

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών: “Χώρος, σχεδιασμός και δομημένο περιβάλλον”**

**Διπλωματική διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης της κατεύθυνσης: “Ολοκληρωμένη προστασία ιστορικού δομημένου περιβάλλοντος με προηγμένες τεχνολογίες και υλικά”**

**Διερεύνηση του τρόπου αποκατάστασης παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία με παράλληλο στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής του συμπεριφοράς**

**Φωτίου Αφροδίτη**

**Επιβλέπουσα: Επίκουρη Καθηγήτρια Σταυρουλάκη Μαρία**

**Χανιά, Ιούνιος 2018**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης με κατεύθυνση “Ολοκληρωμένη προστασία ιστορικού δομημένου περιβάλλοντος με προηγμένες τεχνολογίες και υλικά” της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης και αφορά τη διερεύνηση του τρόπου αποκατάστασης παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία με παράλληλο στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής του συμπεριφοράς. Η τελική διαμόρφωση του θέματος έγινε με τη σημαντική συμβολή της επιβλέπουσας Επίκουρης Καθηγήτριας κ. Μαρίας Σταυρουλάκη.

Για την ολοκλήρωση του έργου αυτού οφείλω θερμές ευχαριστίες στην επιβλέπουσα Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Μαρία Σταυρουλάκη για τη στήριξη και την άψογη καθοδήγηση που παρείχε. Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης στην Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Κολοκοτσά για την καθοδήγηση της στις ενότητες που αφορούν την πρόταση ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή και τη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται σε όλους όσους συντέλεσαν στην ολοκλήρωση αυτού του κύκλου σπουδών, σε όλους τους καθηγητές και συμφοιτητές μου, όπου η συνεργασία μαζί τους κατέστησε σαφή την έννοια και την αναγκαιότητα της διεπιστημονικής συνεργασίας και κυρίως εμπλούτισε τις γνώσεις μου στον τομέα της αποκατάστασης κτιρίων.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με αγάπη και διαρκή συμπαράσταση με ενθάρρυναν στη συστηματική προσπάθεια που κατέβαλα για την επιτυχή διεκπεραίωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Αφροδίτη Φωτίου, Χανιά 2018

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία προσεγγίζεται το θέμα της αποκατάστασης παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία στην Παλιά πόλη Χανίων με παράλληλη ενσωμάτωση από τα αρχικά στάδια της μελέτης του στόχου βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη μελέτη τετραώροφου πέτρινου κτίριου με ενιαίο όγκο και ύψος στη συνοικία Τοπ-Χανά στο δυτικό τμήμα της Παλιάς πόλης Χανίων. Η εργασία διαμορφώνεται σε τρεις ενότητες.

Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την περιοχή και δίνεται μια συνολική άποψη του περιβάλλοντος στο οποίο εντάσσεται το υπό μελέτη κτίριο με στοιχεία τοπογραφίας, κλιματολογικά, γεωλογικά, σεισμοτεκτονικά αλλά και ιστορικά. Επίσης, γίνεται αναφορά στο νομοθετικό πλαίσιο και τις πολιτικές πρακτικές που αφορούν τόσο τη συντήρηση, ανάδειξη και προστασία παραδοσιακών κτιρίων και συνόλων, όσο και την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Γίνεται λεπτομερής καταγραφή και αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του υπό μελέτη κτιρίου και των προγενέστερων επεμβάσεων, καθώς και εκτίμηση των υφιστάμενων φθορών.

Η δεύτερη ενότητα εστιάζει στην στατική και δυναμική ανάλυση της υφιστάμενης κατασκευής και στην πρόταση προσθήκης μεταλλικού ανεξάρτητου σκελετού που θα φέρει τα εσωτερικά πατώματα και την οροφή του κτιρίου. Οι δύο κατασκευές – υφιστάμενη και προσθήκη - αναλύθηκαν ξεχωριστά και σε συνδυασμό για στατικά και δυναμικά φορτία, με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Marc Mentat. Παράλληλο στόχο αποτέλεσε η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του μεταλλικού σκελετού ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σημεία συναρμογής του σκελετού με την τοιχοποιία και κατά συνέπεια οι θερμογέφυρες και ο κίνδυνος αποσάθρωσης της υφιστάμενης τοιχοποιίας λόγω υγρασίας, κατά την εφαρμογή της εσωτερικής θερμομόνωσης. Για το λόγο αυτό το κέλυφος και ο μεταλλικός σκελετός μελετήθηκαν υπό σεισμική διέγερση τόσο ξεχωριστά όσο και συνδεδεμένα για δύο διαφορετικά σενάρια σύνδεσης – στην οροφή και σε κάθε όροφο.

Η τρίτη ενότητα εισάγει την έννοια της ενεργειακής αναβάθμισης ενός παραδοσιακού κτιρίου, κάνει αναφορά σε προτεινόμενες επεμβάσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα παραδοσιακό κτίριο δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στην εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης. Στην ενότητα αυτή γίνεται ταξινόμηση των συνηθέστερων θερμομονωτικών υλικών, αναλύονται οι ιδιότητές τους και η επίδραση της υγρασίας στις περιπτώσεις εφαρμογής εσωτερικής θερμομόνωσης. Με τη βοήθεια υφιστάμενης βιβλιογραφίας επιλέγονται τέσσερα προτεινόμενα συστήματα εσωτερικής θερμομόνωσης και παρουσιάζεται η δομή και οι ιδιότητές τους. Για τα τέσσερα επιλεγμένα συστήματα εσωτερικής θερμομόνωσης πραγματοποιείται υδροθερμική ανάλυση της συμπεριφοράς τους και της επίδρασης τους στο υφιστάμενο υπόστρωμα με χρήση του λογισμικού μονοδιάστατης υδροθερμικής ανάλυσης WUFI Pro.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση χρήσιμων συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της και οδηγούν σε ερωτήματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω εφαρμογές.

## **ABSTRACT**

The main goal of this thesis is to provide a study on the restoration of a traditional masonry building, by integrating in the early planning phase, energy-saving interventions. The case study is applied on a four-storey masonry building located in the west segment of the old Town of Chania in Crete. The study is composed by three main parts.

In the first part of the study general aspects of the area are outlined, including information regarding topography, climate, geology, seismotectonic and historical data. The legislative framework regarding restoration and preservation of cultural heritage and energy efficiency in the building sector, in national and European level, is also presented. The existing construction is being imprinted in detail, damages are located and the previous restoration interventions recorded.

The second part of the study focuses in the static and dynamic analysis of the existing construction and the design and analysis of a steel independent structure that will facilitate the development of the interior layout, forming the two storeys and the roof of the building. The two structures were analysed independently and linked together for both static and dynamic loads using the finite element software Marc Mentat. Aim of this procedure was the optimization of a steel structure that will have minimum penetration points to the existing envelope and thus minimum energy losses due to thermal bridges after the application of interior insulation.

The third part of the study introduces the concept of energy upgrade in historic buildings and provides suggested energy saving interventions focusing on the implementation of interior insulation. The most common thermal insulation materials are presented, their properties are analysed and the humidity impact in case of interior insulation application described. Four interior insulation scenarios are chosen from the relevant existing literature and their structure and properties presented. The hygrothermal performance of the four scenarios is simulated with the use of WUFI Pro software, which evaluates moisture conditions in building envelopes by performing one-dimensional hygrothermal calculations on building component cross-sections.

Finally, the study is completed with the extraction of useful conclusions which emerged during its development and lead to questions and suggestions for future research and further applications.



## Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων .....	7
Κατάλογος πινάκων .....	10
Εισαγωγή.....	11
1. Γενικά στοιχεία για την περιοχή .....	14
1.1 Τοπογραφία της περιοχής μελέτης.....	14
1.2 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.....	16
1.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής .....	19
1.4 Σεισμοτεκτονικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής .....	20
1.5 Ιστορικά στοιχεία για την Παλιά πόλη των Χανίων .....	20
2. Νομοθετικό πλαίσιο .....	23
2.1 Πολιτικές και πρακτικές για συντήρηση, ανάδειξη και προστασία ιστορικών κτιρίων και συνόλων .....	23
2.2 Ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα .25	
2.2.1 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία.....	26
2.2.2 Εθνική Νομοθεσία .....	27
3. Υφιστάμενη κατάσταση στο υπό μελέτη κτίριο .....	30
3.1 Ιστορική τεκμηρίωση.....	30
3.2 Αποτύπωση φθορών .....	32
3.3 Προγενέστερες επεμβάσεις .....	38
4. Στατική και ιδιομορφική ανάλυση της υφιστάμενης κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	43
4.1 Εισαγωγή γεωμετρίας .....	44
4.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας.....	45
4.3 Ιδιότητες υλικών.....	47
4.4 Διακριτοποίηση του φορέα - τύπος στοιχείων προσομοίωσης .....	48
4.5 Συνοριακές συνθήκες .....	48
4.6 Αποτελέσματα .....	50
4.6.1 Στατική ανάλυση.....	50
4.6.2 Ιδιομορφική ανάλυση.....	52
5. Πρόταση επέμβασης επανάχρησης κελύφους φέρουσας τοιχοποιίας από λιθοδομή .....	59
5.1 Βασικές παράμετροι σχεδιασμού .....	59
5.2 Πρόταση επέμβασης – εξέλιξη του φορέα .....	60

5.3 Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός – αντισεισμικός αρμός .....	60
6. Στατική και ιδιομορφική ανάλυση του εσωτερικού μεταλλικού σκελετού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	62
6.1 Εισαγωγή γεωμετρίας .....	62
6.2 Ιδιότητες υλικών.....	63
6.3 Διακριτοποίηση του φορέα - τύπος στοιχείων προσομοίωσης .....	63
6.4 Συνοριακές συνθήκες .....	63
6.5 Αποτελέσματα .....	65
6.5.1 Στατική ανάλυση.....	65
6.5.2 Ιδιομορφική ανάλυση.....	66
7. Δυναμική απόκριση κατασκευής σε πραγματικά σεισμικά γεγονότα .....	76
7.1 Ιδιότητες υλικών.....	77
7.2 Συνοριακές συνθήκες .....	78
7.3 Δυναμική απόκριση για φορείς χωρίς σύνδεση .....	81
7.4 Δυναμική απόκριση για σύνδεση των δύο φορέων .....	100
8. Ενεργειακή αναβάθμιση παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία .....	111
8.1 Εσωτερική θερμομόνωση .....	113
8.2 Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών.....	113
8.3 Ιδιότητες Θερμομονωτικών Υλικών.....	116
8.4 Επίδραση της υγρασίας στην εσωτερική θερμομόνωση .....	118
8.5 Σενάρια εσωτερικής θερμομόνωσης.....	120
9. Υδροθερμική ανάλυση της τοιχοποιίας - Το πρόγραμμα υδροθερμικής προσομοίωσης WUFI Pro .....	125
9.1 Εισαγωγή δεδομένων .....	126
9.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	131
9.3 Συμπεράσματα υδροθερμικής ανάλυσης.....	149
10. Συμπεράσματα.....	151
11. Βιβλιογραφία .....	155

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Βενετσιάνικη πυριτιδαποθήκη, παλιά πόλη Χανίων[9] .....	15
Εικόνα 2: Θέση του κτιρίου στην παλιά πόλη Χανίων .....	15
Εικόνα 3: Το υπό μελέτη κτίριο αποτελεί γωνιακό κτίριο στο οικοδομικό τετράγωνο .....	16
Εικόνα 4: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Θερμοκρασία) .....	17
Εικόνα 5: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Υγρασία) .....	18
Εικόνα 6: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Βροχόπτωση) .....	18
Εικόνα 7: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Ένταση Ανέμου) .....	19
Εικόνα 8: Φύλλο Χάρτου Χανίων (ΙΓΜΕ 1972) .....	19
Εικόνα 9: Πολεοδομική μελέτη Ρωμανού – Καλλιγιά, 1977[15] .....	22
Εικόνα 10: Το υπό μελέτη κτίριο (νότια και δυτική όψη) .....	30
Εικόνα 11: Νότια όψη του κτιρίου από προγενέστερη αποτύπωση (Παπαμαρκάκη – Καραβιτάκη Φωτεινή 1989-1990) .....	31
Εικόνα 12: Δυτική όψη του κτιρίου από προγενέστερη αποτύπωση (Παπαμαρκάκη – Καραβιτάκη Φωτεινή 1989-1990) .....	32
Εικόνα 13: Μαύρη κρούστα λόγω βιολογικών επιδράσεων .....	33
Εικόνα 14: Ανοδική υγρασία – φαινόμενα κρυπτοεξάνθησης .....	34
Εικόνα 15: Κυψέλωση - στρογγυλοποίηση .....	35
Εικόνα 16: Απώλεια υλικού λόγω μηχανικών καταπονήσεων .....	36
Εικόνα 17: Κατάρρευση τμήματος της βορινής όψης .....	36
Εικόνα 18: Κατάρρευση τμήματος της βορινής όψης μέχρι το παράθυρο του τελευταίου ορόφου .....	37
Εικόνα 19: Θραύση λίθινων γείσων και πήλινης υδρορροής. ....	37
Εικόνα 20: Σωληνίσκοι εφαρμογής ενεμάτων και δοκάρι οπλισμένου σκυροδέματος .....	38
Εικόνα 21: Βαθύ αρμολόγημα που διατηρείται σε καλή κατάσταση σε μεγάλο ποσοστό της τοιχοποιίας .....	39
Εικόνα 22: Τοπική επισκευή με τσιμεντοκονίαμα .....	39
Εικόνα 23: Αποτύπωση φθορών και προγενέστερων επεμβάσεων νότια όψη .....	40
Εικόνα 24: Αποτύπωση φθορών και προγενέστερων επεμβάσεων ανατολική όψη .....	41
Εικόνα 25: Αποτύπωση φθορών και προγενέστερων επεμβάσεων βόρεια όψη .....	42
Εικόνα 26: Απεικόνιση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, νοτιοανατολική όψη .....	44
Εικόνα 27: Εισαγωγή της γεωμετρίας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων .....	45
Εικόνα 28: Απεικόνιση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με βάση τα υλικά .....	47
Εικόνα 29: Ιδίο βάρος της κατασκευής .....	49
Εικόνα 30: Έδραση της κατασκευής .....	49
Εικόνα 31: Στήριξη του κτιρίου σε γειτονικές κατασκευές .....	50
Εικόνα 32: Συνολικές μετατοπίσεις (displacement) .....	51
Εικόνα 33: Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα .....	51
Εικόνα 34: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principle Stress Max) .....	52
Εικόνα 35: Οι 10 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής και η συνολική μετατόπιση που προκύπτει για κάθε μια από αυτές .....	57
Εικόνα 36: Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ταλάντωσης – ομοιόμορφη δοκός πρόβολος[34] .....	58
Εικόνα 37: Μοντέλο εσωτερικού μεταλλικού σκελετού .....	60
Εικόνα 38: Μοντέλο μεταλλικού φορέα .....	62
Εικόνα 39: Ιδίο βάρος της κατασκευής .....	63
Εικόνα 40: Έδραση της κατασκευής .....	64
Εικόνα 41: Επιβολή μόνιμου και ωφέλιμου φορτίου .....	65
Εικόνα 42: Συνολικές μετατοπίσεις (displacement) .....	66

