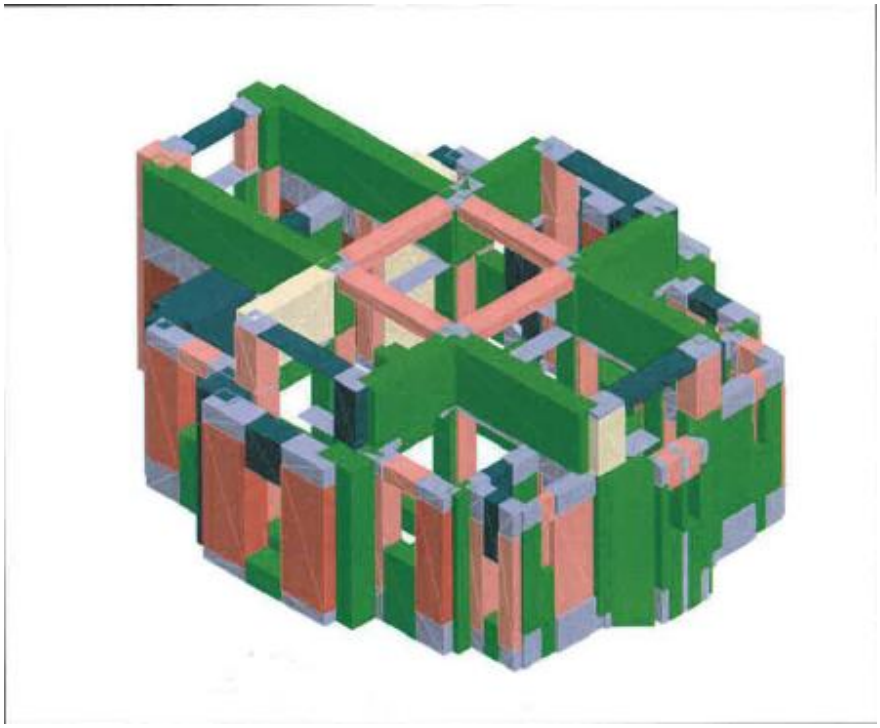
Μορφή παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (ανάλυση n.12)



Σεισμική ανάλυση n.12 Βήμα 82 – 3D Μοντέλο

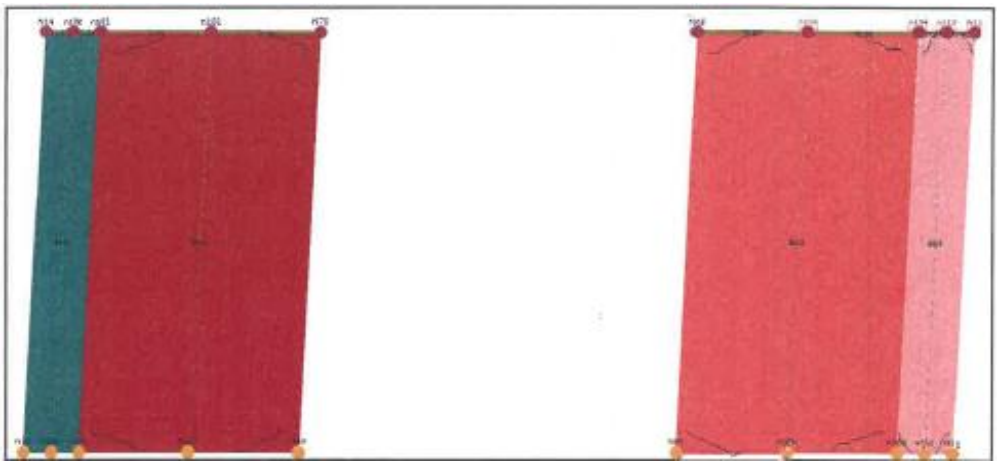


Ετικέτες αποτελεσμάτων

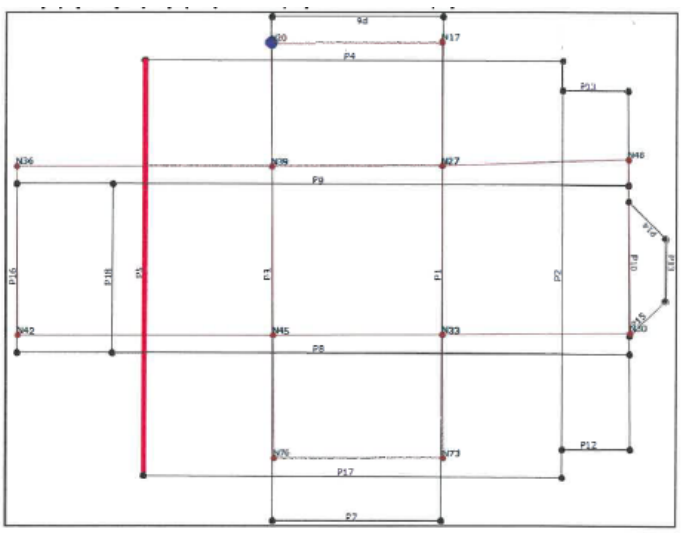
Τοιχοποιία	
	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

Σεισμική ανάλυση n. 19 Διεύθυνση Y

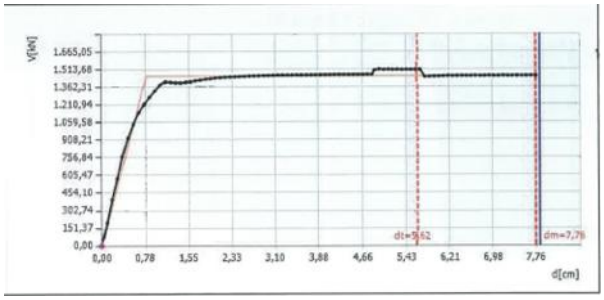
Σεισμική ανάλυση n.19 Τοίχος 5 Βήμα 92



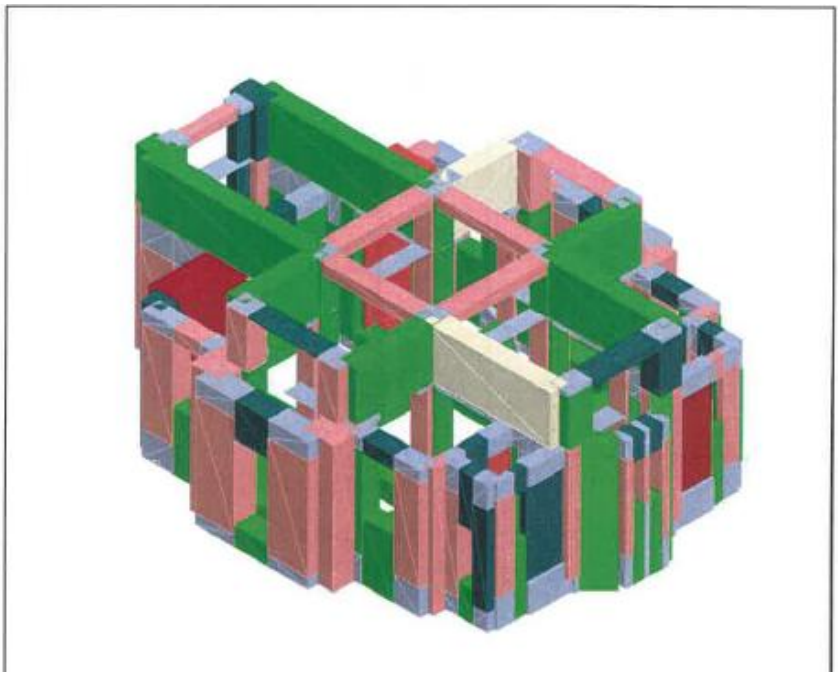
Μορφή παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (ανάλυση n.19)



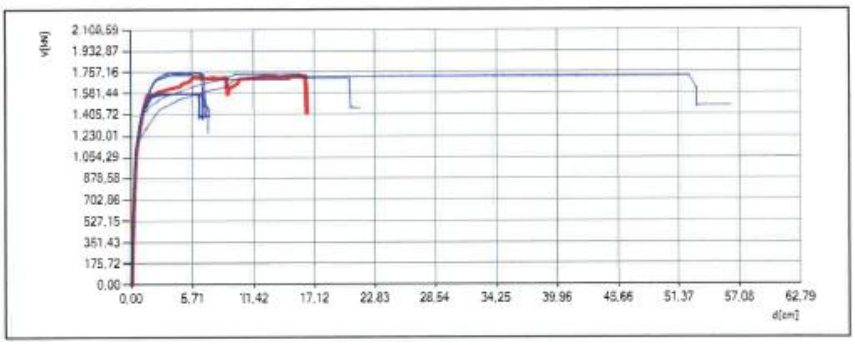
Σεισμική ανάλυση n.19 Βήμα 92 – 3D Μοντέλο



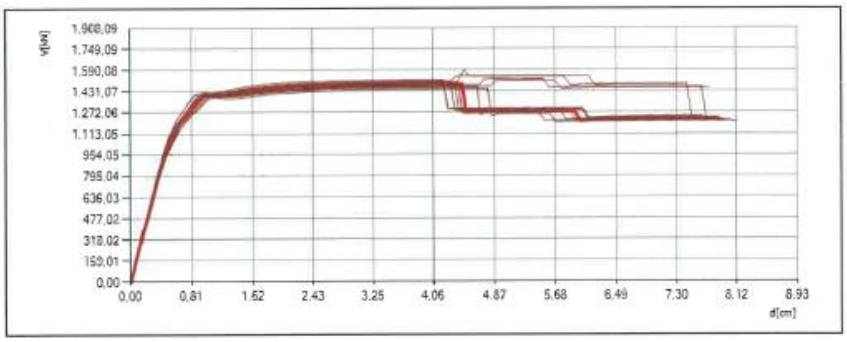
Ετικέτες αποτελεσμάτων

Τοιχοποιία	
	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

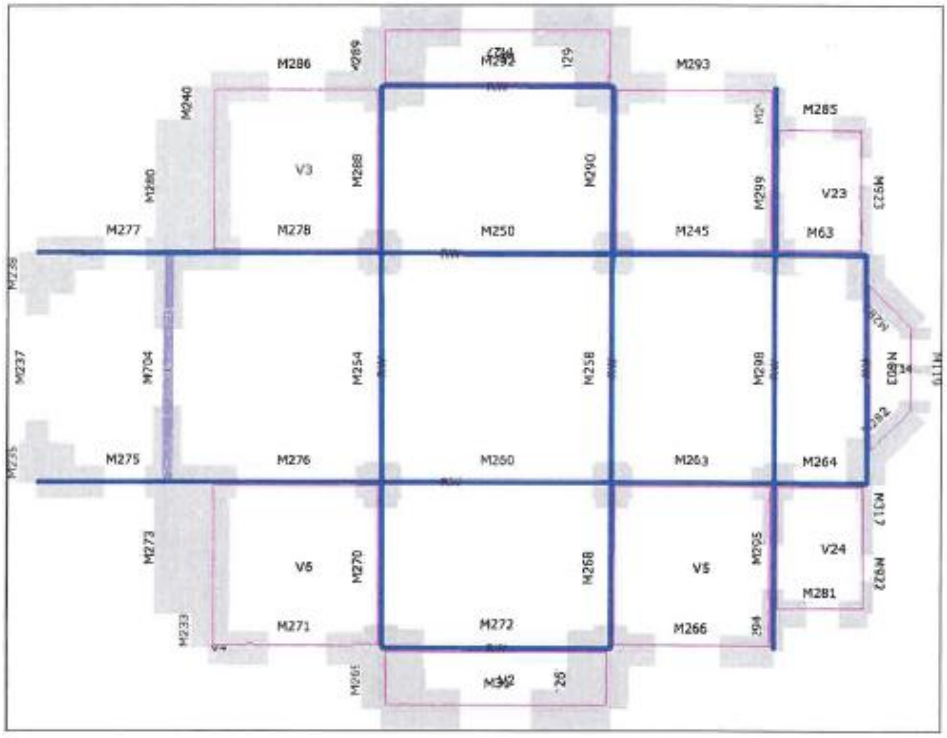
Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά X



Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά Y

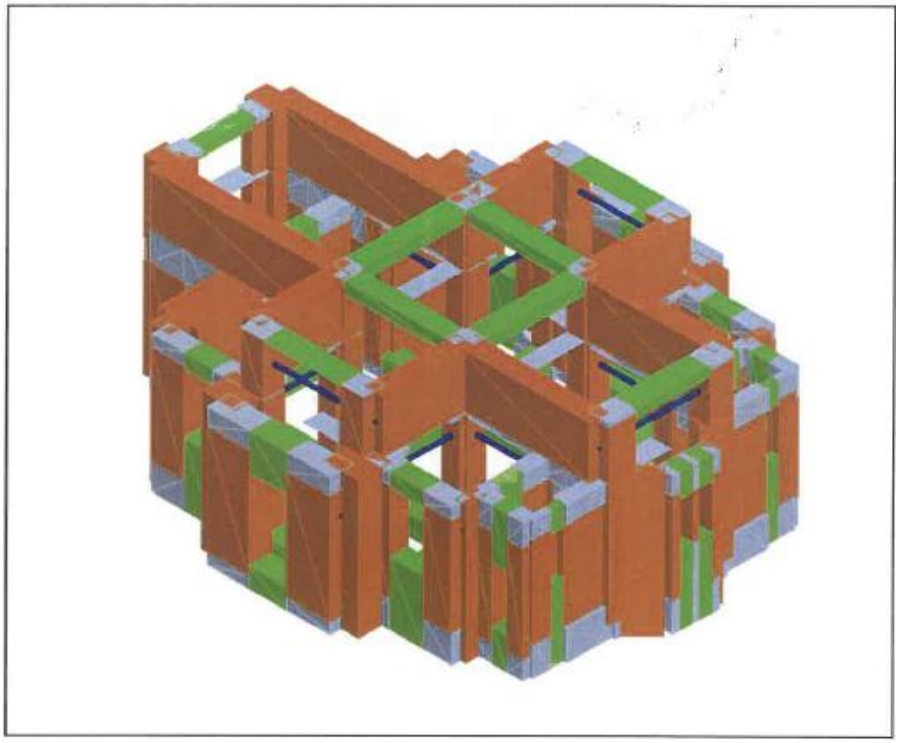


Εικόνες Μοντέλου

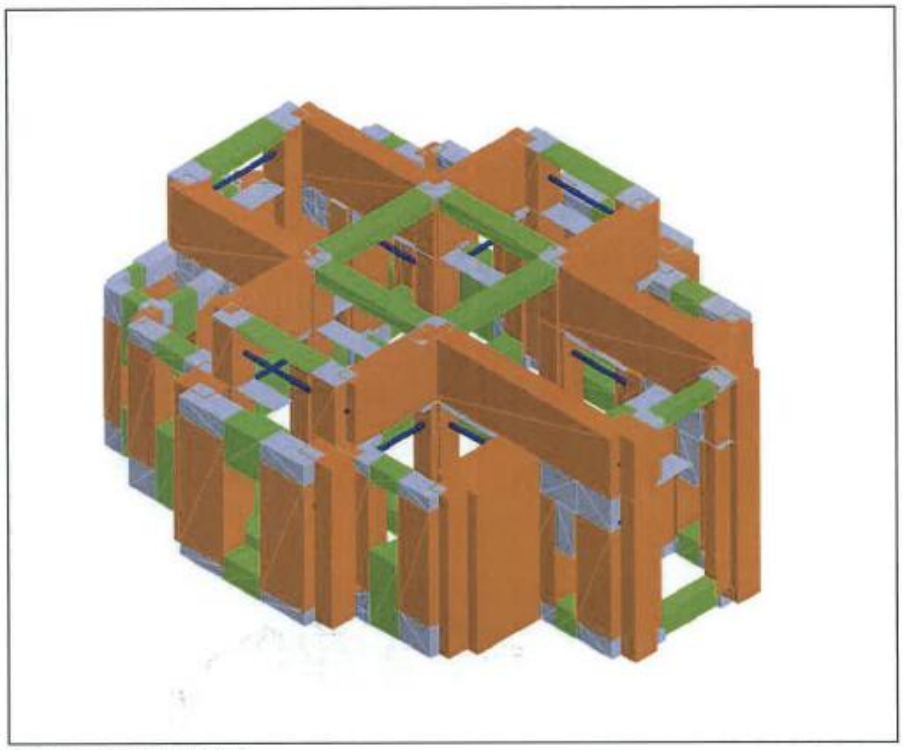


Άποψη του επιπέδου του ορόφου 1

Αποψη του επιπέδου του ορόφου 2



3D άποψη – Μακροστοιχία (1)