Εικόνα 43: Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα .....	66
Εικόνα 44: Οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τριών διεγέρσεων .....	77
Εικόνα 45: Εισαγωγή του πίνακα διεγέρσης της βάσης της κατασκευής σύμφωνα με πραγματικά σεισμικά γεγονότα .....	79
Εικόνα 46: Σενάριο 1 <sup>ο</sup> – συννοριακή συνθήκη μεσοτοιχίας .....	80
Εικόνα 47: Σενάριο 2 <sup>ο</sup> – χωρίς συννοριακή συνθήκη μεσοτοιχίας .....	80
Εικόνα 48: Οι τρεις τομές παρακολούθησης των μετατοπίσεων .....	81
Εικόνα 49: Σημεία παρακολούθησης χρονοϊστοριών μετατόπισης στο κέλυφος (κόμβοι S1:9439 και S2:12539) .....	82
Εικόνα 50: Σημεία παρακολούθησης χρονοϊστοριών μετατόπισης στον μεταλλικό σκελετό (κόμβοι S3:145 και S4:97) .....	82
Εικόνα 51: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Αθήνα 1999 .....	89
Εικόνα 52: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Αθήνα 1999 .....	89
Εικόνα 53: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Κέλυφος – Χανιά 1994 .....	93
Εικόνα 54: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Μεταλλικός σκελετός – Χανιά 1994 .....	93
Εικόνα 55: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Κέλυφος – Ιρπίνια 1980 .....	96
Εικόνα 56: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Μεταλλικός σκελετός – Ιρπίνια 1980 .....	96
Εικόνα 57: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) κατά τον άξονα Χ .....	97
Εικόνα 58: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) κατά το άξονα Υ .....	98
Εικόνα 59: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) κατά το άξονα Ζ .....	99
Εικόνα 60: Σύνδεση τοιχοποιίας μεταλλικού σκελετού με στερεές συνδέσεις: σενάριο 1. στην οροφή, σενάριο 2. στο ύψος κάθε ορόφου .....	100
Εικόνα 61: Χρονοϊστορία μέγιστων κύριων τάσεων του κόμβου 3070 για τις τρεις συνθήκες σύνδεσης .....	109
Εικόνα 62: Ενεργειακή αναβάθμιση ιστορικού κτιρίου με εσωτερική θερμομόνωση στην πρόσοψη και εξωτερική στην πίσω όψη. Η ανάγκη για θέρμανση μπορεί να μειωθεί έως και 80% χωρίς να αλλοιωθούν τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του κτιρίου[39] .....	112
Εικόνα 63: Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και συμβατότητα με τις αρχές προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς[39] .....	112
Εικόνα 64: Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών[40] .....	114
Εικόνα 65: Επίδραση της εσωτερικής θερμομόνωσης στην συγκέντρωση υγρασίας στην τοιχοποιία[44] .....	118
Εικόνα 66: Σύστημα εσωτερικής θερμομόνωσης διαπερατό σε υδρατμούς[45] .....	119
Εικόνα 67: Εφαρμογή του συστήματος εσωτερικής θερμομόνωσης με χρήση εύκαμπτης στρώσης από ίνες ξύλου, ώστε να αποφευχθεί - εν ξηρώ - η ύπαρξη κενών μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης χωρίς να χρειάζεται εξομάλυνση της επιφάνειας εφαρμογής[49] .....	122
Εικόνα 68: Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος WUFI Pro .....	126
Εικόνα 69: Βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος Wufi Pro .....	127
Εικόνα 70: Προσανατολισμός, κλίση και έκθεση δομικού στοιχείου στη βροχή .....	128
Εικόνα 71: Χάρτης κλιματολογικών δεδομένων .....	129
Εικόνα 72: Ανάλυση κλιματολογικών δεδομένων .....	130
Εικόνα 73: Υγροθερμικά δεδομένα για τον εσωτερικό χώρο .....	131
Εικόνα 74: Περιεχόμενη υγρασία στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας - μόνωσης – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων .....	133
Εικόνα 75: Σχετική υγρασία στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας – μόνωσης – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων .....	134
Εικόνα 76: Διαγράμματα 'Isopleths' για τα πέντε σενάρια μελέτης – διεπιφάνεια τοιχοποιίας – θερμομόνωσης .....	136

Εικόνα 77: Περιεχόμενη υγρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων και του σεναρίου 0 (απουσία θερμομόνωσης).....	138
Εικόνα 78: Σχετική υγρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων και του σεναρίου 0 (απουσία θερμομόνωσης).....	139
Εικόνα 79: Διαγράμματα 'Isopleths' για τα πέντε σενάρια μελέτης – εσωτερική επιφάνεια τοιχοποιίας.....	141
Εικόνα 80: Ο δείκτης ανάπτυξης μούχλας για τα τέσσερα σενάρια μελέτης μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης .....	143
Εικόνα 81: Ο δείκτης ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας για τα τέσσερα σενάρια και το σενάριο 0 (απουσία θερμομόνωσης) .....	143
Εικόνα 82: Επιφανειακή θερμοκρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων και του σεναρίου 0 (χωρίς θερμομόνωση) .....	145
Εικόνα 83: Τιμές θερμοπερατότητας – συγκεντρωτικός πίνακας.....	146
Εικόνα 84: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 0 – Χωρίς θερμομόνωση .....	147
Εικόνα 85: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 1 – Ορυκτοβάμβακας .....	147
Εικόνα 86: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 2 – Μόνωση πυριτικού ασβεστίου.....	148
Εικόνα 87: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 3 – Σύστημα μόνωσης iQ-Therm .....	148
Εικόνα 88: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 4 – Μόνωση από ίνες ξύλου.....	148

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Διασταύρωση δεδομένων μηχανικών χαρακτηριστικών από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία .....	46
Πίνακας 2: Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών.....	47
Πίνακας 3: Γεωμετρικές ιδιότητες της μεταλλικής δοκού IPE200.....	62
Πίνακας 4: Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών.....	63
Πίνακας 5: Οι 20 ιδιοσυχνότητες που διεγείρουν τον μεταλλικό φορέα .....	67
Πίνακας 6: Ιδιοσυχνότητες, μέγιστες μετατοπίσεις και συμμετοχή των μαζών (Modal mass) της φέρουσας τοιχοποιίας .....	75
Πίνακας 7: Ιδιοσυχνότητες, μέγιστες μετατοπίσεις και συμμετοχή των μαζών (Modal mass) του μεταλλικού σκελετού .....	75
Πίνακας 8: Μηχανικά χαρακτηριστικά φέρουσας τοιχοποιίας.....	78
Πίνακας 9: Μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες του κελύφους και του μεταλλικού σκελετού για τα τρία σεισμικά γεγονότα.....	83
Πίνακας 10: Μέγιστες μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες για τα τρία σεισμικά γεγονότα .....	86
Πίνακας 11: Διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες – Αθήνα 1999.....	87
Πίνακας 12: Διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες – Χανιά 1994.....	91
Πίνακας 13: Διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες – Ιρπίνια 1980.....	94
Πίνακας 14: Μετατοπίσεις κατά τους τρεις κύριους άξονες για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης .	101
Πίνακας 15: Μέγιστες μετατοπίσεις κατά τους τρεις κύριους άξονες για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης .....	102
Πίνακας 16: Διαγράμματα μετατοπίσεων στον άξονα X για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές .....	103
Πίνακας 17: Διαγράμματα μετατοπίσεων στον άξονα Y για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές .....	104
Πίνακας 18: Διαγράμματα μετατοπίσεων στον άξονα Z για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές.....	106
Πίνακας 19: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) στους τρεις κύριους άξονες για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης .....	107
Πίνακας 20: Μέγιστες κύριες τάσεις για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης .....	109
Πίνακας 21: Υλικά θερμομόνωσης.....	114
Πίνακας 22: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα[47] .....	120
Πίνακας 23: Προτεινόμενα σενάρια εσωτερικής θερμομόνωσης .....	124
Πίνακας 24: Περιγραφή του ρυθμού ανάπτυξης μούχλας με χρήση της κλίμακας ‘Mould Index’ .....	141
Πίνακας 25: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοπερατότητας σύγκριση με τον συντελεστή θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου .....	146
Πίνακας 26: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων υδροθερμικής ανάλυσης για τα τέσσερα υπό μελέτη σενάρια.....	150
Πίνακας 27: Μέγιστες μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες για τα τρία σεισμικά γεγονότα.....	152

## Εισαγωγή

Η ιστορική κληρονομιά ενός τόπου συνδέει το κοινωνικό σύνολο που τον κατοικεί με αξίες όπως η συλλογική ταυτότητα και η μνήμη. Ως κάτοικοι της γηραιάς ηπείρου οφείλουμε να διαφυλάξουμε αυτή την πολιτιστική κληρονομιά και να διδαχθούμε από αυτή. Στατιστικά στοιχεία φανερώνουν ότι υπάρχει ένα αξιόλογο κτιριακό απόθεμα ηλικίας άνω των 70 ετών που σίγουρα έχει ανάγκη από εργασίες αποκατάστασης και ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και των μηχανικών συστημάτων του. Πιο συγκεκριμένα στην ΕΕ-27 εκτιμάται ότι το 14% των υφιστάμενων κτιρίων έχουν χρονολογία κατασκευής πριν το 1919 και επιπλέον 12% από το 1920 έως το 1945[1].

Παράλληλα, ο κτιριακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 40% περίπου της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο και το 36% των εκπομπών CO<sub>2</sub>[2]. Κατά συνέπεια, μια αύξηση στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο στις προσπάθειες για τη μείωση της εξάρτησης της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας και την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας για το 2020.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων δίνει τη δυνατότητα εξαίρεσης των ιστορικών κτιρίων από κάποιες προδιαγραφές για την αύξηση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας[3]. Αυτό δεν πρέπει να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα ιστορικά κτίρια δεν επιδέχονται επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Η συντήρηση και επανάχρηση των ιστορικών κτιρίων είναι ο πιο σίγουρος τρόπος διαφύλαξής τους και η ενεργειακή τους αναβάθμιση συμβάλλει στην προστασία των δομικών τους μελών, προσφέρει συνθήκες άνεσης για τους χρήστες και μειώνει τα λειτουργικά έξοδα του κτιρίου. Η οποιαδήποτε επέμβαση σε ένα παραδοσιακό/διατηρητέο κτίριο είναι όμως σημαντικό να υπακούει στις σύγχρονες αντιλήψεις αποκατάστασης μνημείων όπως αυτές περιγράφονται στο διεθνώς αποδεκτό πλαίσιο αρχών του Χάρτη της Βενετίας (1964) και περιλαμβάνουν την αρχή της ελάχιστης δυνατής επέμβασης και τροποποίησης του αρχικού δομήματος και τον σεβασμό του αυθεντικού υλικού με χρήση υλικών που να είναι αβλαβή και συμβατά προς τα αυθεντικά[4].

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση του τρόπου αποκατάστασης παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία με παράλληλο στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής του συμπεριφοράς. Σύμφωνα με τους Ιvanonίć-Šekularac, J. A., et al, είναι εφικτή η αύξηση της ενεργειακής εξοικονόμησης και αποδοτικότητας κατά την αποκατάσταση ιστορικών κτιρίων με παράλληλη διατήρηση της αυθεντικής τους όψης και σε αρμονία με το περιβάλλον στο οποίο εντάσσονται. Η ενεργειακή αποκατάσταση δε συνεπάγεται μόνο εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και διατήρηση των υλικών και χαρακτηριστικών της ιστορικής κατασκευής[5]. Κλειδί για μια επιτυχή ενεργειακή αναβάθμιση ιστορικού κτιρίου, σύμφωνα με τους Hensley, J. E. et al., είναι η κατανόηση των υφιστάμενων χαρακτηριστικών εξοικονόμησης ενέργειας της κατασκευής με σκοπό τη διατήρηση και την εκμετάλλευσή τους σε συνδυασμό με τα πρόσθετα μέτρα εξοικονόμησης[6]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως μελέτη περίπτωσης παραδοσιακό πέτρινο κτίριο που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της παλιάς πόλης Χανίων, στη συνοικία Τοπ-Χανά ή Τοπανά. Το υπό μελέτη κτίριο είναι τετραώροφο με ενιαίο όγκο και ύψος, έχει ανακηρυχθεί 2<sup>ου</sup> βαθμού μνημειακής προστασίας με προστατευόμενο τμήμα ολόκληρη την όψη και δεν διαθέτει στέγη και ενδιάμεσα

πατώματα σίγουρα από το 1985. Στο κτίριο είναι εμφανή αρχιτεκτονικά στοιχεία ενετοκρατίας και νεοκλασικής ελληνικής αρχιτεκτονικής 18<sup>ου</sup>-19<sup>ου</sup> αιώνα[7]. Οι τελευταίες σωστικές επεμβάσεις έγιναν στο κτίριο το 2003 και περιελάμβαναν τσιμεντενέσεις και αρμολόγημα.

Ειδικό βάρος στην παρούσα εργασία θα δοθεί στον συγκερασμό των δύο διαφορετικών πεδίων, της αποκατάστασης και της ενεργειακής αναβάθμισης και πως μπορούν αυτά βέλτιστα να συνεργαστούν, από αρχικό στάδιο κατά το σχεδιασμό των επεμβάσεων, ώστε να προκύψει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για τη διατήρηση ενός ιστορικού κτιρίου με ταυτόχρονη αύξηση της ενεργειακής του αποδοτικότητας. Πιο συγκεκριμένα αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η στατική και δυναμική ανάλυση της υφιστάμενης κατασκευής και του εσωτερικού μεταλλικού φορέα που σχεδιάστηκε, για την εξυπηρέτηση των αναγκών επανάχρησης του κτιρίου, με τρόπο ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο τα σημεία συναρμογής του σκελετού με το υφιστάμενο κέλυφος, άρα και τα σημεία δημιουργίας θερμογεφυρών που θα προκύψουν κατά την εφαρμογή της εσωτερικής θερμομόνωσης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε υδροθερμική ανάλυση της τοιχοποιίας, μετά από την εφαρμογή τεσσάρων συστημάτων εσωτερικής θερμομόνωσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά, για την επιλογή του συστήματος που θα προσφέρει το βέλτιστο συνδυασμό ενεργειακής εξοικονόμησης και διατήρησης του υφιστάμενου υλικού.