3D άποψη – Μακροστοιχεία (2)

Κανονισμός αναφοράς

Περιγραφή μοντέλου

Υλικά

Μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας

Όνομα	Τύπος	Χρώμα	Περιγραφή
Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Τοιχοποιία		
AISI_304	Κατασκευαστικός χάλυβας		

Τοιχοποιία

Όνομα	E [N/mm2]	G [N/mm2]	Ειδικό βάρος [kN/m3]	fm [N/mm2]	Διατμητική αντίσταση [N/mm2]
Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	2.749,00	1.100,00	21,00	2,62	0,10

Κατασκευαστικός χάλυβας

Όνομα	E [N/mm2]	G [N/mm2]	Ειδικό βάρος [kN/m3]	fym [N/mm2]	fyk [N/mm2]	γ s
AISI_304	200.000,00	76.923,00	78,50	247,00	230,00	1,15

Ενισχύσεις FRCM (Τοίχοι)

Όνομα	Τοιχοποιία	Τύπος τοιχοποιίας	Κατηγορία έκθεσης	fbm [N/mm2]	fbtm [N/mm2]	Εφαρμ. Απόσταση [m]
Geosteel Grid 400	Ag.Paraskies wall Enema (KADET)	Τοιχοποιία από ασβεστόλιθο ή leccese (επίσης ασβεστόλιθο)	Εσωτερικό	13,15	1,32	0,000

Πεσσός

Όνομα	Layout	Επίδραση τυπολογίας	Εφαρμογή	Αγκύριο για κάμψη
Geosteel Grid 400	-	Διάτμηση+Κάμψη	Σε δύο πλευρές	Αποδοτικό

Όνομα	bf [mm]/[m]	tf [mm]	Βήμα [cm]	Στρώσεις	ηa	Ef [N/mm2]
Geosteel Grid 400	0,000	0,064	0,00	1	0,90	67.400,00

Όνομα	ε (α) lim,conv [%]	σ (α) lim,conv [N/mm2]	ε fk [%]	ε fd [%]	f fd /f fdd [N/mm2]
Geosteel Grid 400	1,59000	1.071,60000	-	0,95400	642,96

Υπέρθυρο

Όνομα	Layout	Επίδραση τυπολογίας	Εφαρμογή	Αγκύριο για κάμψη
Geosteel Grid 400	-	-	-	Αποδοτικό

Όνομα	bf [mm]/[m]	tf [mm]	Βήμα [cm]	Στρώσεις	ηa	Ef [N/mm2]
Geosteel Grid 400	-	0,000	0,000	0	0,00	0,00

Όνομα	ε (α) lim,conv [%]	σ (α) lim,conv [N/mm2]	ε fk [%]	ε fd [%]	f fd /f fdd [N/mm2]
Geosteel Grid 400	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00

Γεωμετρία μοντέλου

Οι τιμές των διαφόρων συντελεστών καθοριστούν βάσει του τύπου της χρήσης για τα διάφορα επίπεδα σχεδιασμού σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 0 Πίνακας Α1.1 και την παράγραφο 4.2.4 του Ευρωκώδικα.

No.	Θέση	Τύπος	Gk	Πρόσθ. Gk	Qk	φ	ψ0	ψ2	CDM
1	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	L	4,00	0,00	2,70	1,00	0,70	0,30	Όχι
2	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	L	10,50	0,00	0,00	1,00	0,70	0,30	Όχι
3	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	L	10,50	0,00	0,00	1,00	0,70	0,30	Όχι
4	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	L	10,50	0,00	0,00	1,00	0,70	0,30	Όχι
5	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	L	10,50	0,00	0,00	1,00	0,70	0,30	Όχι

Αναφορές

CDM: Να ληφθεί υπόψη μόνο η δυναμική κατανομή της μάζας.

C: Συγκεντρωμένο [kN]

L: Γραμμικό [kN/m]

No. Δάπεδο	Θέση	Gk1 [kN/m2]	Gk2 [kN/m2]	Qk [kN/m2]	κύρια μεταβλητή δράση	φ	ψ0	ψ2
1	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	9,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

No. Θόλοι	Θέση	Gk1 [kN/m2]	Gk2 [kN/m2]	Qk [kN/m2]	κύρια μεταβλητή δράση	φ	ψ0	ψ2
1	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
25	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
26	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
27	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
28	Στάθμη 2 (+9,350 [m])	13,50	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
2	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
3	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
4	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
14	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	17,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
23	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
24	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	5,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
5	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30
6	Στάθμη 1 (+6,750 [m])	6,00	1,50	1,00	ΝΑΙ	1,00	1,00	0,30

Φάσμα Σεναρίου – Αντισεισμικός 1959

Σύμφωνα με το Παράρτημα2.1 του ΚΑΔΕΤ (ΦΕΚ 2493 ΄Β /18-04-2023) ως ελάχιστοι στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού υφιστάμενων κτηρίων σπουδαιότητας ΣΙΙΙ προβλέπεται η σεισμική κλάση Β για στάθμη επιτελεστικότητας Β1 (Σημαντικές βλάβες) Συμπληρωματικά, η αποτίμηση γίνεται για τη στάθμη επιτελεστικότητας Γ (Οιονεί κατάρρευση) με στόχο τη σεισμική κλάση **Γ1.**

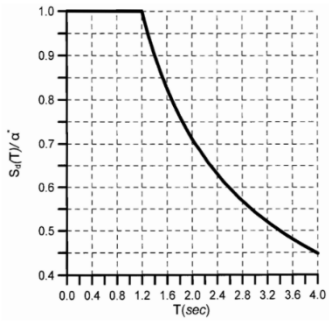
$a_g / a_{g,ref}$	Στάθμη Επιτελεστικότητας Φέροντος Οργανισμού		
	Α «Περιορισμένες Βλάβες»	Β «Σημαντικές Βλάβες»	Γ «Οιονεί Κατάρρευση»
1.80	**A0**	**B0**	**Γ0**
1.30	**A1⁺**	**B1⁺**	**Γ1⁺**
1.00	**A1**	**B1**	**Γ1**
0.75	**A2⁺**	**B2⁺**	**Γ2⁺**
0.60	**A2**	**B2**	**Γ2**
0.45	**A3⁺**	**B3⁺**	**Γ3⁺**
0.35	**A3**	**B3**	**Γ3**
0.25	**A4⁺**	**B4⁺**	**Γ4⁺**
<0.25	**A4**	**B4**	**Γ4**

Κατηγορία Σπουδαιότητας	Ελάχιστοι Ανεκτοί Στόχοι
I	Γ2
II	Γ1
III	B1
IV	B1 και A2 (Ικανοποίηση και των δύο στόχων)

Σε κάθε περίπτωση να θεωρηθεί ότι ισχύει A1>A2, B1>B2, Γ1>Γ2, A1>B1>Γ1 και A2>B2>Γ2

Φάσμα Σεναρίου- Επιτάχυνση Σχεδιασμού (ΦΕΚ 455΄Β/25-02-2014)

Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, ανηγμένη τιμή οριζόντιας επιτάχυνσης α/g=0,32. Εφόσον γίνεται εφαρμογή μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης και η περίοδος κατασκευής του κτιρίου είναι προ του 1985, οι τιμές των τεταγμένων του φάσματος σχεδιασμού πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή 1,50. Οπότε ως σεισμικό φορτίο λαμβάνεται αυτό που αντιστοιχεί για τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ag=0.32*1.50=0.48g με βάση το οριζόντιο φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού προκύπτει από την εξής σχέση:



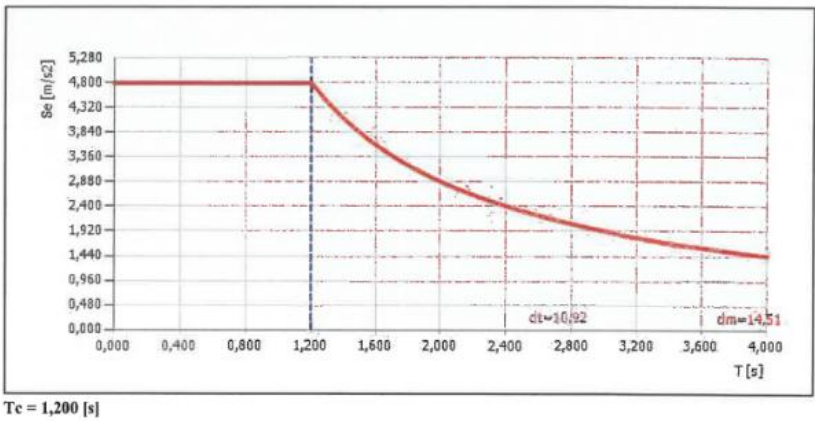
$$S_d(T) = \begin{cases} a^*, & 0 \le T \le 1.2\,\text{sec} \\ a^*\left(\dfrac{1.2}{T}\right)^k, & T > 1.2\,\text{sec} \end{cases}$$

όπου $k = 2/3$

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: I (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		0.04	0.06	0.08	0.12	0.16
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.09	0.11	0.14	0.21	0.28
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.12	0.16	0.21	0.32	0.34
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: II (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		≤0.06	0.08	0.12	0.16	
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.14	0.14	0.21	0.28	
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.18	0.21	0.32	0.34	
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας: III (ΕΑΚ2003)						
Συντελεστής Σεισμικής Επιβαρύνσεως ε (Αντισεισμικός Κανονισμός 1959/84-85)		≤0.08	0.12	0.16		
a^*/g	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙ & ΣΙΙ	0.21	0.21	0.28		
	Σπουδαιότητα Κτιρίου: ΣΙΙΙ & ΣΙV	0.28	0.32	0.34		

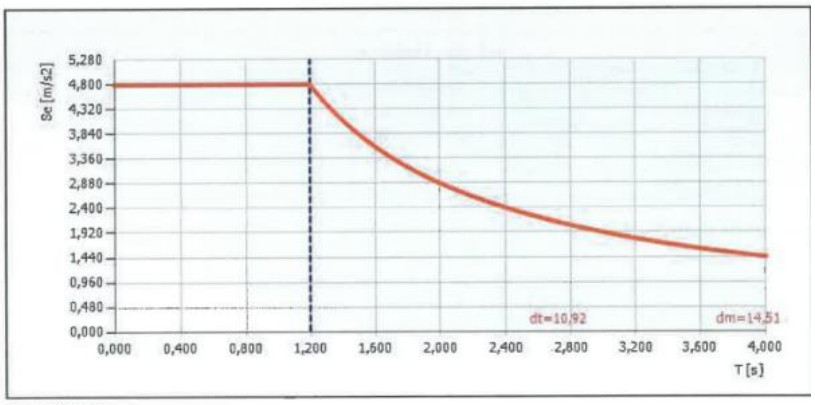
Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	**Σεισμική κλάση**	**Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού**	**$\alpha_g/\alpha_{g,ref}$**	**Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης**
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,48g	1,00	0,48g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,48g

Φάσμα απόκρισης: ULS



Tc = 1,200 [s]

Φάσμα απόκρισης: SLSPGA



Tc = 1,200 [s]

Ελαστική Ανάλυση

Ο υπολογισμός μέσω γραμμικής ανάλυσης στηρίζει τον καθορισμό των δυνάμεων στην τέμνουσας στη βάση του κτιρίου.

Η τέμνουσα δύναμη στη βάση ενός κτιρίου εξαιτίας της σεισμικής δύναμης F_b για κάθε οριζόντια διεύθυνση, στην οποία το κτίριο αναλύεται, προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$F_b=S_d(T_1)\cdot m\cdot \lambda$

Όπου:

$S_d(T_1)$:Η τεταγμένη του φάσματος του έργου για την περίοδο Τ.

T_1:Η θεμελιώδους περιόδου ταλάντωσης του κτιρίου για μια ελαστική κίνηση στην Καθοριζόμενη Διεύθυνση.

m: Η συνολική μάζα του κτιρίου πάνω από τη θεμελίωση ή πάνω από την κορυφή μιας άκαμπτης βάσης.

l: Ο συντελεστής διόρθωσης του οποίου οι τιμές λαμβάνονται ίσες με:

$l=0.85$ εάν $T_1\geq 2T_c$ και το κτίριο έχει πάνω από δυο στάθμες ή αλλιώς $l=1$

Τα αποτελέσματα της σεισμικής δράσης πρέπει να προσδιορίζονται με την εφαρμογή σε επίπεδο μοντέλου δυο διαστάσεων οριζόντιων δυνάμεων F_i οι οποίες πηγαίνουν σε όλα τα επίπεδα.

$F_i=F_b\cdot\frac{z_i\cdot m_i}{\sum z_i\cdot m_i}$

Από την εφαρμογή αυτών των δυνάμεων υπολογίζονται οι καμπτικές ροπές κι τέμνουσες, ενώ προσδιορίζονται οι κύριες τιμές αντίστασης για κάθε στοιχείο.

Pushover Ανάλυση

Περιγραφή Pushover Ανάλυση

Για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ελέγχων εκτελέστηκε μη-γραμμική στατική ανάλυση της παραγράφου 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8. Οι απαιτούμενοι έλεγχοι περιλαμβάνουν σύγκριση μεταξύ επιμέρους καμπυλών ικανότητας που δημιουργούνται κατά την διάρκεια των αναλύσεων με τις απαιτούμενες μετακινήσεις όπως ακριβώς περιγράφεται στον ισχύοντα κανονισμό. Η καμπύλη ικανότητας αναπαριστάται από ένα διάγραμμα στον οποίο εμφανίζεται η μέγιστη μετακίνηση -τέμνουσα στη βάση. Σύμφωνα με τις διατάξεις της παραγράφου 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8, υπάρχουν δυο τύποι κατανομών των δυνάμεων που πρέπει να ελεγχθούν:

- Κατανομή των δυνάμεων με βάση τις μάζες κάθε στάθμης:

$F_i=\frac{m_i}{\sum_i m_i}$

- Κατανομή των δυνάμεων με βάση την παραγωγή των μαζών για την παραμόρφωση που προκύπτει από την πρώτη ιδιόμορφη.

Με τον τρόπο αυτό, η τιμή για την μέγιστη μετακίνηση στην βάση του κτιρίου, προκύπτει από τον υπολογισμό κατανομής των δυνάμεων. Η τιμή αυτής της μετακίνησης αποτελεί την οριακή τιμή για το κτίριο. Η Μετακίνηση που ελέγχεται για τον καθορισμό της καμπύλης ικανότητας βρίσκεται στο σημείο του κτιρίου που ονομάζεται κόμβος ελέγχου. Ο κανονισμός απαιτεί να γίνεται δι-γραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας σε ένα ισοδύναμο σύστημα (SDOF) .Ο προσδιορισμός της καμπύλης σε σχέση με το ισοδύναμο σύστημα επιτρέπει τον προσδιορισμό της περιόδου στην οποία προκύπτει λόγω σεισμικής η μέγιστη μετακίνηση, σύμφωνα με τα φάσματα που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.2.2 του Ευρωκώδικας 8. Αντίστοιχα, στην παρ. 4.3.2 του Ευρωκώδικα 8 καθορίζεται ότι η τυχηματική εκκεντρότητα για το κέντρο μάζας είναι ίση με το 5% της μέγιστης διάστασης του κτιρίου στην διεύθυνση που είναι κάθετη στη σεισμική δράση.

Με βάση την μορφή του κτιρίου, και τον κανονισμό, υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές για την εκτέλεση των μη γραμμικών αναλύσεων στο πρόγραμμα:

- Σεισμικό φορτίο : Αναγνωρίζει το πρόγραμμα ποια από τις 2 κατανομές φορτίων θα υπολογιστούν (με βάση τις μάζες ή πρώτη ιδιόμορφη)
- Διεύθυνση : Αναγνωρίζει το πρόγραμμα την διεύθυνση στην οποία η κατασκευή υπόκειται σε σεισμικά φορτία (X ή Y ή στο καθολικό σύστημα).

Προκειμένου να προσδιοριστεί η δυσμενέστερη κατάσταση από τις σεισμικές δυνάμεις, πραγματοποιούνται επιμέρους αναλύσεις για κάθε κατανομή, για κάθε σεισμική διεύθυνση και για κάθε πιθανή τυχωματική εκκεντρότητα.

No.	Κατεύθυνση σεισμού	Ενιαία μορφή του πλευρικού φορτίου	Εκκεντρότηττα [m]	Στάθμη	Κόμβος
1	+X	Μάζες	0,000	2	20
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
3	-X	Μάζες	0,000	2	20
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
5	+Y	Μάζες	0,000	2	20
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
7	-Y	Μάζες	0,000	2	20
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
9	+X	Μάζες	0,899	2	20
10	+X	Μάζες	-0,899	2	20
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	2	20
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	2	20
13	-X	Μάζες	0,899	2	20
14	-X	Μάζες	-0,899	2	20
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	2	20
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	2	20
17	+Y	Μάζες	1,145	2	20
18	+Y	Μάζες	-1,145	2	20
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	2	20
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	2	20
21	-Y	Μάζες	1,145	2	20
22	-Y	Μάζες	-1,145	2	20
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	2	20
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	2	20

Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τον κανονισμό, εκτελούνται μια σειρά από ελέγχους:

Οριακή κατάσταση : Οιονεί κατάρρευση (Near collapse-NC):

$$d_t^{NC} \leq d_m^{NC}$$

d_t^{NC}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό και υπολογίζεται στο ελαστικό φάσμα.

d_m^{NC}: Μέγιστη μετακίνηση που διαθέτει η κατασκευή.

Οριακή κατάσταση : Σημαντικές βλάβες (Significant Damage-SD):

$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}$

d_t^{SD}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό.

d_m^{SD}: Καθολική ικανότητα στην οριακή κατάσταση - Significant Damage (SD)

Σεισμική διακινδύνευση

Για κάθε οριακή κατάσταση χρειάζεται να υπολογίζεται ο παράγοντας διακινδύνευσης α (a_{NC},a_{SD},a_{DL})

Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$a_{NC}=\frac{PGA_{CNC}}{PGA_{DNC}}$

$a_{SD}=\frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}}$

Αποδεκτή Επιτάχυνση: το μέγιστο σύνολο των δράσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους αναμενόμενους συνδυασμούς για το έργο για τους οποίους η κατασκευή θα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί.

PGA_{CNC}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην NC

PGA_{CSD}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην SD

Απαιτούμενη επιτάχυνση: τιμές αναφοράς των επιταχύνσεων λόγω σεισμικής ενέργειας.

Οι τιμές αυτές καθορίζονται από τα σεισμικά εκείνα φορτία τα οποία καθορίζονται από το σχήμα του φάσματος.

PGA_{DNC}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην NC

PGA_{DSD}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην SD

Αναλυτικά αποτελέσματα

No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	dt NC [cm]	dm NC [cm]	NC Ελεγ.	dt SD [cm]	dm SD [cm]	SD Ελεγ.
1	+X	Μάζες	0,000	5,52	19,28	ΝΑΙ	5,52	14,46	ΝΑΙ
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	12,40	44,37	ΝΑΙ	12,40	33,28	ΝΑΙ
3	-X	Μάζες	0,000	4,80	6,65	ΝΑΙ	4,80	4,99	ΝΑΙ
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	4,88	6,96	ΝΑΙ	4,88	5,22	ΝΑΙ
5	+Y	Μάζες	0,000	5,17	8,27	ΝΑΙ	5,17	6,20	ΝΑΙ
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	5,44	8,29	ΝΑΙ	5,44	6,22	ΝΑΙ
7	-Y	Μάζες	0,000	5,09	8,03	ΝΑΙ	5,09	6,02	ΝΑΙ
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	5,23	8,03	ΝΑΙ	5,23	6,02	ΝΑΙ
9	+X	Μάζες	0,899	11,93	39,64	ΝΑΙ	11,93	29,73	ΝΑΙ
10	+X	Μάζες	-0,899	5,63	8,03	ΝΑΙ	5,63	6,03	ΝΑΙ
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	16,98	63,55	ΝΑΙ	16,98	47,66	ΝΑΙ
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	5,66	30,68	ΝΑΙ	5,66	23,01	ΝΑΙ
13	-X	Μάζες	0,899	4,95	6,65	ΝΑΙ	4,95	4,99	ΝΑΙ
14	-X	Μάζες	-0,899	4,95	7,44	ΝΑΙ	4,95	5,58	ΝΑΙ
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	4,94	6,87	ΝΑΙ	4,94	5,15	ΝΑΙ
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	5,03	7,51	ΝΑΙ	5,03	5,63	ΝΑΙ
17	+Y	Μάζες	1,145	5,47	9,22	ΝΑΙ	5,47	6,91	ΝΑΙ
18	+Y	Μάζες	-1,145	5,00	7,82	ΝΑΙ	5,00	5,87	ΝΑΙ
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	5,65	9,27	ΝΑΙ	5,65	6,95	ΝΑΙ
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	5,18	8,01	ΝΑΙ	5,18	6,01	ΝΑΙ
21	-Y	Μάζες	1,145	5,41	9,01	ΝΑΙ	5,41	6,76	ΝΑΙ
22	-Y	Μάζες	-1,145	4,97	7,80	ΝΑΙ	4,97	5,85	ΝΑΙ
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	5,47	9,02	ΝΑΙ	5,47	6,77	ΝΑΙ
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	5,15	7,95	ΝΑΙ	5,15	5,96	ΝΑΙ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται για την κάθε ανάλυση η τιμή του συντελεστή διακινδύνευσης για την NC και SD (**αNC – αSD**). Επάρκεια στο μοντέλο υπάρχει όταν **αNC > 1,00 και αSD > 1,00**.

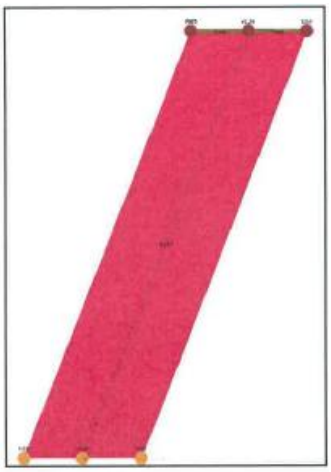
No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	α NC	α SD	dm/dt NC
1	+X	Μάζες	0,000	2,910	2,241	3,493
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	3,305	2,506	3,578
3	-X	Μάζες	0,000	1,299	1,031	1,385
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,333	1,055	1,426
5	+Y	Μάζες	0,000	1,465	1,155	1,600
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,412	1,113	1,524
7	-Y	Μάζες	0,000	1,450	1,143	1,578
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,418	1,118	1,535
9	+X	Μάζες	0,899	3,064	2,326	3,323
10	+X	Μάζες	-0,899	1,332	1,054	1,426
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	3,639	2,739	3,743
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	4,444	3,388	5,420
13	-X	Μάζες	0,899	1,267	1,005	1,343
14	-X	Μάζες	-0,899	1,393	1,099	1,503
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	1,304	1,033	1,391
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	1,386	1,094	1,493
17	+Y	Μάζες	1,145	1,544	1,209	1,686
18	+Y	Μάζες	-1,145	1,436	1,134	1,564
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,511	1,183	1,641
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,426	1,125	1,546
21	-Y	Μάζες	1,145	1,530	1,199	1,665
22	-Y	Μάζες	-1,145	1,442	1,138	1,569
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,521	1,190	1,649
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,425	1,123	1,544

Σημείωση: Προκύπτει επάρκεια του μοντέλου τόσο για την NC όσο και για την SD σε όλες τις αναλύσεις.

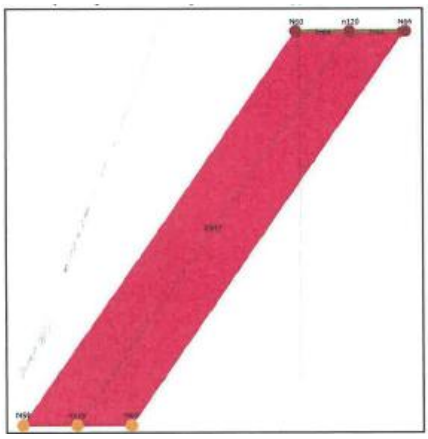
Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 διεύθυνση X

Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 διεύθυνση Τοίχος 14

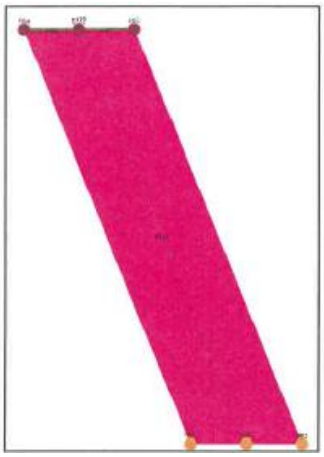
Βήμα 115 (Ικανοποίηση Απαίτησης)



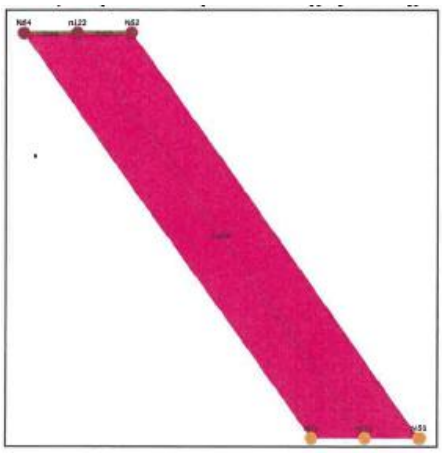
Βήμα 155



Βήμα 115 (Ικανοποίηση Απαίτησης)

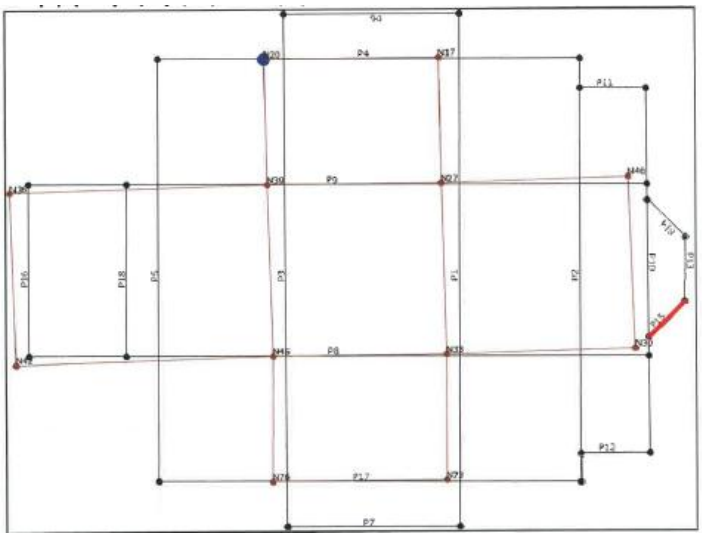


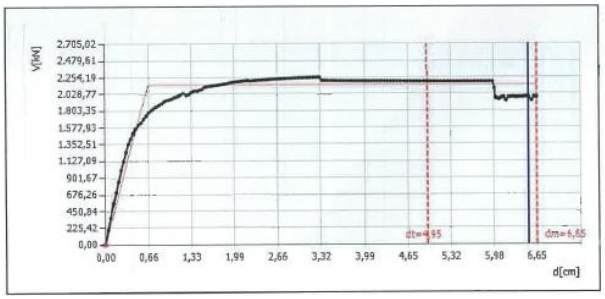
Βήμα 155



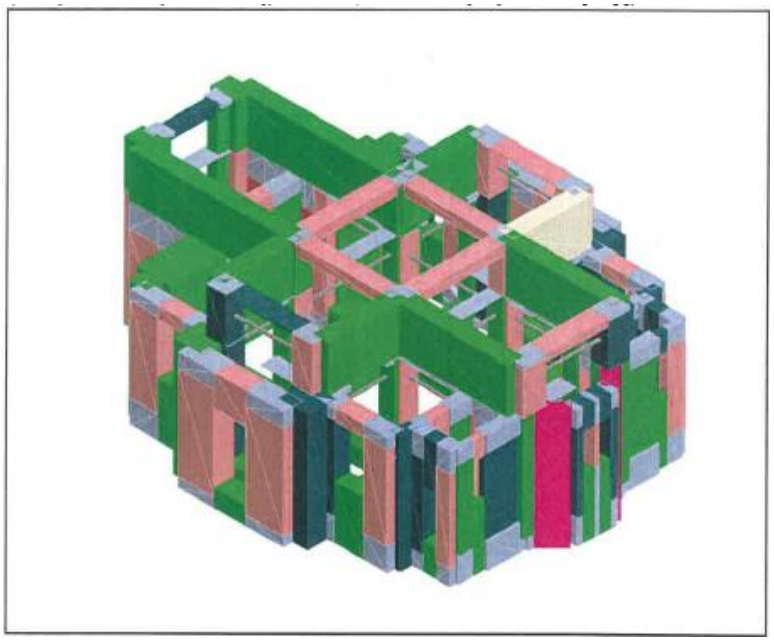
Μορφή Παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη

Καμπύλη Pushover (Ανάλυση n. 13)





Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 Βήμα 115 (Ικανοποίηση Απαίτησης) – 3D Μοντέλο

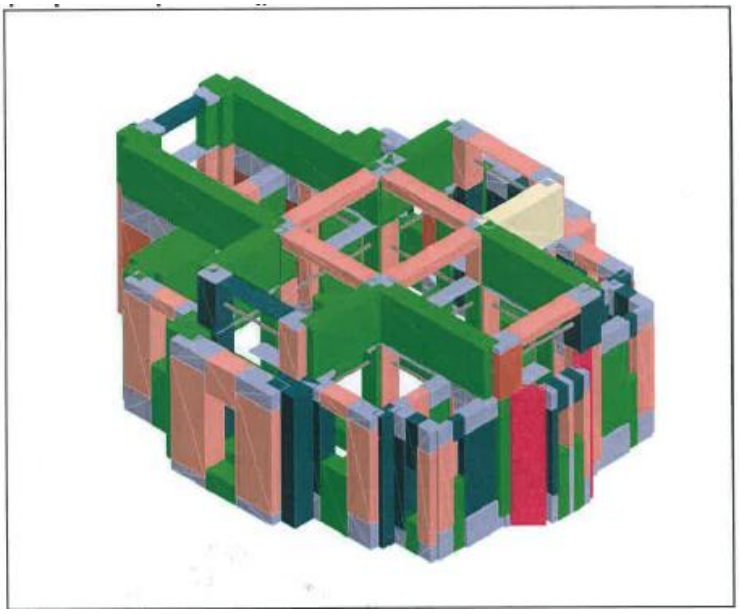


Ετικέτες αποτελεσμάτων

Τοιχοποιία

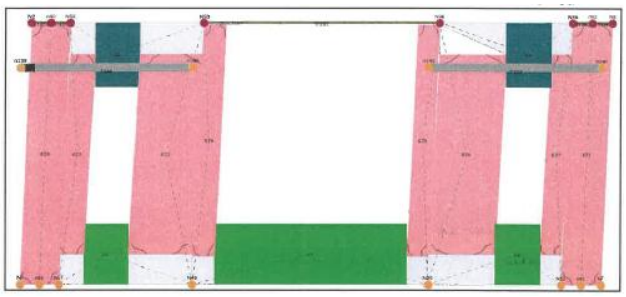
	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 Βήμα 115 – 3D Μοντέλο

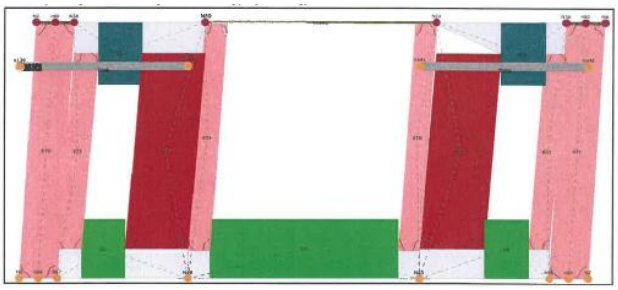


Σεισμική Ανάλυση n.6 Διεύθυνση Y

Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος Βήμα 143
(Ικανοποίηση Απαίτησης)

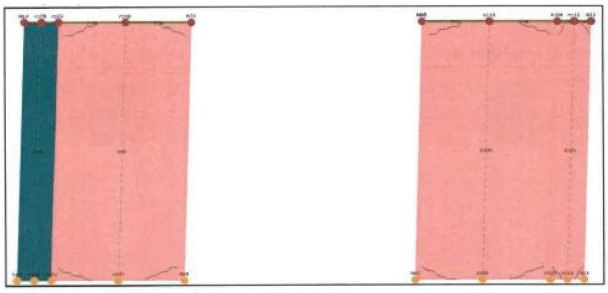


Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος Βήμα 93

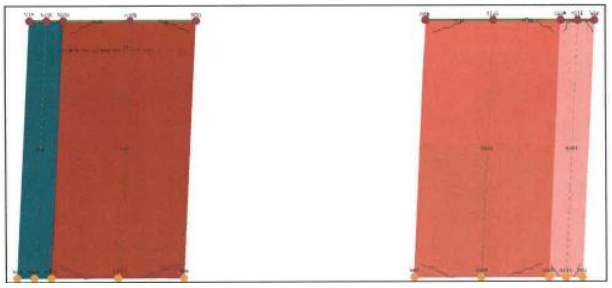


Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος Βήμα 93

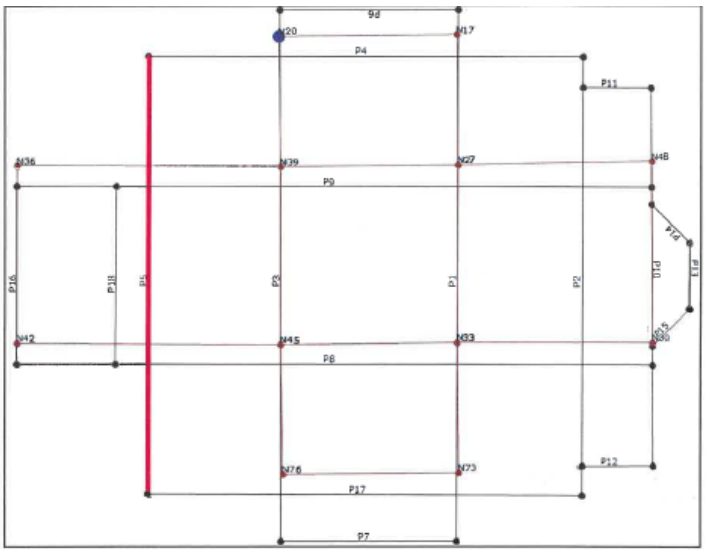
Ικανοποίηση Απαίτησης)



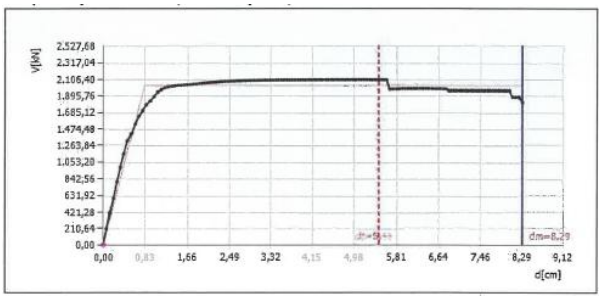
Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος Βήμα 143



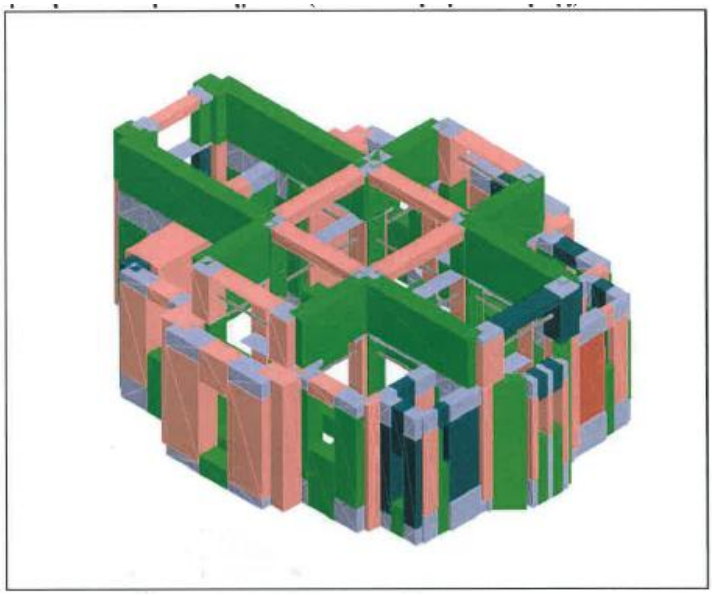
Μορφή Παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (Ανάλυση n. 6)



Σεισμική ανάλυση ένα n. 6 Βήμα 93 (Ικανοποίηση Απαίτησης) – 3D Μοντέλο

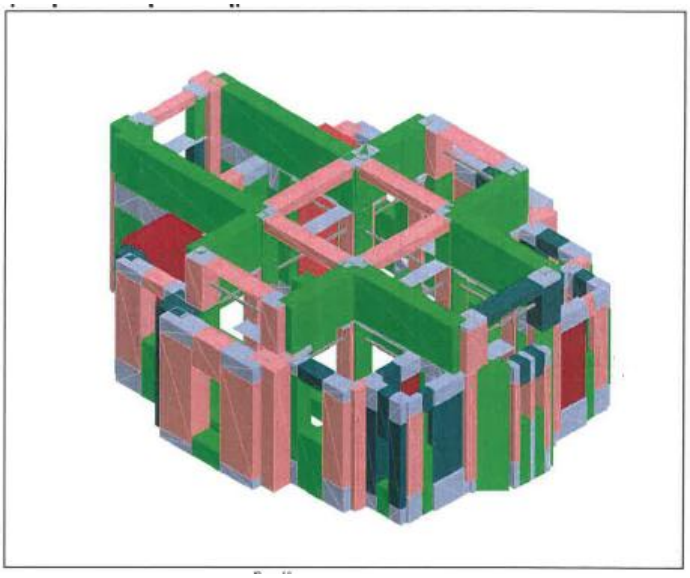


Ετικέτες αποτελεσμάτων

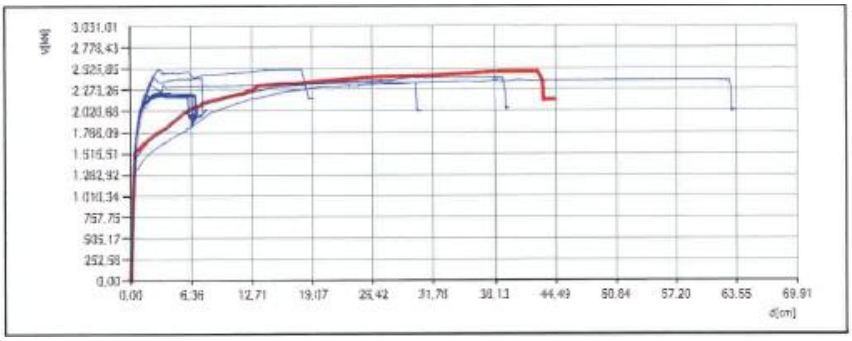
Τοιχοποιία

	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

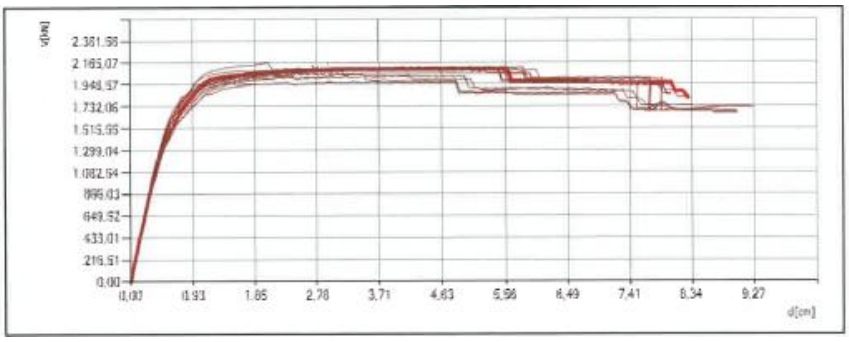
Σεισμική ανάλυση ένα n. 6 Βήμα 143 – 3D Μοντέλο



Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά Χ



Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά Y



Φάσμα Σεναρίου -Ευρωκώδικα 8 (EC-8)

Τα φάσματα απόκρισης σύμφωναμε όσα αναφέρονται στα κανονιστικά πρότυπα καθορίζονται από τη μέγιστη επιτάχυνση και την κατηγορία εδάφους στην περιοχή του υφιστάμενου κτιρίου.

Ανάλυση Pushover				
Στάθμη επιτελεστικότητας	**Σεισμική κλάση**	**Οριζόντια επιτάχυνση σχεδιασμού**	$a_g/a_{g,ref}$	**Επιτάχυνση σχεδιασμού σεισμικής κλάσης**
Β – «Σημαντικές βλάβες»	Β1	0,24g	1,00	0,24g
Γ – «Οιονεί κατάρρευση»	Γ1		1,00	0,24g

agR (NC) [m/s2]	agR (SD) [m/s2]	Τύπος εδάφους	S	TB [s]	TC [s]	TD [s]	I
2,40	2,40	C	1,15	0,20	0,60	2,50	1,00

Ο υπολογισμός μέσω γραμμικής ανάλυσης στηρίζεται στον καθορισμό των δυνάμεων τέμνουσας στην βάση του κτιρίου.

Η τέμνουσα δύναμη στην βάση του κτιρίου, εξαιτίας της σεισμικής δύναμης Fb για κάθε οριζόντια διεύθυνση στην οποία το κτίριο αναλύεται, προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$F_b=S_d(T_1)\cdot m\cdot \lambda$

Όπου:

$S_d(T_1)$:Η τεταγμένη του φάσματος του έργου για την περίοδο Τ.

T_1:Η θεμελιώδους περιόδου ταλάντωσης του κτιρίου για μια ελαστική κίνηση στην Καθοριζόμενη Διεύθυνση.

m: Η συνολική μάζα του κτιρίου πάνω από τη θεμελίωση ή πάνω από την κορυφή μιας άκαμπτης βάσης.

l: Ο συντελεστής διόρθωσης του οποίου οι τιμές λαμβάνονται ίσες με:

l=0.85 εάν $T_1 \geq 2T_c$ και το κτίριο έχει πάνω από δυο στάθμες ή αλλιώς l=1

Τα αποτελέσματα της σεισμικής δράσης πρέπει να προσδιορίζονται με την εφαρμογή σε επίπεδο μοντέλου δυο διαστάσεων οριζόντιων δυνάμεων F_i οι οποίες πηγαίνουν σε όλα τα επίπεδα.

$$F_i=F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_i \cdot m_i}$$

Από την εφαρμογή αυτών των δυνάμεων υπολογίζονται οι καμπτικές ροπές κι τέμνουσες, ενώ προσδιορίζονται οι κύριες τιμές αντίστασης για κάθε στοιχείο.

Pushover Ανάλυση

Περιγραφή Pushover Ανάλυση

Για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ελέγχων εκτελέστηκε μη-γραμμική στατική ανάλυση της παραγράφου 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8. Οι απαιτούμενοι έλεγχοι περιλαμβάνουν σύγκριση μεταξύ επιμέρους καμπυλών ικανότητας που δημιουργούνται κατά την διάρκεια των αναλύσεων με τις απαιτούμενες μετακινήσεις όπως ακριβώς περιγράφεται στον ισχύοντα κανονισμό. Η καμπύλη ικανότητας αναπαριστάται από ένα διάγραμμα στον οποίο εμφανίζεται η μέγιστη μετακίνηση -τέμνουσα στη βάση. Σύμφωνα με τις διατάξεις της παραγράφου 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8, υπάρχουν δυο τύποι κατανομών των δυνάμεων που πρέπει να ελεγχθούν:

Κατανομή των δυνάμεων με βάση τις μάζες κάθε στάθμης:

$$F_i=\frac{m_i}{\sum_i m_i}$$

Κατανομή των δυνάμεων με βάση την παραγωγή των μαζών για την παραμόρφωση που προκύπτει από την πρώτη ιδιόμορφη.