Η εργασία διαρθρώνεται σε 10 κεφάλαια, στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης που περιλαμβάνουν, τοπογραφία της περιοχής, κλιματολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, σεισμοτεκτονικά δεδομένα και ιστορικά στοιχεία για την παλιά πόλη Χανίων.

Το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αποτελεί σύνοψη του νομοθετικού πλαισίου, σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο, σχετικά με τη συντήρηση, ανάδειξη και προστασία ιστορικών κτιρίων και συνόλων και την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η υφιστάμενη κατάσταση στο υπό μελέτη κτίριο με ιστορική τεκμηρίωση, αποτύπωση φθωρών και προγενέστερων επεμβάσεων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης του κτίσματος με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Marc Mentat καθώς και τα αποτελέσματα της στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης με το λογισμικό αυτό.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρόταση δημιουργίας εσωτερικού μεταλλικού φορέα με στόχο την επανάχρηση του κελύφους. Ο σχεδιασμός του μεταλλικού φορέα αναπτύχθηκε με στόχο να λειτουργεί στατικά αυτόνομα σε σχέση με το υφιστάμενο κέλυφος και να ελαχιστοποιεί τα σημεία συναρμογής με την τοιχοποιία άρα και τη δημιουργία γεωμετρικών θερμογεφυρών.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η στατική και ιδιομορφική ανάλυση του μεταλλικού σκελετού με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η καταπόνηση του υφιστάμενου κελύφους, του μεταλλικού σκελετού και του συνδυασμού των δύο φορέων σε 3 πραγματικά γεγονότα σεισμών και για τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης και συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη δυναμική ανάλυση του κτιρίου.

Στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η ενεργειακή αναβάθμιση ενός παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία δίνοντας έμφαση στην εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης, τις ιδιότητες των



θερμομονωτικών υλικών και την επίδραση της υγρασίας στην εσωτερική θερμομόνωση. Επίσης στο ίδιο κεφάλαιο αποφασίζονται και τα τέσσερα προτεινόμενα σενάρια εσωτερικής θερμομόνωσης που θα αναλυθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υδροθερμικής ανάλυσης για τα τέσσερα σενάρια εσωτερικής θερμομόνωσης με χρήση του προγράμματος υδροθερμικής προσομοίωσης WUFI Pro και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτό το τμήμα της εργασίας.

Τέλος, στο 10<sup>ο</sup> κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα όλης της εργασίας και προτείνονται αντικείμενα και τρόποι περαιτέρω έρευνας.

## 1. Γενικά στοιχεία για την περιοχή

### 1.1 Τοπογραφία της περιοχής μελέτης

Η Παλιά πόλη Χανίων βρίσκεται στο κέντρο της σημερινής πόλης των Χανίων και αποτελεί το βόρειο σύνορο της. Η περιοχή της Παλιάς πόλης περιβάλλεται προς βορρά από τη θάλασσα και προς τις άλλες διευθύνσεις από τις τάφρους που είναι τμήμα των μεσαιωνικών οχυρώσεων της πόλης. Η Παλιά πόλη Χανίων καταλαμβάνει μια έκταση περίπου 500 στρεμμάτων.

Η περιοχή πιστεύεται ότι αρχικά ήταν κατά το μεγαλύτερο της μέρος σχεδόν επίπεδη με μια ελαφρά κλίση προς το νότο. Τη μόνη φυσική ανωμαλία του εδάφους αποτελεί στο κέντρο της ο λόφος Καστέλι με ύψος 20 μέτρα περίπου. Η σημερινή τοπογραφία της περιοχής έχει αλλοιωθεί ως προς την αρχική λόγω των οχυρωματικών έργων που κατασκευάσθηκαν τον 16<sup>ο</sup> αιώνα. Το τείχος που περιέβαλλε την περιοχή από ανατολικά, δυτικά και νότια είχε μέσο ύψος 15 μέτρων από τη θάλασσα και εξωτερικά εξοπλίσθηκε με τάφρο μέσου πλάτους 40 μέτρων. Στην εσωτερική παρειά του τείχους και σε επαφή με αυτό διασώζεται ακόμα και σήμερα στο ανατολικό και δυτικό τμήμα του ένας χαμηλός λόφος-λωρίδα που αποτελεί τα εναπομείναντα τμήματα των αναχωμάτων του τείχους που προήλθαν από την εκσκαφή της τάφρου.

Στην βόρεια πλευρά της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε ένας μικρός φυσικός κόλπος που αποτελεί το λιμάνι της Παλιάς πόλης και συνίσταται από δύο λεκάνες την εσωτερική και την εξωτερική. Η εσωτερική λεκάνη, προς την ανατολική πλευρά του λιμανιού, προστατεύεται καλύτερα από τους ισχυρούς βόρειους και βορειοδυτικούς ανέμους που επικρατούν στην περιοχή λόγω της κατασκευής του ενετικού λιμενοβραχίονα μήκους 600 περίπου μέτρων[8].

Το υπό μελέτη κτίριο είναι κτισμένο στη συνοικία Τοπχανάς/ Τοπανάς, στα βορειοδυτικά της πόλης, που πήρε το όνομά της από τη βενετσιάνικη πυριτιδαποθήκη (τούρκικα: Top-Hane) (Εικόνα 1) στην αρχή της οδού Θεοτοκοπούλου.



Εικόνα 1: Βενετσιάνικη πυριτιδαποθήκη, παλιά πόλη Χανίων[9]

Στον Τοπχανά βρίσκονται και μερικά από τα πιο σημαντικά μνημεία και κτίσματα των Χανίων όπως το Ναυτικό Μουσείο Κρήτης, το φρούριο Φιρκά, η μονή του Σαν Σαλβατόρε με τη Βυζαντινή Συλλογή της πόλης, ένα παλιό οθωμανικό λουτρό και η Παναγία των Ρενιέ.

Το υπό μελέτη κτίριο βρίσκεται στην οδό Αγγέλου (Εικόνες 2,3) και είναι τετραώροφο με ενιαίο όγκο και ύψος.



Εικόνα 2: Θέση του κτιρίου στην παλιά πόλη Χανίων

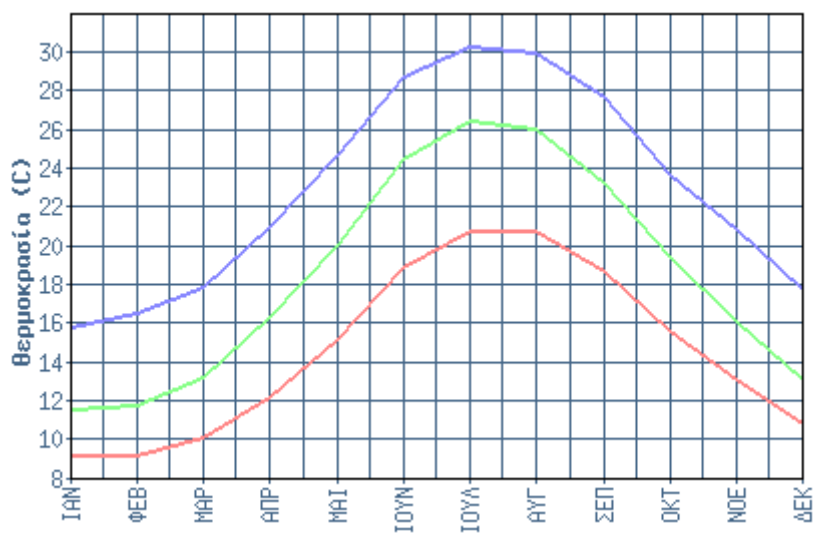


Εικόνα 3: Το υπό μελέτη κτίριο αποτελεί γωνιακό κτίριο στο οικοδομικό τετράγωνο

## 1.2 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

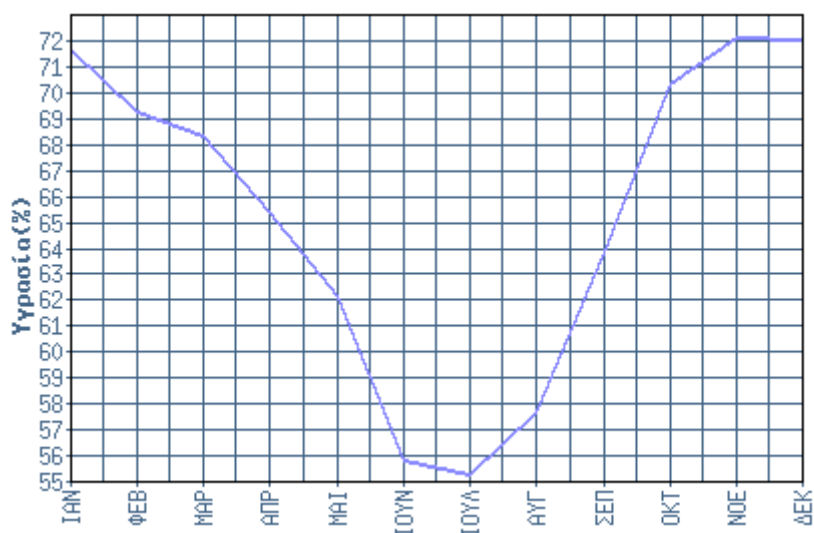
Το κλίμα της περιοχής είναι μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και βροχερό και ήπιο χειμώνα. Βρίσκεται υπό την επίδραση του Κρητικού Πελάγους όπου πνέουν βόρειοι άνεμοι ισχυροί κατά το χειμώνα και ασθενείς το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Το χιόνι αποτελεί σπάνιο φαινόμενο, ενώ ολικοί παγετοί ουδέποτε εμφανίζονται στην περιοχή.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνες 4,5,6,7) δίνουν μία πλήρη εικόνα των κλιματολογικών δεδομένων του Μετεωρολογικού Σταθμού Σούδας από το επίσημο δίκτυο της ΕΜΥ που έχει διαθέσιμα στοιχεία για μακρά χρονική περίοδο. Τα κλιματολογικά δεδομένα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία αφορούν σε μία χρονική περίοδο πλέον της 40ετίας, από το 1956 έως το 2004, και ως εκ τούτου οι εμφανιζόμενες τιμές θεωρούνται ως ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικές[10].



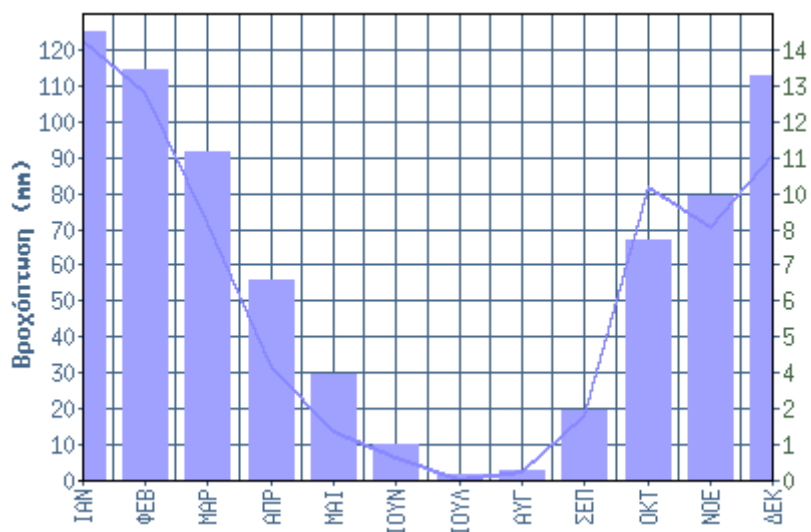
1° Εξάμηνο	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	9.2	9.2	10.1	12.2	15.2	18.9
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	11.6	11.8	13.2	16.3	20.1	24.5
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	15.8	16.5	17.9	21.0	24.7	28.7
2° Εξάμηνο	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	20.8	20.8	18.7	15.6	13.1	10.8
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	26.5	26.1	23.3	19.4	16.1	13.1
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	30.3	30.0	27.7	23.7	20.9	17.8

Εικόνα 4: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Θερμοκρασία)



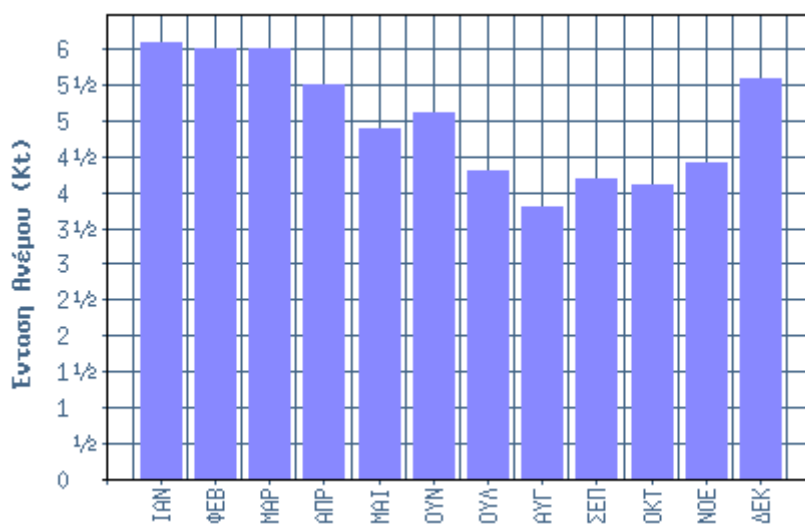
1 <sup>ο</sup> Εξάμηνο	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	71.7	69.3	68.4	65.4	62.2	55.8
2 <sup>ο</sup> Εξάμηνο	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	55.3	57.7	63.9	70.4	72.2	72.1

Εικόνα 5: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Υγρασία)



1 <sup>ο</sup> Εξάμηνο	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	122.9	108.6	71.9	31.9	13.9	6.6
Συνολικές Μέρες Βροχής	15.0	13.7	11.0	6.7	3.5	1.2
2 <sup>ο</sup> Εξάμηνο	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	0.5	2.7	18.2	82.1	70.9	91.3
Συνολικές Μέρες Βροχής	0.2	0.3	2.3	8.0	9.5	13.5

Εικόνα 6: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Βροχόπτωση)





1 <sup>ο</sup> Εξάμηνο	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων	N	N	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ
Μέση Μηνιαία Ένταση Ανέμων	6.1	6.0	6.0	5.5	4.9	5.1
2 <sup>ο</sup> Εξάμηνο	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ	N	N
Μέση Μηνιαία Ένταση Ανέμων	4.3	3.8	4.2	4.1	4.4	5.6

Εικόνα 7: Διάγραμμα κλιματολογικών δεδομένων (Ένταση Ανέμου)

### 1.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

Στη Γεωλογική Δομή της ευρύτερης περιοχής των Χανίων συναντώνται νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα που είναι τοποθετημένα πάνω σε σύστημα προνεογενών σχηματισμών. Τα νεογενή ιζήματα αποτελούνται από εναλλαγές και πλευρικές μεταβάσεις ηπειρωτικών και θαλάσσιων αποθέσεων. Στην δομή των αποθέσεων αυτών συμμετέχουν ασβεστολιθικά-χαλαζιτικά, λατυποπαγή, μάργες, ψαμμιτόμαργες, ψαμμίτες και βιοκλαστικοί υφαλώδεις μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι. Οι σχηματισμοί αυτοί σε διαφορετικά σημεία εμφανίζονται πολύ συμπαγείς αποτελούμενοι από κροκαλοπαγείς σειρές με ασβεστολιθικές κροκάλες. Τα κυριότερα τεταρτογενή ιζήματα που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή αποτελούνται κυρίως από αλλουβιακές προσχώσεις (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Φύλλο Χάρτου Χανίων (ΙΓΜΕ 1972)

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής που βρίσκεται το κτίριο περιλαμβάνει την ενότητα των ιζηματογενών πετρωμάτων - μάργες με εναλλασσόμενα στρώματα μαργαϊκών ψαμμιτών και πλακωδών μαργαϊκών ασβεστολίθων[8].

## 1.4 Σεισμοτεκτονικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής

Οι σεισμοί είναι εκδήλωση των κινήσεων και παραμορφώσεων του γήινου φλοιού, που σε συνδυασμό με τα αίτια που τις προκαλούν αποτελούν την ενεργό τεκτονική δράση. Τα σπουδαιότερα γεωτεκτονικά φαινόμενα που παρατηρούνται στην επιφάνεια της γης είναι αποτέλεσμα της ενεργού τεκτονικής δράσης που συμβαίνουν πάνω σε ορισμένες ζώνες της επιφάνειας της γης και κατατάσσονται χωρικά σε δύο συστήματα ζωνών διάρρηξης, το ηπειρωτικό και το σύστημα των μεσοωκεανείων. Ο Ελληνικός χώρος βρίσκεται στην Μεσογειακή – Μελανησιακή ζώνη του ηπειρωτικού συστήματος διάρρηξης και μάλιστα το Ελληνικό τόξο (Ιόνια νησιά – Κρήτη – Ρόδος) αποτελεί ένα από τα νησιωτικά τόξα του συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος που η ενεργός τεκτονική στην περιοχή της Κρήτης είναι έντονη. Για την ερμηνεία των γεωτεκτονικών φαινομένων αναπτύχθηκε τα τελευταία 30 χρόνια η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία η γη καλύπτεται από ένα δύσκαμπτο επιφανειακό στρώμα λιθοσφαιρικών πλακών πάχους περίπου 80km. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες πραγματοποιούν σχετικές κινήσεις πάνω στο εύκαμπτο σώμα που βρίσκεται κάτω από τη λιθόσφαιρα και ονομάζεται ασθενόσφαιρα. Οι σεισμοί γίνονται μέσα στη λιθόσφαιρα και κατά κύριο λόγο στα όρια λιθοσφαιρικών πλακών. Η περιοχή της Κρήτης αποτελεί παράδειγμα περιοχής που βρίσκεται στα όρια λιθοσφαιρικών πλακών και όπου συμβαίνουν ισχυροί σεισμοί μεγάλου ή μεσαίου βάθους. Κατά την περίοδο 1901-1988 σημειώθηκαν στην περιοχή των Χανίων 165 σεισμικά γεγονότα με μέγεθος μέχρι 6.4 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ[8].

## 1.5 Ιστορικά στοιχεία για την Παλιά πόλη των Χανίων

Η περιοχή της Παλιάς πόλης Χανίων λόγω της εγγύτητας στη θάλασσα και τον εύφορο χανιώτικο κάμπο, έχει μια συνεχή πορεία κατοίκησης που ξεκινά από τα προϊστορικά χρόνια μέχρι τις μέρες μας. Στη συνεχή αυτή κατοίκηση συνέβαλε επίσης η παρουσία νερού (πηγές Αγυιάς, Στύλου, Αρμένων, χείμαρροι Κλαδισός, Κερίτης), το κλίμα που είναι πρόσφορο για ανθρώπινη διαβίωση και εντατική καλλιέργεια της γης και η παρουσία του φυσικού όρμου της Σούδας με τη στρατηγική σημασία του[11]. Ο λόφος του Καστελίου επιλέχθηκε για την εγκαθίδρυση του πρώτου οργανωμένου μινωικού οικιστικού πυρήνα στην περιοχή των Χανίων κατά την προανακτορική περίοδο (3500-2000π.Χ.). Στη συνοικία της Σπλάντζιας σε πρόσφατες ανασκαφές αποκαλύφθηκε σημαντικό οικοδομικό συγκρότημα του μινωικού οικισμού του 1600π.Χ. που παρουσιάζει τυπικά ανακτορικά αρχιτεκτονικά στοιχεία και ιερό χαρακτήρα[12].

Κατά τη διάρκεια της μακράς ιστορίας της η πόλη των Χανίων θα κατοικηθεί από διαφορετικούς πολιτισμούς, θα γνωρίσει πολέμους αλλά και περιόδους ακμής και θα εξελιχθεί στη σημερινή της μορφή. Η πόλη ονομαζόταν αρχικά Κυδωνία και γνώρισε μεγάλη άνθιση κατά την υστερομινωική περίοδο (1580-1070π.Χ.) από την παραγωγή και εμπορία κεραμικών. Την περίοδο 1550-1450π.Χ. χρονολογείται επίσης η δημιουργία οργανωμένου πολεοδομικού σχεδίου κατά τετράγωνα με πλούσιες κατοικίες με φωταγωγούς, φροντισμένες προσόψεις και αποχετευτικό σύστημα.

Κατά τη διάρκεια των ιστορικών χρόνων (1070π.Χ.-330μ.Χ.) η πόλη επεκτείνεται στα ανατολικά, δυτικά και νότια. Το 30π.Χ. ανακηρύσσεται από τον Αύγουστο αυτόνομη πόλη, με δικό της νόμισμα



και από τότε γνωρίζει αξιοσημείωτη ακμή με ανοικοδόμηση πολυτελών ιδιωτικών και δημόσιων κτισμάτων και κατασκευή ενός θεάτρου. Την ελληνιστική περίοδο χρονολογείται η πρώτη γνωστή οχύρωση της πόλης. Μέσα στον ίδιο οχυρό περίβολο η πόλη εξελίσσεται με αλληπάλληλες ανοικοδομήσεις μέχρι τους ρωμαϊκούς χρόνους[13].

Το 330μ.Χ ξεκινά η πρώτη Βυζαντινή περίοδος της πόλης κατά τη διάρκεια της οποίας κατασκευάζεται το 'βυζαντινό τοίχος' το οποίο όμως δεν στάθηκε ικανό να αποτρέψει την εισβολή των Σαρακηνών Αράβων που θα καταλάβουν την πόλη από το 824-961 επιφέροντας πολλές αλλαγές και καταστροφές. Κατά τη δεύτερη βυζαντινή περίοδο (961-1252) η βυζαντινή διοίκηση φροντίζει ιδιαίτερα για την εδραίωση της εξουσίας της στην Κρήτη με ενίσχυση του πληθυσμού, διοικητική αναδιοργάνωση και κατασκευή οχυρώσεων. Αυτή την περίοδο δίνεται στην πόλη το όνομα Χανιά.

Σχετικά με την ετοιμολογία του τοπωνύμιου Χανιά υπάρχουν πολλές απόψεις. Κατά τον Κριτοβουλίδη είναι πιθανόν να είναι παραφθορά του αρχαίου ονόματος της Κρήτης Χθονία ή να προέρχεται από το όνομα κάποιου Σαρακηνού Χάνη. Κατά τον Σ. Ξανθουδίδη μπορεί να προέρχεται από το αραβικό Χάνι, είτε από το Λαχανάς. Κατά τον Γ. Κουρμουλή από το όνομα του ψαριού Χάνος, Χανί, Χανιά. Ο Ν. Πλάτων προτείνει ότι το τοπωνύμιο Χανιά προέρχεται από τον Αλχανία, κώμη που αναφέρεται σε επιγραφή και σχετίζεται με τη λατρεία του θεού Βαλχανού ή Βελχανού στην Κρήτη. Η ονομασία Αλχανία διατηρήθηκε από τους Άραβες, καθώς ηκούσε σαν τον αραβικό τύπο Al Hanim. Οι ντόπιοι μετέφεραν το τοπωνύμιο στα ελληνικά, κάνοντάς το Χανιά. Το τοπωνύμιο Χανιά βρήκαν οι Βενετοί το 1252, όταν ανοικοδόμησαν και αποίκησαν την πόλη και το έκαναν La Canea[11].

Μετά την κατάλυση της βυζαντινής αυτοκρατορίας η Κρήτη καταλήφθηκε από τους Βενετούς. Αυτή την περίοδο η πόλη ξανακτίζεται ακολουθώντας ενετικά πρότυπα αρχιτεκτονικής, διανοίγονται δρόμοι και η πόλη εξαπλώνεται έξω από τα βυζαντινά τείχη. Στα μέσα του 16<sup>ου</sup> αιώνα ξεκινάει η κατασκευή των ενετικών τειχών, της τάφρου, των προμαχώνων, του φρουρίου του Φιρκά και του λιμενοβραχίονα. Το 1536 ήρθε στα Χανιά ο αρχιτέκτονας Michel Sammiceli ο οποίος τελειοποίησε τη μορφή των τειχών και έκανε σοβαρές τροποποιήσεις και προσθήκες. Το 1563 έγιναν νέες προσθήκες από τον G. Savorgnan και τον ναύαρχο Renier. Τα τείχη ολοκληρώθηκαν το 1568 και στοίχισαν, μαζί με τα φρούρια Θωδωρού, 87000 δουκάτα[11]. Την περίοδο 1551-1601 κτίστηκαν τα ενετικά νεώρια και ο φάρος.

Οι Τούρκοι διαδέχθηκαν τους Ενετούς με απόβαση στο νησί το 1645. Οι Οθωμανοί δεν ενδιαφέρονται να κτίσουν μια νέα πόλη αλλά να ταιριάξουν τις υπάρχουσες υποδομές στις δικές τους ανάγκες. Τοποθέτησαν το διοικητήριο τους στο λόφο Καστελίου, μετέτρεψαν σε τζαμιά καθεδρικούς ναούς και καθολικά μοναστήρια, αλλά έκτισαν και καινούρια τεμένη, όπως το Τζαμί του Κιουτσούκ Χασάν (Γιαλί Τζαμισί) και κατασκεύασαν κρήνες, λουτρά και χάνια. Τέλος διατήρησαν την παλιά οχύρωση επισκευάζοντας τα τείχη. Κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας στην πόλη των Χανίων δημιουργήθηκε ένα πολύχρωμο μωσαϊκό ως αποτέλεσμα της συμβίωσης δύο λαών. Οικοδομούνται νέα δημόσια και ιδιωτικά κτίρια που ακολουθούν τα σύγχρονα ρεύματα του Νεοκλασικισμού και η πόλη επεκτείνεται έξω από τα όρια των οχυρώσεων.

Το 1889 το «Κρητικό Ζήτημα» λαμβάνει διεθνείς διαστάσεις, εμπλέκοντας και τις Μεγάλες Δυνάμεις στην ελληνοτουρκική διαμάχη για το μέλλον του νησιού, ενώ το 1897 η ελληνική κυβέρνηση κηρύσσει τον πόλεμο στην Οθωμανική Αυτοκρατορία. Το Δεκέμβριο του 1898 ξεκινάει

επίσημα η λειτουργία της νεοσύστατης Κρητικής Πολιτείας. Στα χρόνια της Κρητικής Πολιτείας τα Χανιά αναπτύσσονται έξω από τα τείχη με διάνοιξη νέων δρόμων και την κατεδάφιση τμημάτων των ενετικών τειχών. Κτίζεται η Δημοτική Αγορά και οικοδομούνται αρκετά νεοκλασικά κτίρια επιφανών πολιτών. Το 1913 πραγματοποιείται η ένωση της Κρήτης με την Ελλάδα και ακολουθεί μια μακρά περίοδος ριζικής μεταμόρφωσης της πόλης των Χανίων σε όλα τα επίπεδα. Η πόλη αυξήθηκε τόσο πληθυσμιακά όσο και σε έκταση. Την πορεία αυτή ανέκαμψε η εισβολή των Γερμανών το Μάιο του 1941. Στον πόλεμο αυτό καταστράφηκαν από βομβαρδισμούς σπουδαία βενετικά και οθωμανικά μνημεία στην παλιά πόλη των Χανίων. Σε αντίθεση με τις κυρίαρχες πρακτικές στην υπόλοιπη Ευρώπη, μεταπολεμικά κυριάρχησε στην Παλαιά Πόλη Χανίων η πολιτική που προέβλεπε κατεδάφιση των υπολειμμάτων της παλιάς πόλης. Σ' αυτή τη γραμμή κινήθηκε και το σχέδιο Δοξιάδη που εφαρμόστηκε σχεδόν ολοκληρωτικά στην οδό Κανεβάρω και στους κάθετους σ' αυτή δρόμους[14].

Το 1977 οι αρχιτέκτονες πολεοδόμοι Ρωμανός – Καλλιγιάς συντάσσουν μελέτη για την προστασία και ανάδειξη της μεσαιωνικής πόλης των Χανίων (Εικόνα 9). Τα βασικά στοιχεία της μελέτης, που ποτέ δεν υλοποιήθηκε περιλαμβάνουν δημιουργία πάρκων στην ανατολική και δυτική τάφρο, δημιουργία αρχαιολογικού πάρκου στον λόφο Καστέλι, ορισμό ζωνών αποκλεισμού χρήσεων αναψυχής για προστασία της κατοικίας και δημιουργία οργανωμένων υπόγειων χώρων στάθμευσης στα ανατολικά και δυτικά της παλιάς πόλης[15]. Η Παλαιά Πόλη Χανίων έχει χαρακτηριστεί «ιστορικό διατηρητέο μνημείο» από το 1965 και από τότε έχουν ξεκινήσει οι προσπάθειες για τη διατήρηση και ανάδειξή της.