Με τον τρόπο αυτό, η τιμή για την μέγιστη μετακίνηση στην βάση του κτιρίου, προκύπτει από τον υπολογισμό κατανομής των δυνάμεων.

Η τιμή αυτής της μετακίνησης αποτελεί την οριακή τιμή για το κτίριο

Η Μετακίνηση που ελέγχεται για τον καθορισμό της καμπύλης ικανότητας βρίσκεται στο σημείο του κτιρίου που ονομάζεται κόμβος ελέγχου. Ο κανονισμός απαιτεί να γίνεται δι-γραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας σε ένα ισοδύναμο σύστημα (SDOF) .

Ο προσδιορισμός της καμπύλης σε σχέση με το ισοδύναμο σύστημα επιτρέπει τον προσδιορισμό της περιόδου στην οποία προκύπτει λόγω σεισμικής η μέγιστη μετακίνηση, σύμφωνα με τα φάσματα που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.2.2 του Ευρωκώδικας 8.

Αντίστοιχα, στην παρ. 4.3.2 του Ευρωκώδικα 8 καθορίζεται ότι η τυχηματική εκκεντρότητα για το κέντρο μάζας είναι ίση με το 5% της μέγιστης διάστασης του κτιρίου στην διεύθυνση που είναι κάθετη στη σεισμική δράση.

Με βάση την μορφή του κτιρίου, και τον κανονισμό, υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές για την εκτέλεση των μη γραμμικών αναλύσεων στο πρόγραμμα:

Σεισμικό φορτίο : Αναγνωρίζει το πρόγραμμα ποια από τις 2 κατανομές φορτίων θα υπολογιστούν (με βάση τις μάζες ή πρώτη ιδιόμορφη)

Διεύθυνση : Αναγνωρίζει το πρόγραμμα την διεύθυνση στην οποία η κατασκευή υπόκειται σε σεισμικά φορτία (X ή Y ή στο καθολικό σύστημα).

Προκειμένου να προσδιοριστεί η δυσμενέστερη κατάσταση από τις σεισμικές δυνάμεις, πραγματοποιούνται επιμέρους αναλύσεις για κάθε κατανομή, για κάθε σεισμική διεύθυνση και για κάθε πιθανή τυχωματική εκκεντρότητα.

No.	Κατεύθυνση σεισμού	Ενιαία μορφή του πλευρικού φορτίου	Εκκεντρότητα [m]	Στάθμη	Κόμβος
1	+X	Μάζες	0,000	2	20
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
3	-X	Μάζες	0,000	2	20
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
5	+Y	Μάζες	0,000	2	20
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
7	-Y	Μάζες	0,000	2	20
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	2	20
9	+X	Μάζες	0,899	2	20
10	+X	Μάζες	-0,899	2	20
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	2	20
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	2	20
13	-X	Μάζες	0,899	2	20
14	-X	Μάζες	-0,899	2	20
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	2	20
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	2	20
17	+Y	Μάζες	1,145	2	20
18	+Y	Μάζες	-1,145	2	20
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	2	20
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	2	20
21	-Y	Μάζες	1,145	2	20
22	-Y	Μάζες	-1,145	2	20
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	2	20
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	2	20

Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τον κανονισμό, εκτελούνται μια σειρά από ελέγχους:

Οριακή κατάσταση : Οιονεί κατάρρευση (Near collapse-NC):

$$d_t^{NC} \leq d_m^{NC}$$

d_t^{NC}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό και υπολογίζεται στο ελαστικό φάσμα.

d_m^{NC}: Μέγιστη μετακίνηση που διαθέτει η κατασκευή.

Οριακή κατάσταση : Σημαντικές βλάβες (Significant Damage-SD):

$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}$

d_t^{SD}: Στοχευμένη μετακίνηση όπως απαιτείται από κανονισμό.

d_m^{SD}: Καθολική ικανότητα στην οριακή κατάσταση - Significant Damage (SD)

Σεισμική διακινδύνευση

Για κάθε οριακή κατάσταση χρειάζεται να υπολογίζεται ο παράγοντας διακινδύνευσης α (a_{NC},a_{SD},a_{DL})

Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$a_{NC}=\frac{PGA_{CNC}}{PGA_{DNC}}$

$a_{SD}=\frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}}$

Αποδεκτή Επιτάχυνση: το μέγιστο σύνολο των δράσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους αναμενόμενους συνδυασμούς για το έργο για τους οποίους η κατασκευή θα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί.

PGA_{CNC}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην NC

PGA_{CSD}: Αποδεκτή επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην SD

Απαιτούμενη επιτάχυνση: τιμές αναφοράς των επιταχύνσεων λόγω σεισμικής ενέργειας.

Οι τιμές αυτές καθορίζονται από τα σεισμικά εκείνα φορτία τα οποία καθορίζονται από το σχήμα του φάσματος.

PGA_{DNC}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην NC

PGA_{DSD}: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση η οποία αντιστοιχεί στην SD

No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	dt NC [cm]	dm NC [cm]	NC Ελεγ.	dt SD [cm]	dm SD [cm]	SD Ελεγ.
1	+X	Μάζες	0,000	4,82	19,28	NAI	4,82	14,46	NAI
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	9,97	44,37	NAI	9,97	33,28	NAI
3	-X	Μάζες	0,000	4,07	6,65	NAI	4,07	4,99	NAI
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	4,14	6,96	NAI	4,14	5,22	NAI
5	+Y	Μάζες	0,000	4,42	8,27	NAI	4,42	6,20	NAI
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	4,64	8,29	NAI	4,64	6,22	NAI
7	-Y	Μάζες	0,000	4,34	8,03	NAI	4,34	6,02	NAI
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	4,46	8,03	NAI	4,46	6,02	NAI
9	+X	Μάζες	0,899	9,65	39,64	NAI	9,65	29,73	NAI
10	+X	Μάζες	-0,899	4,87	8,03	NAI	4,87	6,03	NAI
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	12,68	63,55	NAI	12,68	47,66	NAI
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	4,89	30,68	NAI	4,89	23,01	NAI
13	-X	Μάζες	0,899	4,19	6,65	NAI	4,19	4,99	NAI
14	-X	Μάζες	-0,899	4,19	7,44	NAI	4,19	5,58	NAI
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	4,18	6,87	NAI	4,18	5,15	NAI
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	4,26	7,51	NAI	4,26	5,63	NAI
17	+Y	Μάζες	1,145	4,62	9,22	NAI	4,62	6,91	NAI
18	+Y	Μάζες	-1,145	4,27	7,82	NAI	4,27	5,87	NAI
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	4,77	9,27	NAI	4,77	6,95	NAI
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	4,42	8,01	NAI	4,42	6,01	NAI
21	-Y	Μάζες	1,145	4,55	9,01	NAI	4,55	6,76	NAI
22	-Y	Μάζες	-1,145	4,23	7,80	NAI	4,23	5,85	NAI
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	4,59	9,02	NAI	4,59	6,77	NAI
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	4,38	7,95	NAI	4,38	5,96	NAI

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται για την κάθε ανάλυση η τιμή του συντελεστή διακινδύνευσης για την NC και SD (**αNC – αSD**). Επάρκεια στο μοντέλο υπάρχει όταν **αNC > 1,00 και αSD > 1,00**.

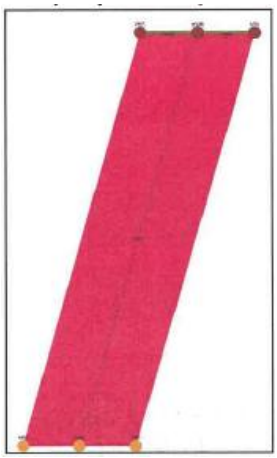
No.	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	Εκκ. [m]	α NC	α SD	dm/dt NC
1	+X	Μάζες	0,000	3,792	2,862	4,000
2	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	4,451	3,338	4,450
3	-X	Μάζες	0,000	1,578	1,205	1,634
4	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,627	1,241	1,681
5	+Y	Μάζες	0,000	1,804	1,372	1,871
6	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,733	1,317	1,787
7	-Y	Μάζες	0,000	1,784	1,358	1,850
8	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,000	1,742	1,325	1,800
9	+X	Μάζες	0,899	4,107	3,080	4,108
10	+X	Μάζες	-0,899	1,608	1,223	1,649
11	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	5,011	3,758	5,012
12	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	5,940	4,471	6,274
13	-X	Μάζες	0,899	1,539	1,175	1,587
14	-X	Μάζες	-0,899	1,712	1,304	1,776
15	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,899	1,592	1,214	1,644
16	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-0,899	1,704	1,297	1,763
17	+Y	Μάζες	1,145	1,930	1,464	1,996
18	+Y	Μάζες	-1,145	1,764	1,343	1,831
19	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,885	1,429	1,943
20	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,752	1,333	1,812
21	-Y	Μάζες	1,145	1,913	1,452	1,980
22	-Y	Μάζες	-1,145	1,773	1,350	1,844
23	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	1,145	1,904	1,444	1,965
24	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-1,145	1,754	1,335	1,815

Σημείωση: Προκύπτει επάρκεια του μοντέλου τόσο για την NC όσο και για την SD σε όλες τις αναλύσεις.

Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 διεύθυνση X

Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 διεύθυνση Τοίχος 14

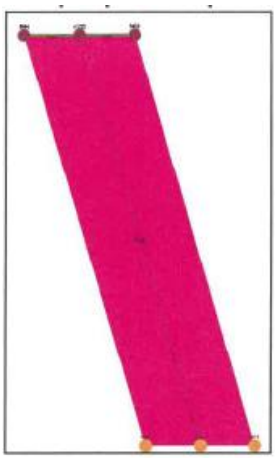
Βήμα 100 (Ικανοποίηση Απαίτησης)



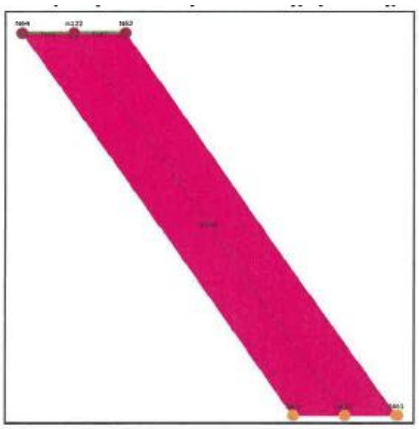
Βήμα 155

Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 διεύθυνση Τοίχος 15

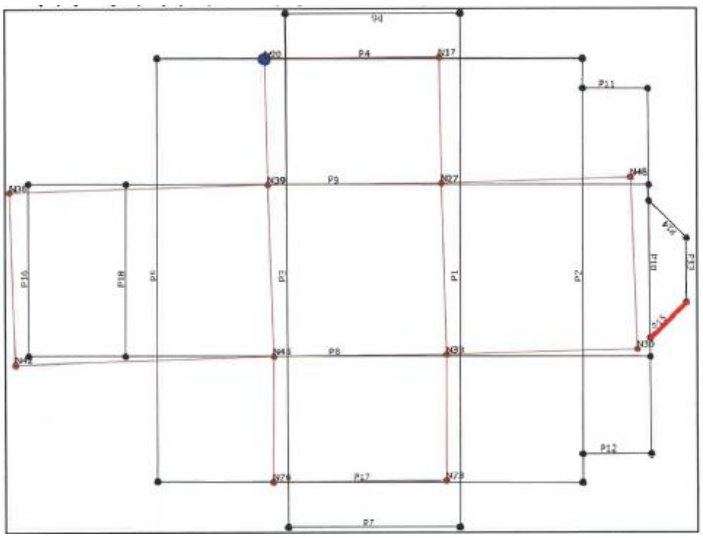
Βήμα 100 (Ικανοποίηση Απαίτησης)



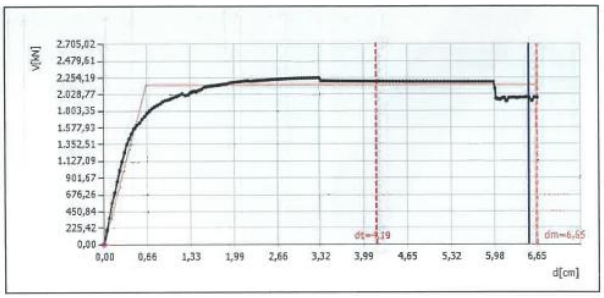
Βήμα 155



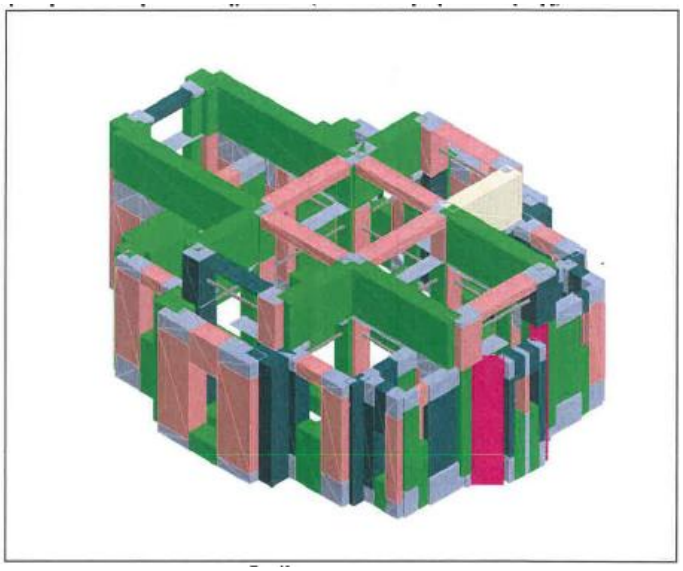
Μορφή Παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (Ανάλυση n. 13)



Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 Βήμα 100 (Ικανοποίηση Απαίτησης) – 3D Μοντέλο

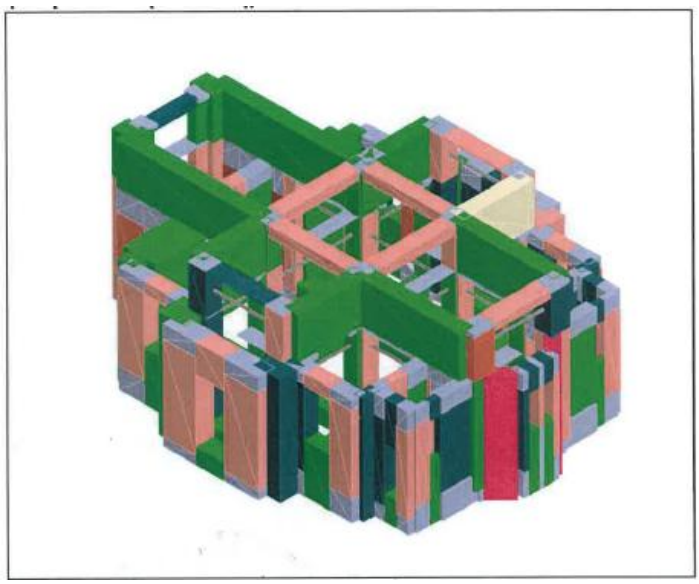


Ετικέτες αποτελεσμάτων

Τοιχοποιία

	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

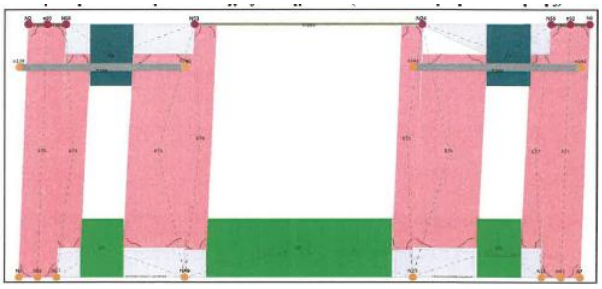
Σεισμική ανάλυση ένα n. 13 Βήμα 155 – 3D Μοντέλο



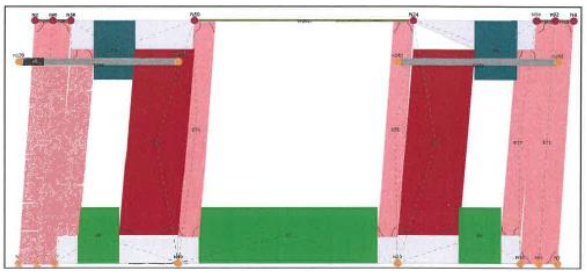
Σεισμική Ανάλυση n.6 Διεύθυνση Y

Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος 2 Βήμα 78

(Ικανοποίηση Απαίτησης)

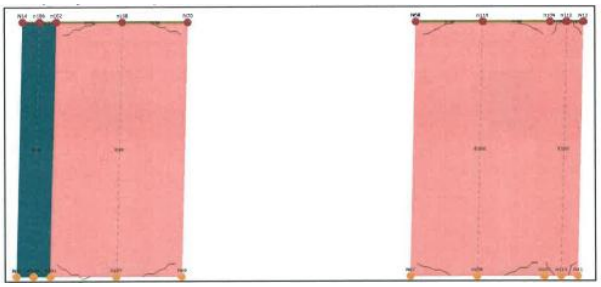


Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος 2 Βήμα 143

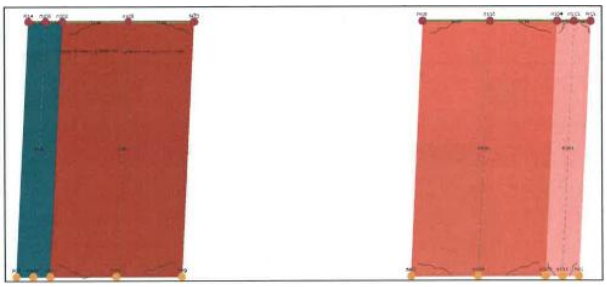


Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος 5 Βήμα 78

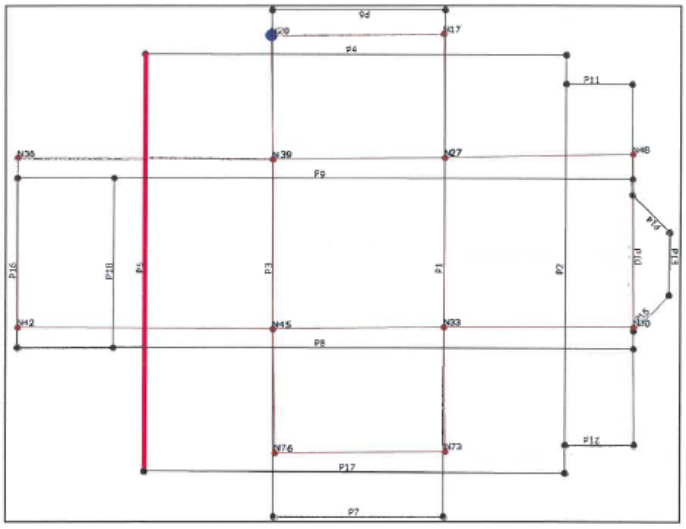
Ικανοποίηση Απαίτησης)



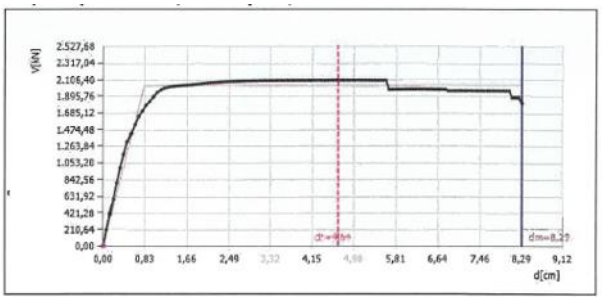
Σεισμική Ανάλυση n. 6 Τοίχος 5 Βήμα 143



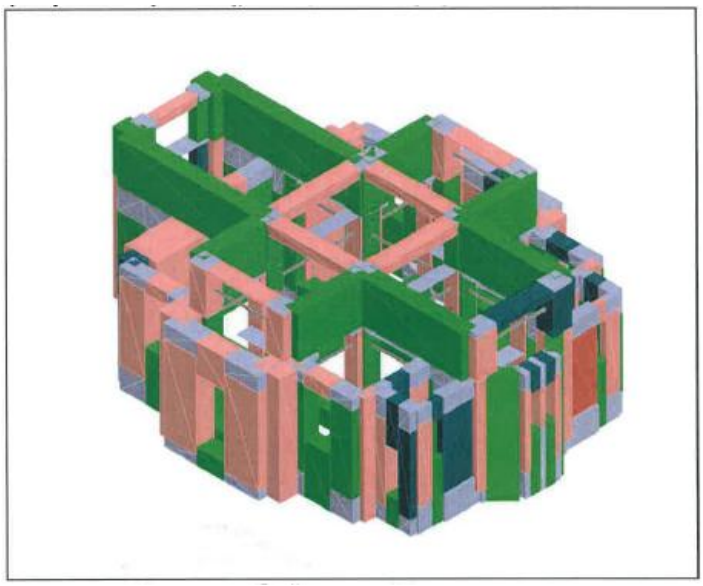
Μορφή Παραμορφωμένου φορέα σε κάτοψη



Καμπύλη Pushover (Ανάλυση n. 6)



Σεισμική ανάλυση ένα n. 6 Βήμα 78 (Ικανοποίηση Απαίτησης) – 3D Μοντέλο

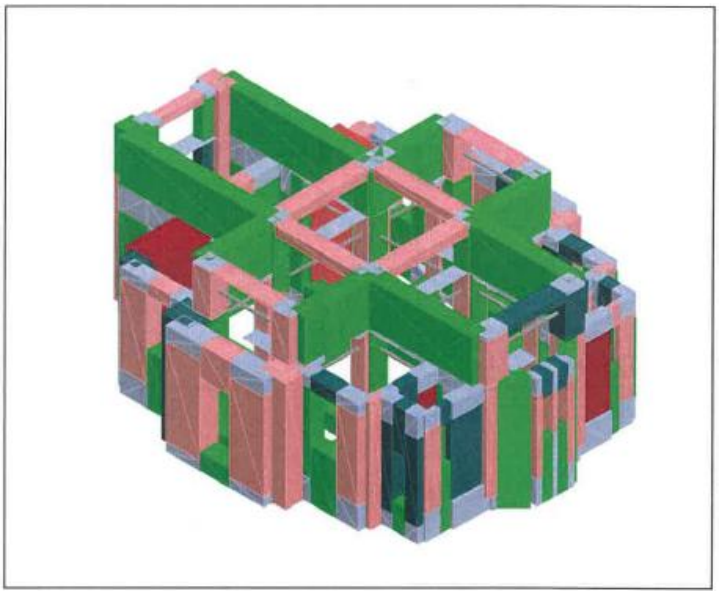


Ετικέτες αποτελεσμάτων

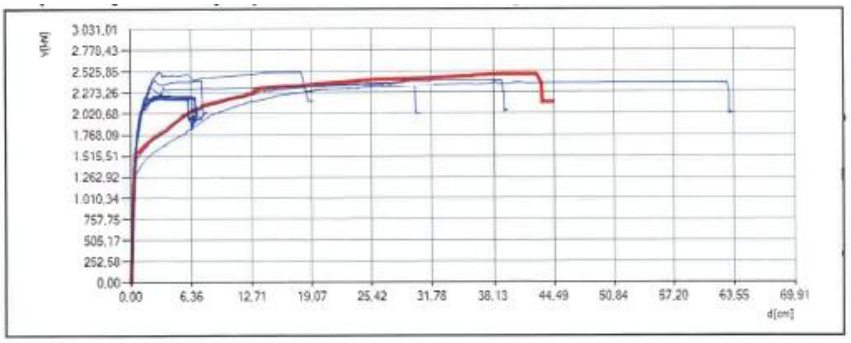
Τοιχοποιία

	Χωρίς βλάβη
	Έναρξη πλαστιμότητας
	Διατμητική βλάβη
	Έναρξη διατμητικής αστοχίας
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική βλάβη
	Έναρξη καμπτικής αστοχίας
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Σοβαρή βλάβη
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)
	Ανενεργό στοιχείο (σε εφελκ.)

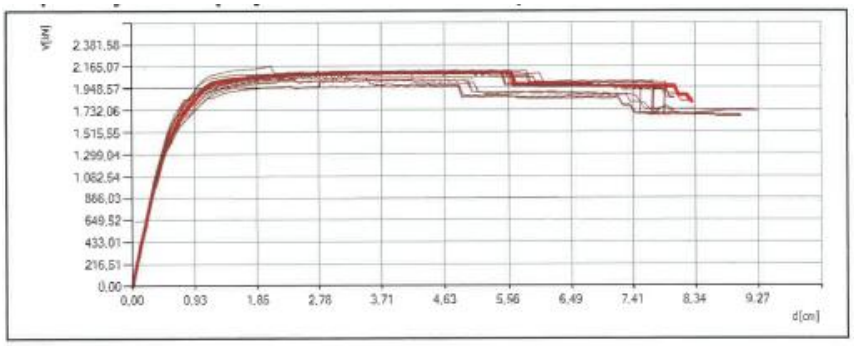
Σεισμική ανάλυση ένα n. 6 Βήμα 143 – 3D Μοντέλο



Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά X

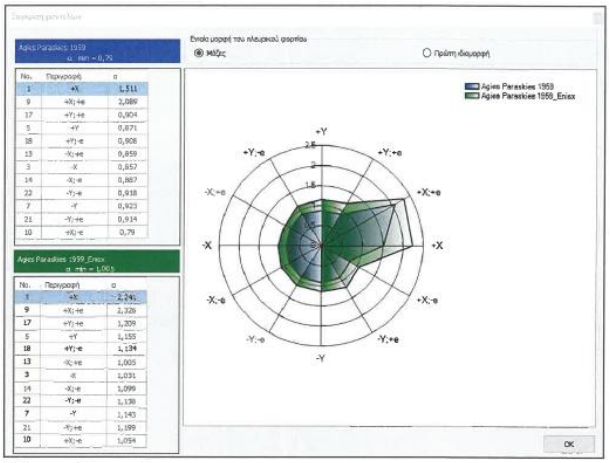


Καμπύλες Ικανότητες Pushover-Διεύθυνση κατά Y

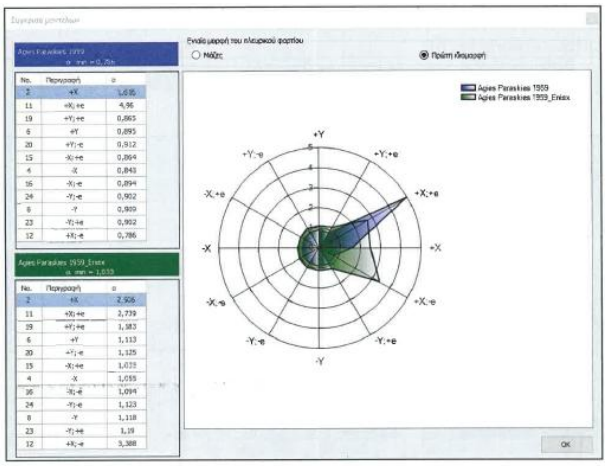


Σύγκριση συντελεστή διακύμανσης μοντέλων στάθμης επιτελεστικότητας SD

Υφιστάμενος φορές (Κανονισμός 1959)- Ενισχυμένος φορέας (Κανονισμός 1959)

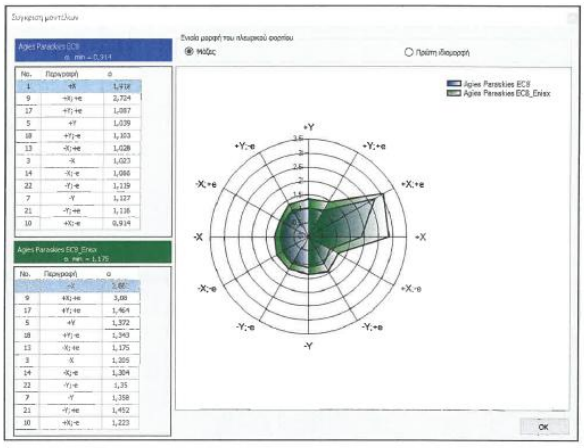


Ορθογωνική Κατανομή

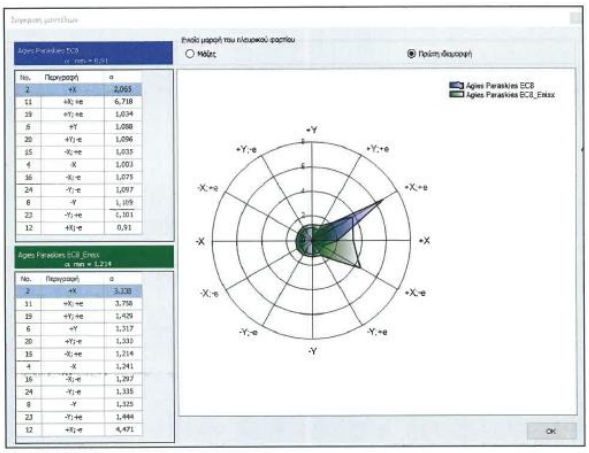


Κατανομή 1ης Ιδιομορφής

Υφιστάμενος φορές (Ευρωκώδικας 8)- Ενισχυμένος φορέας (Ευρωκώδικας 8)