Εικόνα 9: Πολεοδομική μελέτη Ρωμανού – Καλλιγιάς, 1977[15]

## 2. Νομοθετικό πλαίσιο

### 2.1 Πολιτικές και πρακτικές για συντήρηση, ανάδειξη και προστασία ιστορικών κτιρίων και συνόλων

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κρίνεται σκόπιμη μια ιστορική αναδρομή στο ζήτημα της μνημειακής προστασίας και του υπερ-κρατικού, θεωρητικού πλαισίου προστασίας των μνημείων. Μέχρι το τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα η αρχιτεκτονική κληρονομιά ήταν ένα ζήτημα εθνικού ενδιαφέροντος, η πολιτιστική διεθνοποίηση είναι αποτέλεσμα του Α' Παγκοσμίου Πολέμου και της ίδρυσης της Κοινωνίας των Εθνών. Ακολούθησε η σύνταξη μιας σειράς χαρτών των αρχών προστασίας με κύριο χαρακτηριστικό τη σταδιακή εννοιολογική διερεύνηση του αντικειμένου της προστασίας, από το μεμονωμένο κτίριο – φορέα ιστορικών, καλλιτεχνικών ή επιστημονικών αξιών – στα πολιτιστικά αγαθά και την πολιτιστική κληρονομιά, φορέων ενός μεγάλου και ποικίλου φάσματος αξιών. Έτσι στον Χάρτη των Αθηνών του 1931 ορίζονται ως αντικείμενο προστασίας τα μνημεία με «ιστορικό, καλλιτεχνικό ή επιστημονικό ενδιαφέρον και το άμεσο περιβάλλον τους» καθώς και «ορισμένα σύνολα, γραφικές απόψεις» (άρθρα I και II). Το 1957 στο Παρίσι το Πρώτο Κονγκρέσο Αρχιτεκτόνων και Ειδικών σε Ιστορικά Κτίρια συνέστησε στις χώρες που δεν διαθέτουν κεντρικό οργανισμό για την προστασία των ιστορικών κτιρίων να προβούν στις απαραίτητες ενέργειες για την δημιουργία μιας τέτοιας αρχής. Επίσης, όλα τα κράτη μέλη της UNESCO να ενταχθούν στο Διεθνές Κέντρο για τη Μελέτη Διατήρησης και Αποκατάστασης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς (ICCRROM) με έδρα τη Ρώμη[16].

Μετάπειτα με τον Χάρτη της Βενετίας του 1964 αποσαφηνίζεται η έννοια του ιστορικού μνημείου, η οποία δεν αφορά μόνο το μεμονωμένο αρχιτεκτονικό έργο αλλά και αστικά ή αγροτικά τοπία, ταπεινά έργα και μνημειακά σύνολα με πολιτιστική ή ιστορική σημασία (άρθρα 1 και 14). Ο Χάρτης της Βενετίας γεννιέται μετά από δύο εξαιρετικά γόνιμες για την αποκατάσταση των μνημείων δεκαετίες, κατά τις οποίες ανοικοδομείται και αποκαθίσταται το ιστορικό τοπίο της κατεστραμμένης από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο Ευρώπης. Η σύνταξη του Χάρτη της Βενετίας σηματοδοτεί την έναρξη της διεθνοποίησης του ζητήματος, ως το πρώτο αποδεκτό θεωρητικό πλαίσιο αρχών επεμβάσεων σε μνημεία, που είναι έως σήμερα σεβαστό και ισχύον. Το 1964 ιδρύεται επίσης ο Διεθνής Οργανισμός Μνημείων και Τόπων (International Council on Monuments and Sites - ICOMOS).

Στις συστάσεις της UNESCO του 1968 για την προστασία των μνημείων που κινδυνεύουν από Δημόσια ή Ιδιωτικά έργα εισάγεται η πολύ ευρύτερη έννοια του πολιτιστικού αγαθού, η οποία περιλαμβάνει ιστάμενα και κινητά αγαθά, όπως αρχαιολογικούς, ιστορικούς ή επιστημονικούς χώρους, κτίσματα, ομάδες παραδοσιακών κτισμάτων, ιστορικές συνοικίες, εθνολογικά κτίσματα του παρελθόντος, ακόμη και ερείπια εμφανή ή αφανή με πολιτιστική σημασία (άρθρα 1 και 2).

Ο όρος Πολιτιστική και Φυσική Κληρονομιά εισάγεται το 1972 στη Σύμβαση για την Προστασία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής και Φυσικής Κληρονομιάς της UNESCO. Στην Πολιτιστική Κληρονομιά περιλαμβάνονται μνημεία και κτιριακά σύνολα ή και τόποι, οργανωμένοι από τον άνθρωπο ή και δημιουργήματα του ανθρώπου και της φύσης, με εξέχουσα παγκοσμίως ιστορική, αισθητική, εθνολογική ή ανθρωπολογική σημασία (άρθρο 1).

Η διακήρυξη του Άμστερνταμ το 1975 προωθεί τη διατήρηση της ευρωπαϊκής αρχιτεκτονικής κληρονομιάς η οποία περιλαμβάνει «όχι μόνο μεμονωμένα κτίρια εξαιρετικής ποιότητας και το άμεσο περιβάλλον τους, αλλά επίσης ολόκληρες πόλεις ή χωριά ιστορικού ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος».

Το 1979 συντάσσεται ο Χάρτης της Burra, που παίρνει το όνομά του από την ομώνυμη πόλη της Αυστραλίας. Στον Χάρτη αυτό που αναθεωρείται το 1981, 1988 και 1999, ως αντικείμενο προστασίας ορίζονται οι «τόποι με πολιτιστική σημασία», ένας όρος που περιλαμβάνει ένα ευρύτατο φάσμα μνημείων από τον οργανωμένο τόπο, τη ζώνη, το τοπίο, έως τα κτίρια ή τα σύνολα κτιρίων. Κοινό στοιχείο των «τόπων» η πολιτιστική τους σημασία για τις περασμένες, τις σημερινές και τις μελλοντικές γενιές.

Η προστασία των οικιστικών συνόλων συμπληρώνεται και διευρύνεται με τη Διεθνή Χάρτα για την Προστασία των Ιστορικών Πόλεων του ICOMOS (Χάρτα της Ουάσινγκτον για τις Ιστορικές Πόλεις) του 1987. Εκεί όλες οι πόλεις του κόσμου θεωρούνται ιστορικά τεκμήρια, αφού αποτελούν την υλική έκφραση της ποικιλίας των κοινωνιών, που σχηματίζονται για ιστορικούς λόγους, ενώ παράλληλα «εκφράζουν τις ίδιες τις αξίες των παραδοσιακών, αστικών πολιτισμών». Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να διαφυλαχθεί ο ιστορικός τους χαρακτήρας, στο σύνολο των υλικών και πνευματικών/ συμβολικών συστατικών του στοιχείων[17].

Ο Οργανισμός ICOMOS συνέταξε το 2007 την Χάρτα για τους Τόπους Πολιτιστικής Κληρονομιάς που έχει ως βασικό σκοπό να ορίσει τις βασικές αρχές της Μεθερμηνεύσης και Παρουσίασης, ως βασικά στοιχεία της προσπάθειας διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς και ως μέσο για την ενίσχυση της δημόσιας εκτίμησης και κατανόησης των τόπων πολιτιστικής κληρονομιάς[18].

Το Υπόμνημα της Βιέννης 2005 – ένα έγγραφο που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην παραδοσιακή προσέγγιση – έχει ως στόχο τη συζήτηση ορισμένων περιορισμών που τίθενται από την παραδοσιακή προσέγγιση, ορίζοντας τις ιστορικές πόλεις όχι ως ένα σύνολο μνημείων και αστικού ιστού, αλλά ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που χαρακτηρίζεται από ιστορικές, γεωμορφολογικές και κοινωνικές σχέσεις με το περιβάλλον του και από μια σύνθετη διαστρωμάτωση εννοιών και εκφράσεων. Το υπόμνημα της Βιέννης βλέπει τις ιστορικές πόλεις ως αποτέλεσμα μιας μακράς και ακόμη σε εξέλιξη δυναμικής και αντιλαμβάνεται την αλλαγή – κοινωνική, οικονομική και φυσική – σαν μια μεταβλητή που πρέπει να γίνει κατανοητή και διαχειρίσιμη, όχι μόνο ως πηγή αντίθεσης.

Το Ιστορικό Αστικό Τοπίο, στον ορισμό που δίνεται από το Υπόμνημα της Βιέννης, τονίζει τη σχέση μεταξύ φυσικών μορφών και κοινωνικής εξέλιξης, ορίζοντας τις ιστορικές πόλεις ως ένα σύστημα ενσωμάτωσης φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων, σε μια ιστορική συνέχεια, που αντιπροσωπεύει μια στρωματοποίηση εκφράσεων μέσα στην ιστορία. Η αναγνώριση της αξίας της πολυμορφίας των πολιτιστικών εκφράσεων είναι η βάση του 'Ιστορικού Αστικού Τοπίου', καθώς επίσης και μια θετική ερμηνεία κοινωνικής και οικονομικής δυναμικής ως παράγοντα αλλαγής και προσαρμογής αξιών και αστικών μορφών.

Η προσέγγιση του Ιστορικού Αστικού Τοπίου δεν αποτελεί μια ξεχωριστή κατηγορία διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Αντιθέτως, η έννοια εγγράφεται εντός των καθιερωμένων πρακτικών για τις ιστορικές πόλεις, προσθέτοντας την ίδια στιγμή ένα νέο πρίσμα στις πρακτικές αστικής διατήρησης: μια ευρύτερη 'εδαφική' άποψη της πολιτιστικής κληρονομιάς, συνοδευόμενη από μεγαλύτερη προσοχή στις κοινωνικές και οικονομικές λειτουργίες μιας ιστορικής πόλης, μια

προσέγγιση για τη διαχείριση της αλλαγής που προσπαθεί να αντιμετωπίσει τις σύγχρονες εξελίξεις και τέλος μια επαναξιολόγηση της σύγχρονης συνεισφοράς στις ιστορικές αξίες. Η προσέγγιση του Ιστορικού Αστικού Τοπίου αποτελεί ένα εργαλείο προβολής των ιδεών αστικής πολιτιστικής διατήρησης στον εικοστό πρώτο αιώνα[19].

Η Διεθνής Επιτροπή για Ιστορικές Πόλεις και Χωριά (International Committee on Historic Towns and Villages – CIVVIH) ολοκλήρωσε το 2010 τη συγγραφή των Αρχών της Valletta για την Προστασία και τη Διαχείριση Ιστορικών Πόλεων και Αστικών Περιοχών. Σκοπός του εγγράφου η πρόταση αρχών και στρατηγικών εφαρμόσιμων σε κάθε παρέμβαση σε ιστορικές πόλεις και αστικές περιοχές. Αυτές οι αρχές και οι στρατηγικές έχουν σκοπό να διαφυλάξουν τις αξίες των ιστορικών πόλεων και του τοπίου τους, όπως επίσης και την ενσωμάτωσή τους στην κοινωνική, πολιτιστική και οικονομική ζωή της εποχής μας. Οι παρεμβάσεις πρέπει να σέβονται τις υλικές και άυλες αξίες της πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως επίσης και την ποιότητα ζωής των κατοίκων[20].

## 2.2 Ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα

Ο κτιριακός τομέας είναι ένας από τους ιδιαίτερα ενεργοβόρους τομείς και είναι υπεύθυνος για το 40% περίπου της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα εκδίδει οδηγίες για τη θέσπιση νομοθεσίας στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων. Οι οδηγίες ενσωματώνονται στο εθνικό δίκαιο των κρατών μελών της Ε.Ε. με αντιστοιχούς εθνικούς νόμους.

Η Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ «για την Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων» προέβλεπε την εναρμόνιση της χώρας μας, με την έκδοση και εφαρμογή σχετικών νομοθετικών διατάξεων, μέχρι τον Ιανουάριο του 2006. Ο Νόμος 3661/2008 (ΦΕΚ Α'89) – 'Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων' ενσωματώνει όλες τις διατάξεις της Οδηγίας, προβλέπει την έκδοση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) και διακρίνει πέντε βασικές θεματικές ενότητες, οι οποίες αφορούν:

- στον καθορισμό των ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης,
- στη μέθοδο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης (άρθρο 3) νέων και υφιστάμενων κτιρίων (άρθρα 4 αι 5),
- στην έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης (άρθρο 6),
- στις επιθεωρήσεις λεβήτων και εγκαταστάσεων κλιματισμού (άρθρα 7 και 8) και
- στην πρόβλεψη ειδικευμένων και διαπιστευμένων ενεργειακών επιθεωρητών (άρθρο 9).

Η Οδηγία 91/2002/ΕΚ τροποποιήθηκε από την Οδηγία 31/2010/ΕΚ και η εναρμόνιση της χώρας με τη νέα Οδηγία έγινε με την έκδοση του νόμου 4122/2013 (ΦΕΚ Α'42) 'Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις'.

Μέχρι την έκδοση του ΚΕΝΑΚ (ΦΕΚ 407/9-4-2010), η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων ανταποκρινόταν στα οριζόμενα στον Κανονισμό Θερμομόνωσης (ΦΕΚ 362/4-7-1979). Ο Κανονισμός

Θερμομόνωσης προέβλεπε την προσθήκη μόνωσης στο κέλυφος των κτιρίων με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών μέχρι επιτρεπτών ορίων που καθορίζονται από την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Το 1998 προτάθηκε ο ΚΟΧΕΕ (Κανονισμός Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας) για συμμόρφωση της Ελλάδας με την Οδηγία 93/76/ΕΚ, ο οποίος όμως δεν εφαρμόστηκε ποτέ.