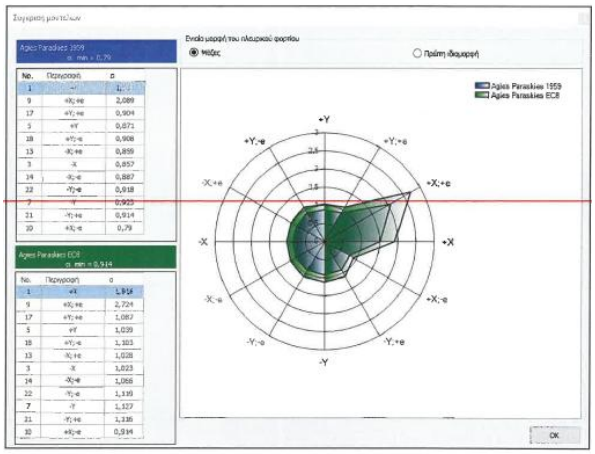


Ορθογωνική Κατανομή

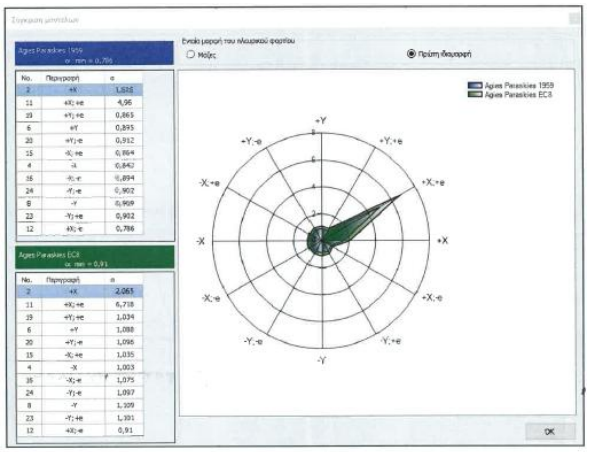


Κατανομή 1ης Ιδιομορφής

Υφιστάμενος φορές (Κανονισμός 1959) -Ενισχυμένος φορέας (Ευρωκώδικας 8)

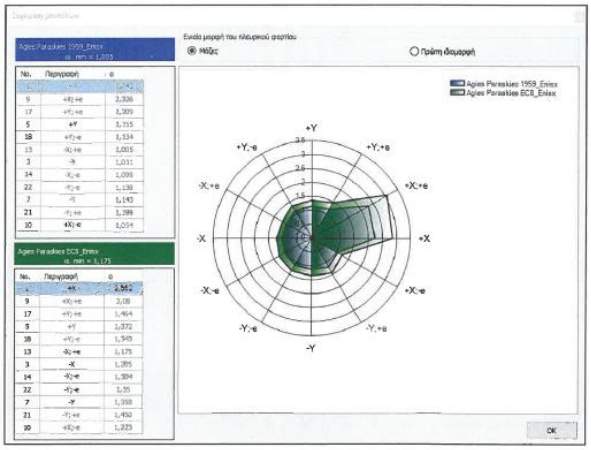


Ορθογωνική Κατανομή

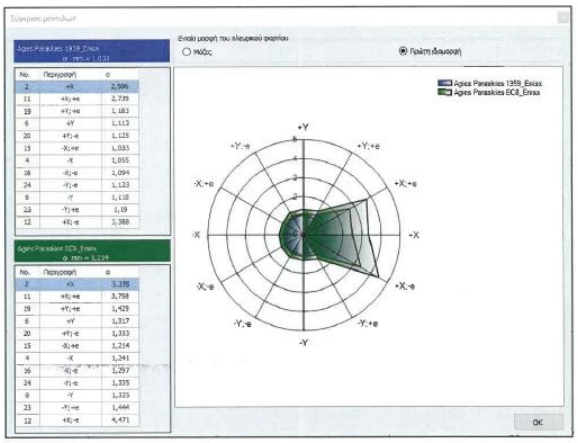


Κατανομή 1ης Ιδιομορφής

Ενισχυμένος φορέας (Κανονισμός 1959)- Ενισχυμένος φορέας (Ευρωκώδικας 8)



Ορθογωνική Κατανομή



Κατανομή 1ης Ιδιομορφής

Αξιολόγηση στατικής συμπεριφοράς φορέα

Λυγηρώτητα των τοίχων

Ο έλεγχος λιπαρότητας στον τοίχο εκτελείται με βάση την παράγραφο 5, 5, 1 4, 2 του N 1996 παύλα, ένα παύλα, ένα.

Ο λόγος λυγηροτητα ενος τοίχου από τοιχοποιία υπολογίζεται μέσω του κλάσματος h_{ef}/t_{ef} όπου:

h_{ef} : Ενεργό μήκος ύψος λογισμού του τοίχου ίσο με ρ_n*h.

t_{ef} : Ενεργό πάχος τοίχου ίσο με ρ_t*t

h: Το εσωτερικό καθαρό ύψος του ορόφου.

t: Πάχος τοίχου.

ρ_n : Μειωτικός συντελεστής (n=2,3ή4) ανάλογα με το πλήθος των δεσμευμένων πλευρών του τοίχου.

ρ_t : συντελεστής δυσκαμψίας λαμβάνοντας από τον πίνακα 5 .1 -παράγραφος 5.5 .1.3

Ο έλεγχος λίγη ρότητας ικανοποιείται όταν επαληθεύεται ότι ισχύει παρακάτω ανισότητα: $h_{ef}/t_{ef} < 27$

Έλεγχος έναντι κατακόρυφων φορτίων

Ο έλεγχος τυχόν από άοπλη τοιχοποιία υπό κυρίως κατακόρυφα φορτία, πραγματοποιείται σύμφωνα με την παράγραφο 6.1.2 του EN 1996-1-1.

αυτός ικανοποιείται όταν επαληθεύεται ότι ισχύει παρακάτω ανισότητα:

$N_{ed} \leq N_{Rd}$

Όπου:

N_{ed} : Κατακόρυφο φορτίο σχεδιασμού σε ένα τοίχο από τοιχοποιία

N_{Rd} : Αντίσταση σχεδιασμού του τοίχου έναντι κατακόρυφων φορτίων: $N_{Rd}=\Phi x\ f_d x\ A$

A: Φορτιζόμενη οριζόντια διατομή του τείχους σε τετραγωνικά μέτρα,

f_d : θλιπτική αντοχή σχεδιασμού της τοιχοποιίας, υπολογιζόμενη κατά την παράγραφο 2. 4.1 και 3. 6 .1

Φ: Μειωτικός συντελεστής αντοχής στη στέψη ή στη βάση του ή στο μέσο του ύψους του τοίχου, ανάλογα ο οποίος συνεκτιμά τις συνέπειες της λυγηρότητας και της εκκεντρότητας του φορτίου και λαμβάνεται από την παράγραφο. 6.1.2. 2.

Οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιούνται σε κάθε πεσσού των τειχών της κατασκευής στις ως άνω αναφερόμενες κύριες θέσεις, (κορυφή, μέση, πόδας) του τοίχου. Ακολουθούν οι έλεγχοι που εκτελέστηκαν για κάθε μεμονωμένο τοίχο.

Έλεγχος Τοπικών Μηχανισμών : Κινηματική Ανάλυση

Ανάλυση Τοπικών Μηχανισμών

Τύπος ανάλυσης που εκτελέστηκε.

Προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι στο υπό ανάλυση κτίριο κρίθηκε σκόπιμο να εκτελεστεί η ανάλυση ανάπτυξης πιθανών τοπικών μηχανισμό.

Οι τοπικοί μηχανισμοί είναι σημαντικοί στην περίπτωση που η συμπεριφορά του κουτιού του κτιρίου δεν είναι εγγυημένη λόγω ανεπαρκών συνδέσεων είτε μεταξύ των ορθών γωνιών τοίχων, είτε μεταξύ του δαπέδου και του τοίχου.

Μέθοδος ανάλυσης.

Οι τμηματικές καταρρεύσεις συμβαίνουν συχνά σε υπάρχοντα κτίρια. Τοιχοποιίες λόγω σεισμικών αιτιών. Γενικά, λόγω απώλειας ισορροπίας τμημάτων των τειχών, ο έλεγχος σχετικά με αυτούς τους μηχανισμούς, σύμφωνα με τις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω, αποκτά σημασία εάν είναι εγγυημένη μια ορισμένη μονολιθικότητα του τοίχου, όπως η αποφυγή κρίσιμων. Καταρρεύσαν λόγω αποσύνθεσης της τοιχοποιίας.

Οι έλεγχοι με βάση τους τοπικούς μηχανισμούς μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω της οριακής ανάλυσης στις ισορροπίες, σύμφωνα με την κινηματική προσέγγιση, η οποία βασίζεται στην επιλογή του μηχανισμού κατάρρευσης και στην αξιολόγηση της οριζόντιας δράσης που ενεργοποιεί αυτόν τον κινηματικό μηχανισμό.

Επομένως, η εφαρμογή της μεθόδου επαλήθευσης προϋποθέτει την ανάλυση των τοπικών μηχανισμών που θεωρούνται σημαντικοί για την κατασκευή, οι οποίοι μπορούν να υποτεθούν με βάση τη γνώση της σεισμικής συμπεριφοράς παρόμοιων κατασκευών ήδη κατεστραμμένων από σεισμό. Ή που έχουν εντοπιστεί λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία οποιον δήποτε ρωγμές ακόμα και εμείς σεισμικής φύσης.

Επιπλέον, θα ληφθεί υπόψη η ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ του τυχόν τοιχοποιίας, η υφή της τοιχοποιίας, η παρουσία ράβδων σύνδεσης ελκυστήρων, η αλληλεπιδράσεις με άλλα στοιχεία της κατασκευής ή προκειμένω κτηρίων, η κινηματική προσέγγιση καθιστά επίσης δυνατό τον προσδιορισμό της. Τάσεις στις οριζόντιες δράσεις και κατασκευή μπορεί προοδευτικά να αντέξει καθώς εξηγήσεις του μηχανισμός.

For each. Local mechanics consider. Significant for the building. The method is divided into the following steps.

Track transformation of a part of of the building, either a label label system, cymatic chain through the identification of rigid bodies. Define why conceivable fracture planes capable of rotating of sliding between them.

Evaluation of the horizontal load multipier a. O wait involves the activation of the mechanism through the use of the principle of virtual world.

Find the seismic activation spectral. Acceleration A Zit Sturm starting from the horizontal multiplier of the loads a 0.

Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Πλαίσιο κανονισμών.

Για τους ελέγχους και τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκαν οι διατάξεις σκηνοθεσία που περιλαμβάνουν τον παρακάτω κανονιστικό πρότυπο Ευρωκώδικας 8 [EN 1998]: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών.

Σεισμική δράση.

agR (NC) [m/s2]	agR (SD) [m/s2]	Τύπος εδάφους	S	TB [s]	TC [s]	TD [s]	I
2,40	2,40	C	1,15	0,20	0,60	2,50	1,00

Μέθοδος ελέγχου.

Near collapse (NC) Στ.Επιτ.Γ

Σε περίπτωση που ο έλεγχος αφορά με απομονωμένα στοιχεία ή τμήμα της κατασκευής στην κάθε περίπτωση που στηρίζεται ουσιαστικά στο έδαφος, η προϋπόθεση για την επιτυχή διεξαγωγή του ελέγχου σε σχέση με την άλογο οριακή κατάσταση παρέχεται από την ακόλουθη ανισότητα.

$$\alpha_z \geq \alpha_z(z=0) = S_e(T=0) = \alpha_g \cdot S$$

Σε περίπτωση που ο τοπικός μηχανισμός επηρεάζει ένα τμήμα του κτιρίου που βρίσκεται σε ορισμένο ύψος και όχι στο έδαφος, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η απόλυτη επιτάχυνση στο ύψος του τμήματος του κτιρίου που επηρεάζεται από τους σημαντικό μηχανισμό γενικά ενισχύεται σε σχέση με τον έλεγχο που θα γινόταν. Αντίστοιχα αν ήταν ο τοίχος στο έδαφος. Για το λόγο αυτό, η επιτυχία του ελέγχου παρέχεται από την ακόλουθη ανισότητα.

Επιτρέπεται να γίνεται χρήση μόνο της πρώτης κυρίαρχης ιδιόμορφης ταλάντωσης για την κύρια διεύθυνση που τότε θεωρείται ότι κ ίσον ένα.

Φάσμα ελαστικής απόκρισης στο έδαφος, αξιολογημένο για την ισοδύναμη περίοδο τ και την ισοδύναμη απόσβεση Χ 5% του εξεταζόμενου μη δομικού στοιχείου. Εγκατάστασης ή τοπικού μηχανισμού.

Και μ. Συντελεστής πραγματικής συμμετοχής της κατασκευής.

Τιμή της ιδιόμορφης το ύψωσε στη θέση του επιπέδου όπου βρίσκεται ο τοπικός μηχανισμός που χρειάζεται να ελεγχθεί.

Συνεισφορά της ιδιόμορφης στη μέγιστη επιτάχυνση του όροφ.

Ο έλεγχος στις αντίστοιχες οριακές καταστάσεις πραγματοποιείται μέσω μιας μη γραμμικής κινηματικής ανάλυσης ως προς τη μετατόπιση. Η ανάλυση με μια μη γραμμική κινηματική προσέγγιση απαιτεί την αξιολόγηση του πολλαπλασιαστή ή όχι μόνο για την αρχική διαμόρφωση της κινηματικής αλυσίδας, αλλά για τις τροποποιημένες διαμορφώσεις αντιπροσωπευτικές της κινηματικής εξελίξεις που περιγράφονται. Από τη μετατόπιση δίκαιη. Του συστήματος του κόμβου ελέγχου. Γενικά ο πολλαπλασιαστής σε ή μειώνεται προοδευτικά άσο του εμφανιστεί σε αντιστοιχία με τη μετατόπιση της σ.

Είναι απαραίτητο. Να μετατραπεί καμπύλη, πολλαπλασιαστή μετατοπίσεις που προκύπτει από την μη γραμμική κινηματική ανάλυση στην καμπύλη που σχετίζονται με τον μη γραμμικό μονοβάθμιο ταλαντωτή που περιγράφεται με όρους επιτάχυνση της μετατόπισης.

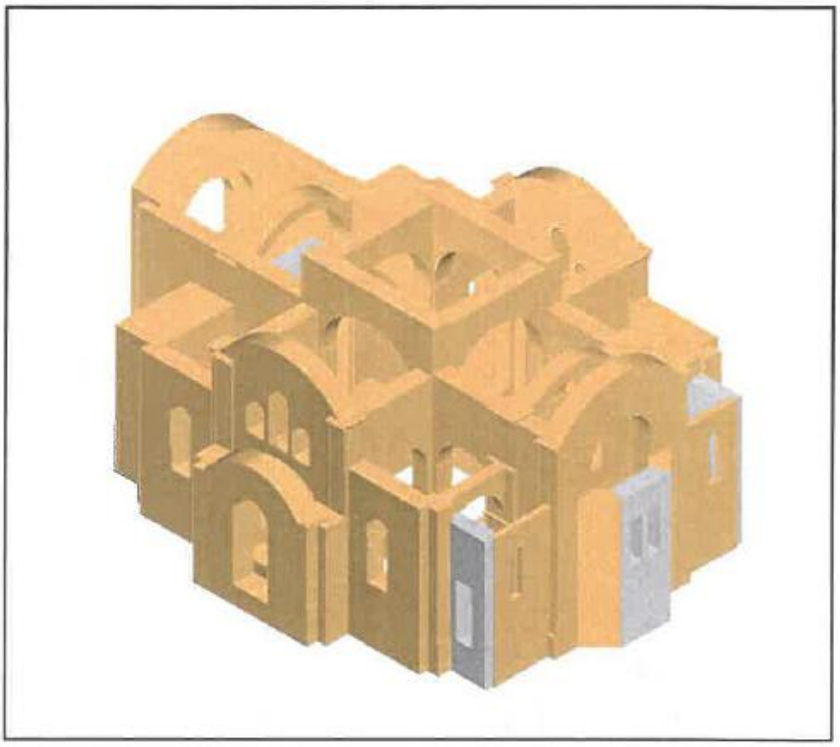
Όπου.

Αντίστοιχα υποδεικνύουν το αποτέλεσμα των δυνάμεων βάρους που ασκούνται. Μπλοκ το ίδιο βάρος του μπλοκ που εφαρμόζεται στο κέντρο βάρος του, προστίθεται στα άλλα βάρη που μεταφέρεται και το αποτέλεσμα των δυνάμεων που δεν ασκούνται στο μπλοκ, αλλά των οποίων η μάζα δημιουργεί μια οριζόντια σεισμική δύναμη σε αυτό. Καθώς δεν μεταδίδεται αποτελεσματικά σε άλλα μέρη του κτιρίου. Δηλώνει την κατακόρυφη εικονική μετατόπιση του κέντρου βάρους του ίδιου βάρους του Πικέ.

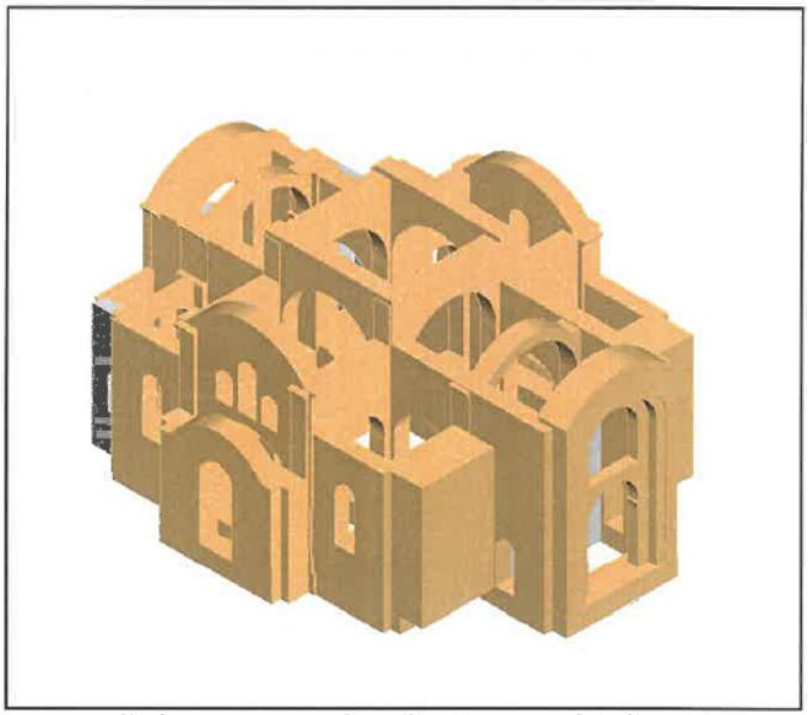
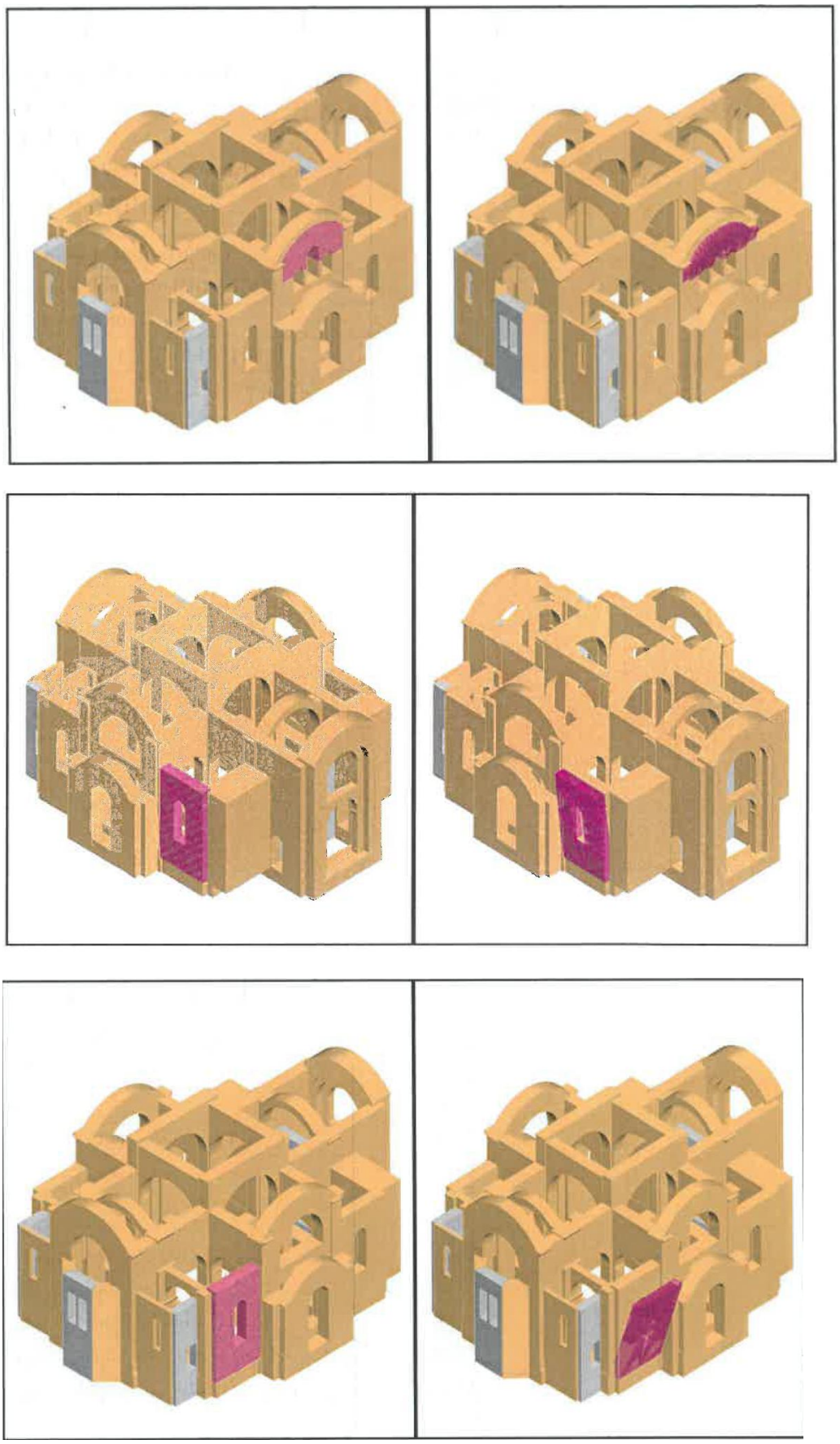
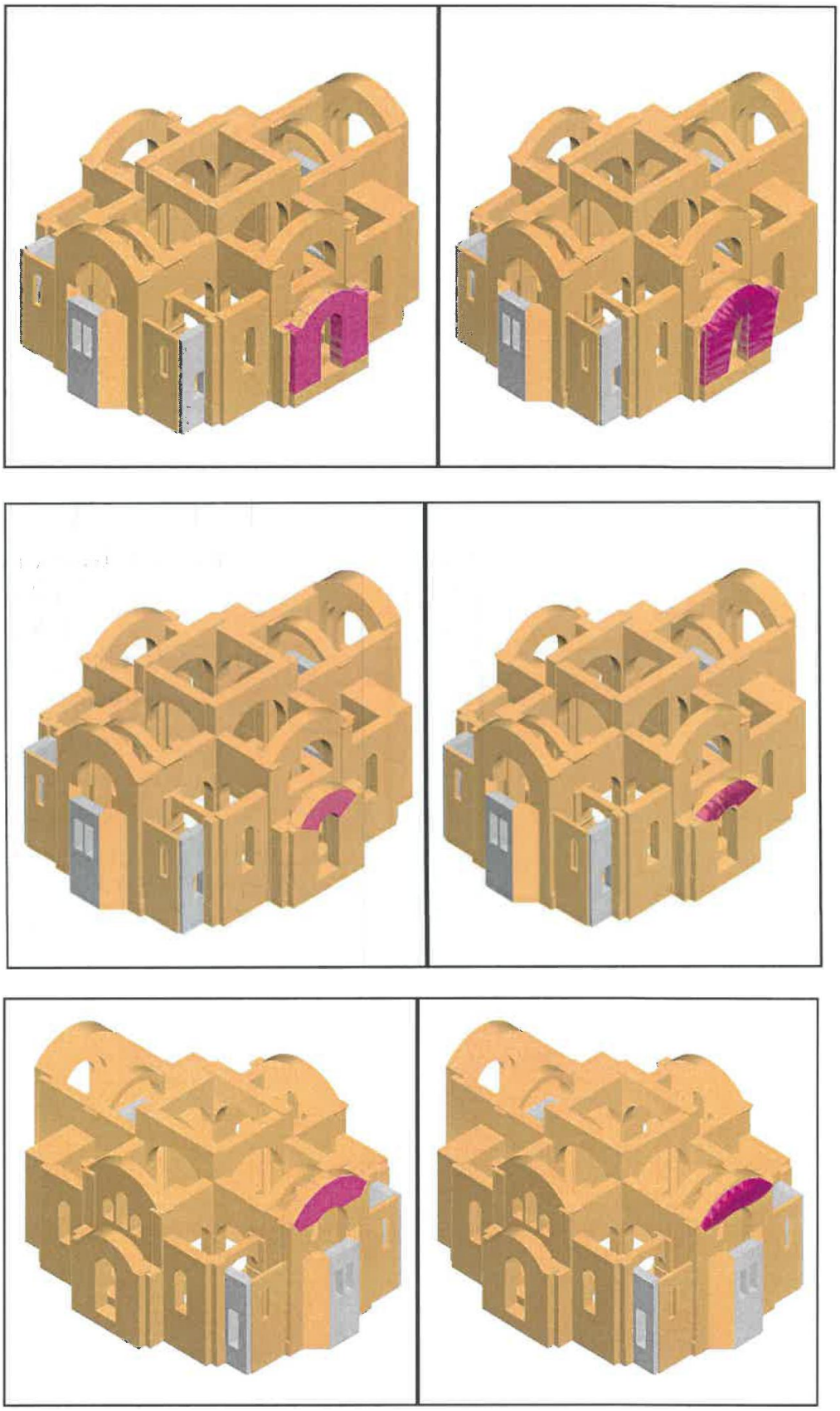
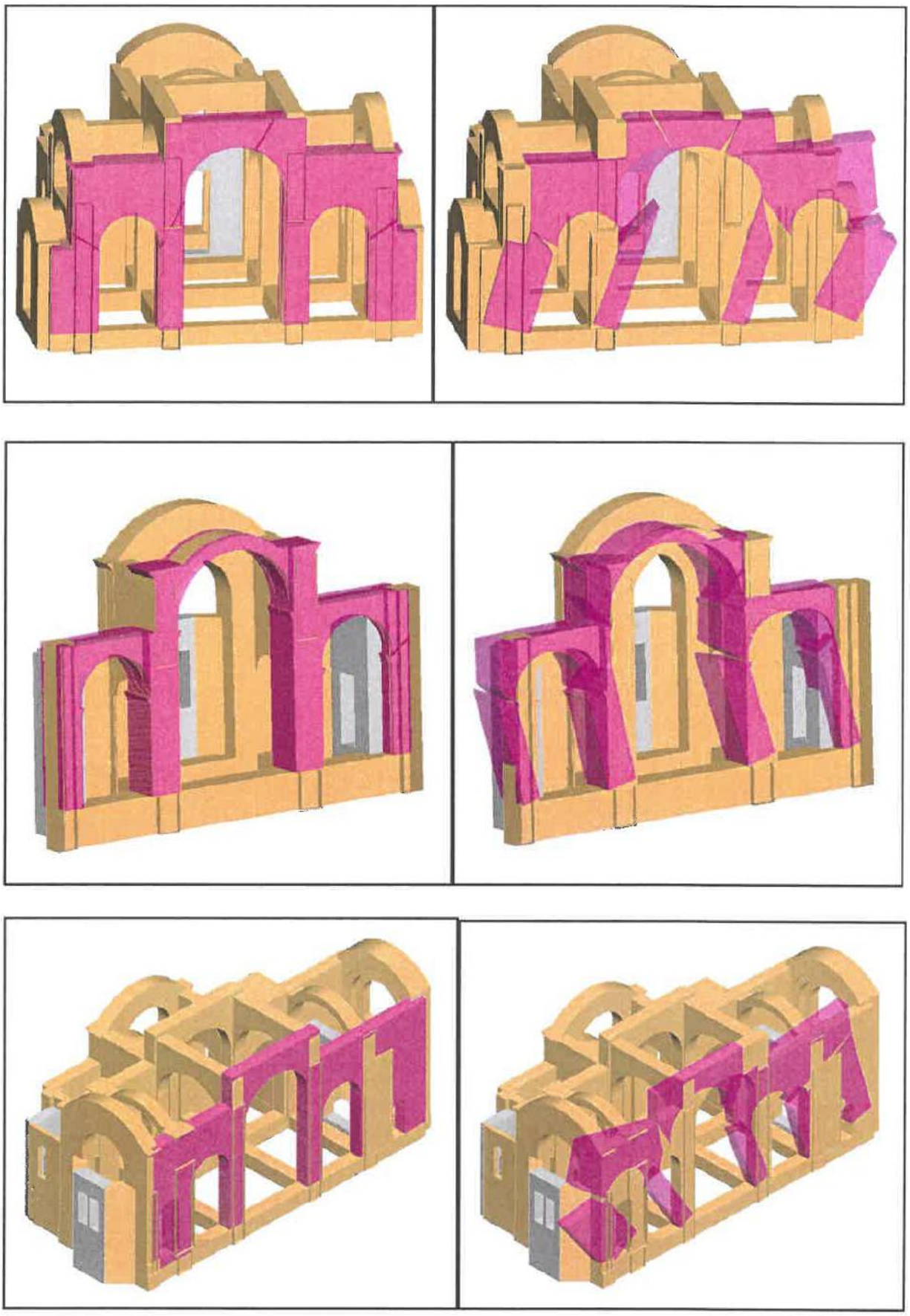
Δηλώνει την οριζόντια εικονική μετατόπιση του βάρους του κέντρου βάρους των οριζόντιων δυνάμεων που δρουν μπλοκ.

Near collapse.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται προσδιορίζοντας από την καμπύλη ικανότητας επιτάχυνσης μετατόπισης ένα δεδομένο όριο φασματικής μετατόπισης. Το DS E που σχετίζεται με την εν λόγω οριακή κατάσταση αντιστοιχεί στη μικρότερη μετατόπιση που ορίζεται με αυτόν τον τρόπο.



3D Άποψη του μοντέλου (1) – Κινηματική Ανάλυση



3D Άποψη του μοντέλου (2) – Κινηματική Ανάλυση