Η ελληνική νομοθεσία εναρμονίζεται με την Οδηγία 2002/91/ΕΚ με το νόμο 3661/2008, ΦΕΚ89Α/19-5-2008 και την απόφαση αρ.Δ6/Β/οικ.5825, Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, ΦΕΚ 407/9-4-2010. Αργότερα εκδίδεται ο νόμος 4122/2013 σε αντικατάσταση του νόμου 3661/2008. Καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της εθνικής νομοθεσίας για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων έπαιξε η έκδοση του Νέου Οικοδομικού Κανονισμού (2012) ο οποίος συνδέεται άμεσα με τον Κ.ΕΝ.Α.Κ. και τον ενεργειακό σχεδιασμό των κτιρίων.

Το Νοέμβριο του 2016 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προτείνει μια αναθεωρημένη έκδοση της Οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων με σκοπό την προώθηση της χρήσης έξυπνων τεχνολογιών σε κτίρια και τον εκσυγχρονισμό των υφιστάμενων κανονισμών.

### 2.2.1 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

#### Οδηγία 2002/91/ΕΚ

Στόχος της Οδηγίας 2002/91/ΕΚ είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων λαμβάνοντας υπόψη τις μακροκλιματικές και μεσοκλιματικές συνθήκες, καθώς και τις απαιτήσεις των εσωτερικών χώρων για την επίτευξη συνθηκών άνεσης υπολογίζοντας παράλληλα τη σχέση κόστους/ οφέλους. Τα κράτη μέλη οφείλουν να εφαρμόσουν, σε εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο, μια μεθοδολογία υπολογισμού κτιριακής, ενεργειακής απόδοσης και να καθορίσουν τις απαιτήσεις της ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης συνεκτιμώντας τις τοπικές, καιρικές συνθήκες και τις ανάγκες του κτιρίου ανάλογα με τη χρήση, το χαρακτήρα και την παλαιότητα. Η Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 16<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2002, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων τροποποιείται στις 19 Μαΐου 2010 από την Οδηγία 2010/31/ΕΕ.

#### Οδηγία 2006/32/ΕΚ

Η Οδηγία 2006/32/ΕΚ «Ενεργειακή απόδοση κατά την τελική χρήση και τις ενεργειακές υπηρεσίες» αφορά την οικονομική και τεχνολογική ενίσχυση των κατασκευαστικών κλάδων και του δημόσιου τομέα μέσω της διευκόλυνσης χρηματοδοτικών και νομικών πλαισίων.

#### Οδηγία 2010/31/ΕΚ

Η Οδηγία 2010/31/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων αποτελεί τροποποίηση της Οδηγίας 2002/91/ΕΚ προκειμένου να ενισχυθούν οι απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και να διευκρινιστούν/ απλουστευτούν ορισμένες διατάξεις. Η παρούσα Οδηγία:

- προωθεί τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων,
- ορίζει την έννοια του κτιρίου με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας,



- καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων ή κτιριακών μονάδων (νέων ή υφιστάμενων),
- προωθεί την τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική μελέτη για την εγκατάσταση εναλλακτικών συστημάτων υψηλής απόδοσης και
- καθιερώνει την τακτική επιθεώρηση συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2010/31/ΕΚ τα Κράτη Μέλη δύναται να μην καθορίσουν ή να μην εφαρμόσουν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης για κτίρια επισήμως προστατευόμενα ως μέρος συγκεκριμένου περιβάλλοντος ή λόγω της ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής ή ιστορικής τους αξίας, στον βαθμό που η συμμόρφωση προς ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης θα αλλοίωνε απαράδεκτα τον χαρακτήρα ή την εμφάνιση τους.

### **Οδηγία 2016/0381**

Η επανεξέταση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων τροποποιεί την οδηγία 2010/31/ΕΚ και την Οδηγία 2012/27/ΕΚ για την Ενεργειακή Απόδοση. Αποτελεί μέρος της δέσμης μέτρων για την καθαρή ενέργεια και περιλαμβάνει:

- ενσωμάτωση μακροπρόθεσμων στρατηγικών (Άρθρο 4 της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση), ενισχύοντας την κινητοποίηση χρηματοδότησης και δημιουργώντας ένα σαφές όραμα για κτιριακό απόθεμα απαλλαγμένο από τις εκπομπές άνθρακα για το 2050.
- ενθάρρυνση της χρήσης έξυπνων τεχνολογιών για την αποδοτική λειτουργία των κτιρίων και
- εξορθολογισμό των διατάξεων σε τομείς που δεν έχουν παραδοθεί τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

### **2.2.2 Εθνική Νομοθεσία**

#### **Κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων**

Ο πρώτος κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων θεσπίστηκε το 1979 (ΦΕΚ 362Δ/1979). Σύμφωνα με αυτόν η χώρα χωρίζεται σε τρεις κλιματικές ζώνες βάσει των θερμομονωτικών απαιτήσεων και δεν γίνεται καμία διάκριση όσον αφορά τη χρήση του κτιρίου. Όλα τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980 θεωρούνται αμόνωτα. Επίσης η πλειοψηφία των κτιρίων που κατασκευάστηκαν μέχρι το 1990 έχει ελλιπή ή και καμία θερμομόνωση καθώς ο κανονισμός ήταν σε ισχύ αλλά δεν εφαρμόζονταν πάντα στην πράξη. Ο κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων αντικαθίσταται το 2010 από τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΦΕΚ 407/9-4-2010).

#### **Νόμος 3661/2008**

Ο Νόμος 3661/2008 (ΦΕΚ Α' 89/19-05-2008) «Μέτρα για τη μείωση της Ενεργειακής Κατανάλωσης των Κτιρίων και άλλες διατάξεις» στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε νέα και υφιστάμενα κτίρια και αποτέλεσε το πρώτο βήμα εναρμόνισης της Ελλάδας με την Ευρωπαϊκή Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ. Τα κτίρια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη χρήση και καθορίζονται αντίστοιχα οι ελάχιστες προδιαγραφές για την ενεργειακή τους απόδοση. Επίσης καθιερώνεται η έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων για ενοικίαση ή πώληση και

γίνονται υποχρεωτικές οι επιθεωρήσεις λεβήτων θέρμανσης και εγκαταστάσεων κλιματισμού από εξειδικευμένους και διαπιστευμένους ενεργειακούς επιθεωρητές. Βάσει του άρθρου 3 του νόμου 3661/2008 υπάρχει η υποχρέωση έκδοσης «Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων» (Κ.Εν.Α.Κ.) στον οποίο να ορίζονται οι ελάχιστες τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των νέων και ριζικά ανακαινιζόμενων κτιρίων καθώς και η μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

### **Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.)**

Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) (ΦΕΚ 407/9-4-2010) θέτει ένα πλαίσιο αρχών, όρων και βελτιώσεων με σκοπό την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Σκοπός του Κανονισμού είναι η μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό, φωτισμό και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX) με την ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Ο Κ.Εν.Α.Κ. βάσει του άρθρου 6 διαιρεί την ελληνική επικράτεια σε τέσσερις κλιματικές ζώνες με βάση τις βαθμομέρες θέρμανσης (από τη θερμότερη ζώνη Α στην ψυχρότερη Δ).

### **Νόμος 4122/2013**

Ο Νόμος 4122/2013 (ΦΕΚ Α' 42/19-02-2013) για την «Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων» έχει ως στόχο την εναρμόνιση της ελληνικής νομοθεσίας με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ. Οι βασικές αλλαγές που προκύπτουν είναι μεταξύ άλλων:

- Οι ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης προβλέπεται να καθοριστούν από αναθεώρηση του Κ.Εν.Α.Κ τόσο για το σύνολο ενός κτιρίου, όσο και για τα επιμέρους στοιχεία του, λαμβάνοντας υπόψη τα βέλτιστα από πλευράς κόστους επίπεδα κατά την εκτιμώμενη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής ενός κτιρίου ή ενός στοιχείου.
- Από την 1.1.2021 όλα τα νέα κτίρια πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ για τα νέα κτίρια που στεγάζουν υπηρεσίες του δημοσίου και ευρύτερου δημοσίου τομέα, η υποχρέωση αυτή τίθεται σε ισχύ από την 1.1.2019.
- Γίνεται υποχρεωτική η δήλωση της ενεργειακής κατηγορίας στις εμπορικές αγγελίες και διαφημίσεις για την πώληση ή τη μίσθωση ενός κτιρίου, εφόσον έχει ήδη εκδοθεί ΠΕΑ.

### **Νέος Οικοδομικός Κανονισμός**

Ο Νέος Οικοδομικός Κανονισμός (ΝΟΚ) 4067/2012 (ΦΕΚ Α' 79/9-04-2012) προσαρμόζεται στα δεδομένα της κλιματικής αλλαγής και στην ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος. Στους κύριους στόχους του ΝΟΚ περιλαμβάνονται:

- η εφαρμογή περιβαλλοντικής και κοινωνικής πολιτικής μέσα από τη δόμηση,
- η συμμετοχή του κτιριακού τομέα στη μείωση των ρύπων και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος με την εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και την αξιοποίηση των διατιθέμενων τεχνολογιών,
- η βελτίωση του μικροκλίματος σε περιοχές υψηλής πυκνότητας και σε υποβαθμισμένες αστικές περιοχές με την αύξηση των πράσινων και κοινόχρηστων χώρων,
- η ενσωμάτωση φιλικών προς το περιβάλλον δομικών υλικών και στοιχείων που αναβαθμίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων,



- η καλλιέργεια περιβαλλοντικής συνείδησης με την παροχή νέων δυνατοτήτων, κινήτρων και κανόνων.

### 3. Υφιστάμενη κατάσταση στο υπό μελέτη κτίριο

#### 3.1 Ιστορική τεκμηρίωση

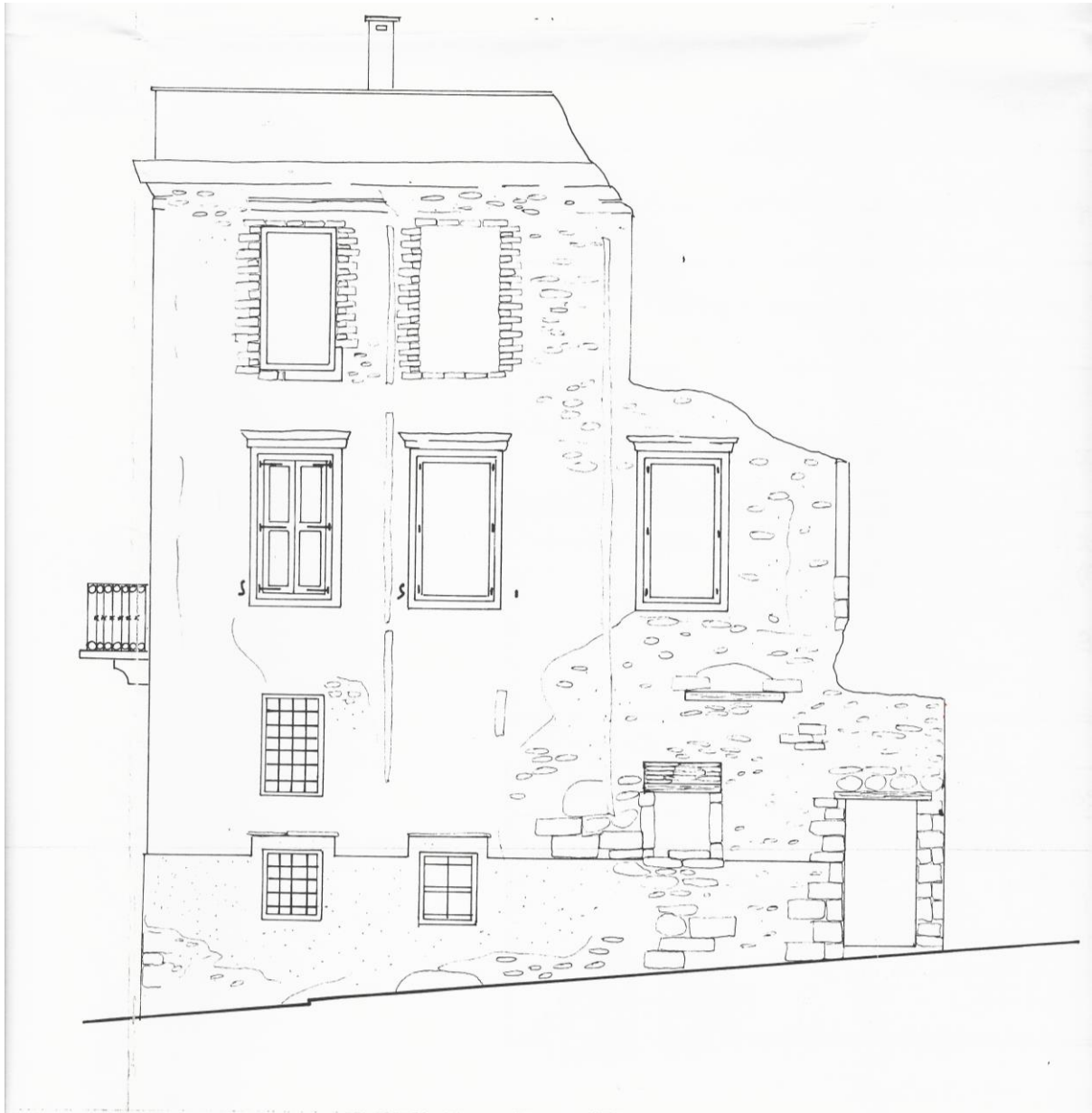
Το υπό μελέτη κτίριο (Εικόνα 10) είναι τετραώροφο με ενιαίο όγκο και ύψος και στην αρχική του κατάσταση ήταν καλυμμένο με δώμα. Εμφανίζει αρχιτεκτονικά στοιχεία ενετοκρατίας και νεοκλασικής ελληνικής αρχιτεκτονικής 18<sup>ου</sup>-19<sup>ου</sup> αιώνα. Σύμφωνα με το Μητρώο Κτιρίων Μεσαιωνικής Πόλης Χανίων της Μελέτης Α.Σ. Καλλιγά και Α.Γ. Ρωμανού το κτίριο έχει χαρακτηριστεί 2<sup>ου</sup> βαθμού μνημειακής προστασίας, με προστατευόμενο τμήμα ολόκληρη την όψη. Η δυνατότητα επέμβασης στο υπόλοιπο κτίριο προβλέπεται μόνο κατόπιν ειδικού αρχιτεκτονικού και πολεοδομικού ελέγχου. Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη το κτίριο ήταν το 1977 κατοικήσιμο σε κακή κατάσταση με λίθινα γείσα πάνω από τα παράθυρα και σωζόμενη απόληξη καμινάδας στο δώμα, ενώ το 1985 το κτίριο είναι ερειπωμένο, χωρίς επιστέγαση ή ενδιάμεσα πατώματα. Λόγω σοβαρών βλαβών στην τοιχοποιία και κινδύνου κατάρρευσης, έγιναν στο κτίριο σωστικές επεμβάσεις το 2003 που περιελάμβαναν τσιμεντενέσεις και βαθύ αρμολόγημα. Το κτίριο συνορεύει από τα δυτικά με ξενοδοχειακή μονάδα ίδιου ύψους όπου έχει γίνει ενίσχυση με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος. Στη βόρεια όψη υπάρχει εσωτερική αυλή 25m<sup>2</sup> και μεσοτοιχία με χαμηλότερο μονώροφο κτίσμα τουριστικής χρήσης.



Εικόνα 10: Το υπό μελέτη κτίριο (νότια και δυτική όψη)



Εικόνα 11: Νότια όψη του κτιρίου από προγενέστερη αποτύπωση (Παπαμαρκάκη – Καραβιτάκη Φωτεινή 1989-1990)



Εικόνα 12: Δυτική όψη του κτιρίου από προγενέστερη αποτύπωση (Παπαμαρκάκη – Καραβιτάκη Φωτεινή 1989-1990)

### 3.2 Αποτύπωση φθορών

Η αποτύπωση των φθορών στους λίθους του υπό μελέτη κτιρίου έχουν γίνει σύμφωνα με το εικονογραφημένο γλωσσάρι μηχανισμών αλλοίωσης πέτρας του ICOMOS (Σεπτέμβριος 2008). Το γλωσσάρι ταξινομεί τις αλλοιώσεις σε 6 οικογένειες που αποτελούνται από 2 έως 11 όρους:

- Γενικοί όροι
- Ρωγμές και παραμορφώσεις
- Αποκολλήσεις
- Γνωρίσματα από απώλεια υλικού
- Αποχρωματισμοί και επικαθίσεις



- Βιολογικός αποικισμός

Στο υπό μελέτη κτίριο συναντάμε:

**A) Χρωματικές αλλοιώσεις:**

Η βόρεια όψη της τοιχοποιίας και περιοχές που δέχονται περιορισμένη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας καλύπτονται από βιολογική κρούστα αποτελούμενη από άλγη, λειχήνες και πάσης φύσεως επικαθίσεις (Εικόνα 13). Η ύπαρξη μικροοργανισμών και βακτηριακών αποικιών χρωματίζουν την επιφάνεια των λίθων με αποτέλεσμα δημιουργία μαύρης κρούστας. Σημεία όπου έχουμε εμφάνιση μαύρης κρούστας είναι σημεία όπου η τοιχοποιία δεν έχει επαρκή ηλιασμό, οπότε δεν επιτυγχάνεται το στέγνωμα της. Τα σημεία αυτά αποτελούν και ευαίσθητα σημεία κατά την εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης.



**Εικόνα 13: Μαύρη κρούστα λόγω βιολογικών επιδράσεων.**

**B) Απώλεια υλικού:**

Η συνοχή λίθων και κονιάματος στο υπό μελέτη κτίριο είναι σε πολύ καλή κατάσταση στο μεγαλύτερο μέρος της τοιχοποιίας. Βασικός παράγοντας φθοράς είναι η δράση του νερού, είτε όμβριο κατερχόμενο στην πρόσοψη, είτε ανερχόμενο με το φαινόμενο των τριχοειδών, καθώς και από τις εκνεφώσεις του γειτνιάζοντος θαλασσινού νερού. Φαινόμενα εξάνθησης - απώλειας κονιάματος - εμφανίζονται στην ανατολική όψη του κτιρίου σε ύψος έως 1μ από το έδαφος, λόγω ανοδικής υγρασίας και κρυστάλλωσης των αλάτων στο εσωτερικό των πόρων, με αποτέλεσμα την δημιουργία εσωτερικών τάσεων που οδηγούν σε ρηγμάτωση και απώλεια υλικού (Εικόνα 14). Έλλειψη συνοχής παρουσιάζεται και στο σημείο έδραση της τοιχοποιίας, όπου σε μικρή έκταση παρατηρείται και απώλεια υλικού με εμφάνιση οπών.



Εικόνα 1: Ανοδική υγρασία – φαινόμενα κρυπτοεξάνθησης

Φαινόμενα κυψέλωσης και στρογγυλοποίησης των λίθων εμφανίζονται ιδιαίτερα στο ισόγειο της κατασκευής (Εικόνα 15). Ο τρόπος εκδήλωσης της φθοράς είναι χαρακτηριστικός και εμφανίζεται με την ακανόνιστη απόσπαση των κόκκων του υλικού και το σχηματισμό κοιλοτήτων και σπηλαιώσεων. Ο μηχανισμός της φθοράς λαμβάνει χώρα λόγω ταχείας εξάτμισης του νερού (συνθήκες ηλιοφάνειας και δράσης ανέμων) σε σημεία με μεγάλες συγκεντρώσεις ευδιάλυτων αλάτων - με αποτέλεσμα την απώλεια υλικού. Η απόσπαση μικρών κόκκων σε αυτά τα σημεία, με αποτέλεσμα την λείανση ακμών και γωνιών οδηγούν σταδιακά σε στρογγυλεμένο προφίλ.





Εικόνα 2: Κυψέλωση - στρογγυλοποίηση

Στο υπό μελέτη κτίριο παρατηρούνται επίσης φαινόμενα διάρρηξης και αποκόλλησης ακριανού κομματιού λίθου λόγω υπερκείμενων φορτίων. Αλλά και τεχνητή μηχανική καταπόνηση των λίθων – τσαπετάρισμα - για καλύτερη πρόσφυση του επιχρίσματος (Εικόνα 16).



Εικόνα 3: Απώλεια υλικού λόγω μηχανικών καταπονήσεων

Σημαντικό στοιχείο της παθολογίας αποτελεί η κατάρρευση τμήματος της βορινής όψης (Εικόνα 17). Η κατάρρευση έφτασε ως το ακριανό παράθυρο του τελευταίου ορόφου. Για να συγκρατηθεί η σύνδεση της βόρειας με τη δυτική τοιχοποιία το πρέκι του παραθύρου αντικαταστάθηκε με δοκάρι από οπλισμένο σκυρόδεμα (Εικόνα 18).



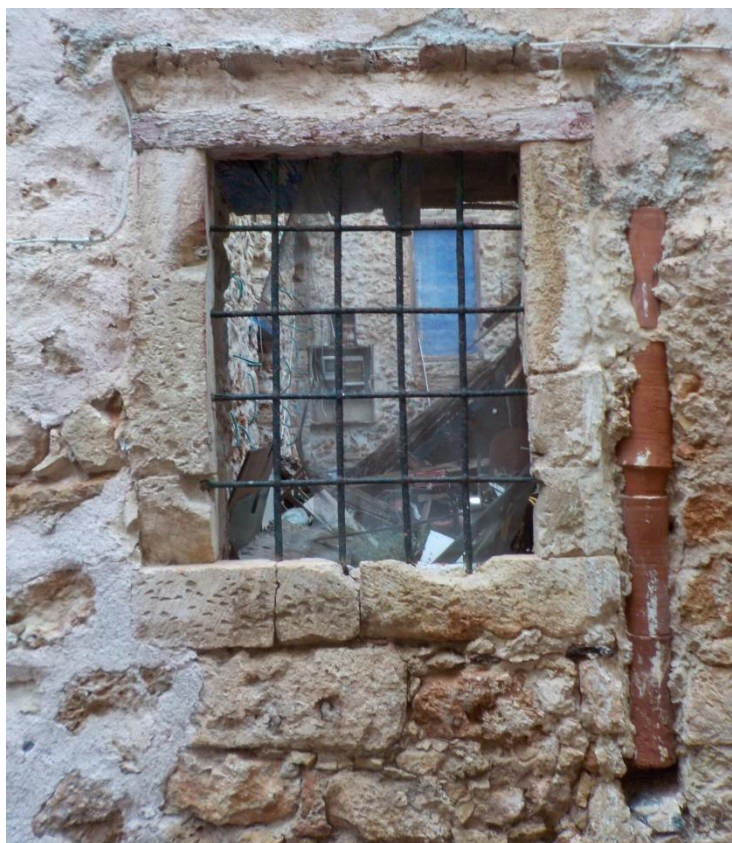
Εικόνα 4: Κατάρρευση τμήματος της βορινής όψης





Εικόνα 18: Κατάρρευση τμήματος της βορινής όψης μέχρι το παράθυρο του τελευταίου ορόφου

Τέλος εντοπίστηκαν φθορές στα λίθινα γείσα που βρίσκονται πάνω από τα παράθυρα και στην εμφανή πήλινη υδρορροή (Εικόνα 19).

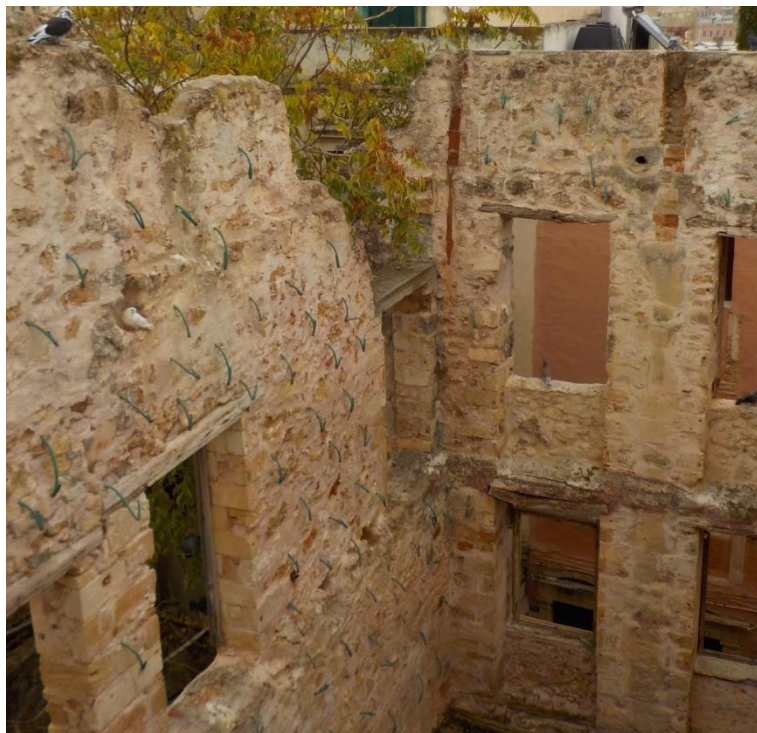


Εικόνα 19: Θραύση λίθινων γείσων και πηλινής υδρορροής.

### 3.3 Προγενέστερες επεμβάσεις

Το υπό μελέτη κτίριο φέρεται να είναι εγκαταλελειμμένο χωρίς επιστέγαση και ενδιάμεσα πατώματα τα τελευταία τριάντα χρόνια τουλάχιστον. Παρά αυτό το γεγονός, στο υπό μελέτη κτίριο έχουν γίνει σωστικές εργασίες που χρονολογούνται το 2003 για αποφυγή κατάρρευσης, γεγονός που θα έθετε σε κίνδυνο τα γειτονικά του κτίρια. Οι κυριότερες επεμβάσεις που έγιναν στο κτίριο αφορούν την εφαρμογή ενεμάτων, το βαθύ αρμολόγημα και η τοποθέτηση δοκαριού οπλισμένου σκυροδέματος, σε αντικατάσταση του ξύλινου πρεκιού, για σύνδεση της βόρειας με την ανατολική τοιχοποιία μετά την τοπική κατάρρευση (Εικόνες 20,21). Η εφαρμογή ενέματος στο σύνολο της τοιχοποιίας επιβεβαιώνεται μέχρι σήμερα λόγω της ύπαρξης σωληνίσκων σε όλη την εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας μέσω των οποίων πρεσαρίστηκε το ένεμα για σφράγιση των κατασκευαστικών αρμών.

Σε αρκετές περιοχές στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας και συγκεκριμένα γύρω από τα παράθυρα και το μπαλκόνι έχουν γίνει τοπικές επισκευές με τσιμεντοκονίαμα, πιθανότητα για την κάλυψη επιφανειακών ρωγμών (Εικόνα 22).



Εικόνα 20: Σωληνίσκοι εφαρμογής ενεμάτων και δοκάρι οπλισμένου σκυροδέματος



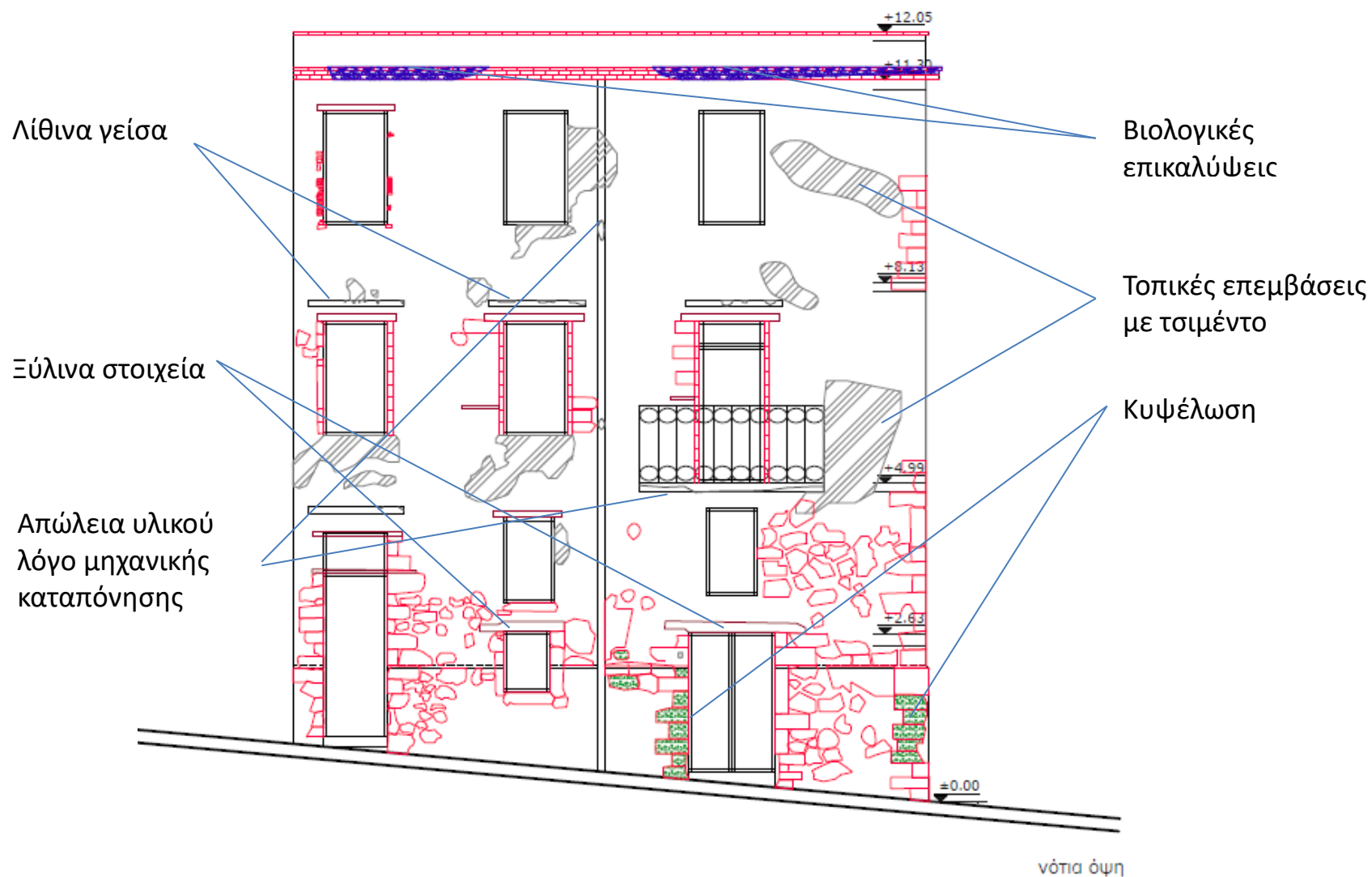


Εικόνα 21: Βαθύ αρμολόγημα που διατηρείται σε καλή κατάσταση σε μεγάλο ποσοστό της τοιχοποιίας

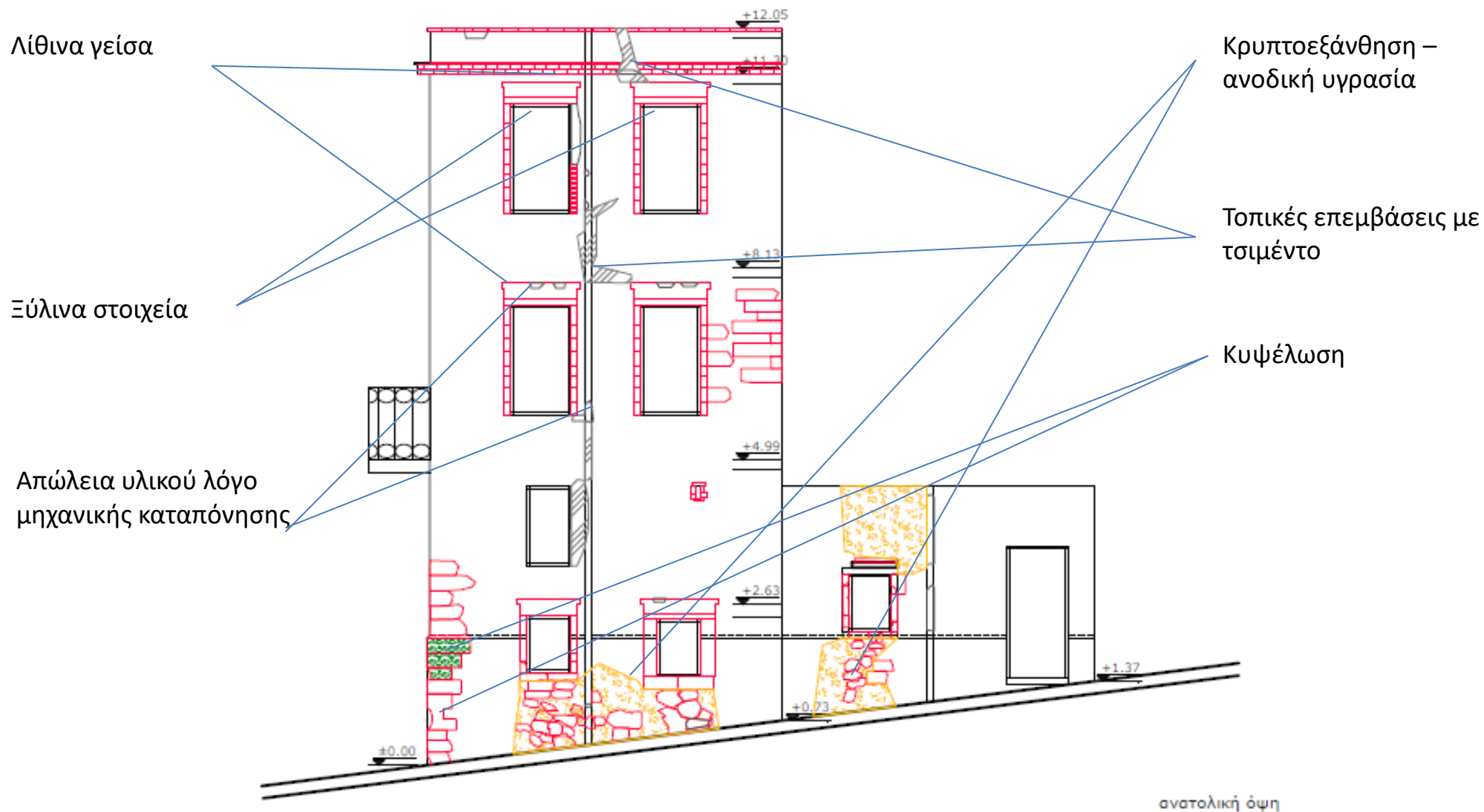


Εικόνα 22: Τοπική επισκευή με τσιμεντοκονίαμα

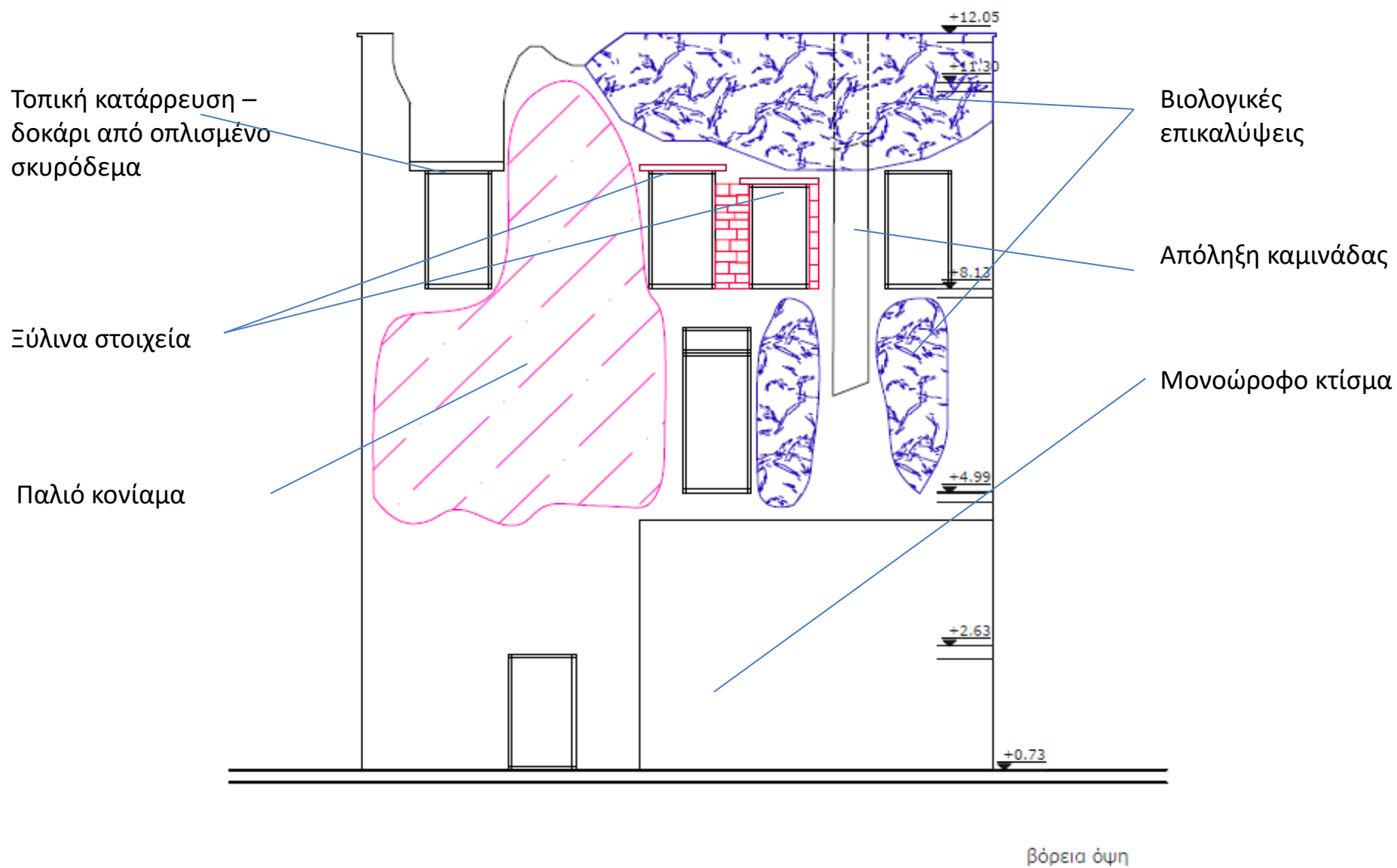
Ακολουθεί συνολική αποτύπωση των φθορών και των προγενέστερων επεμβάσεων στις τρεις όψεις του κτιρίου (Εικόνες 23,24,25).



Εικόνα 23: Αποτύπωση φθορών και προγενέστερων επεμβάσεων νότια όψη



Εικόνα 24: Αποτύπωση φθορών και προγενέστερων επεμβάσεων ανατολική όψη



Εικόνα 25: Αποτύπωση φθορών και προγενέστερων επεμβάσεων βόρεια όψη

#### 4. Στατική και ιδιομορφική ανάλυση της υφιστάμενης κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια από τις πιο ισχυρές και έγκριτες μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης για επίλυση προβλημάτων δομικών κατασκευών. Βασική αρχή της μεθόδου είναι η υποδιαίρεση της κατασκευής σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (finite elements). Τα στοιχεία αυτά διατηρούν τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών της αρχικής κατασκευής, ενώ συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς κόμβους (nodes). Η ανάπτυξη της μεθόδου μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory) και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για τη στατική και δυναμική, γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες[21].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί ότι η κίνηση ενός συστήματος περιγράφεται από έναν ορισμένο αριθμό παραμέτρων κίνησης, που αντιστοιχούν σε βαθμούς ελευθερίας κινήσεων των κόμβων, επιτρέποντας την ελαστική διακριτοποίηση. Ο αριθμός των παραμέτρων αυτών εξαρτάται από τη δομή του συστήματος, τον τρόπο διέγερσης και την επιδιωκόμενη ακρίβεια. Η επιλογή των παραμέτρων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποδίδει κατά το δυνατόν καλύτερα την πραγματική κίνηση του συστήματος.

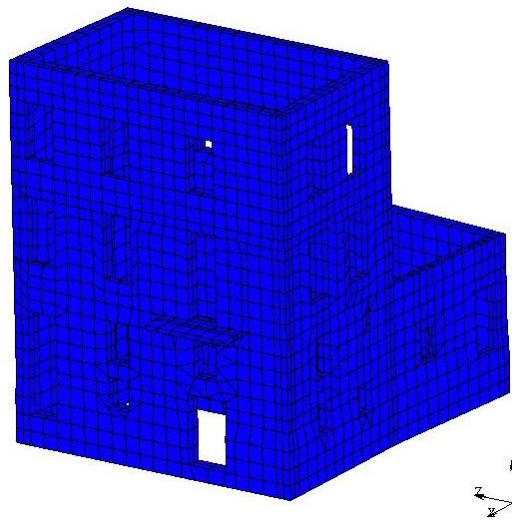
Η κίνηση ενός ελαστικού φορέα εξαρτάται άμεσα από τις δύο βασικές φυσικές του ιδιότητες, την αδράνεια (μάζα) και την ελαστικότητά του. Εξαρτάται ακόμη και από τις διάφορες μορφές αντίστασης που αναπτύσσονται κατά την ταλάντωση της κατασκευής και αφαιρούν προοδευτικά μηχανική ενέργεια με τη διαδικασία της απόσβεσης. Τα εξωτερικά φορτία ή καταναγκασμοί που επιβάλλονται στον φορέα ορίζονται με τον όρο διέγερση. Μία διέγερση μπορεί να παρουσιάζει ή όχι περιοδικότητα[22].

Τα κτίρια από τοιχοποιία είναι δύσκαμπτες, μη μονολιθικές κατασκευές με το κύριο φορτίο κατανομημένο καθ' ύψος και ψαθυρή συμπεριφορά που δεν επιτρέπει σημαντική πλαστική παραμόρφωση του υλικού οδηγώντας σε μη γραμμική συμπεριφορά. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί την πιο κατάλληλη μέθοδο ανάλυσης κατασκευών με σύνθετη γεωμετρία και υλικά με ετερογενείς ιδιότητες. Η χρήση διδιάστατων ή τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευές από τοιχοποιία σε σχέση με πλαισιακά μοντέλα και απλοποιητικές παραδοχές διαφραγματικής λειτουργίας πλακών[23]. Η ανάλυση με παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς για χαμηλά επίπεδα φόρτισης είναι πολύ αποτελεσματική στην κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής[24]. Μια ανασκόπηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας στην προσομοίωση κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία φανερώνει ότι η δισδιάστατη plane stress ανάλυση χρησιμοποιείται πιο συχνά σε τοιχοποιία πλήρωσης πάνω σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος, ενώ η χρήση στοιχείων κελύφους και τρισδιάστατων στοιχείων οδηγεί σε πιο σωστή προσομοίωση της φέρουσας τοιχοποιίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται η παραδοχή ότι η τοιχοποιία έχει ισотροπική ελαστική συμπεριφορά για λόγους απλοποίησης του προβλήματος[25][26]. Οι Dhanasekar et al. πρότειναν ένα μη γραμμικό μοντέλο



πεπερασμένων στοιχείων βασισμένο σε μέσες τιμές ιδιοτήτων προερχόμενες από εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια τοιχοποιίας[27], ενώ άλλοι μελετητές ανέπτυξαν πιο ακριβή μοντέλα με ξεχωριστές δοκιμές σε τούβλα και κονιάματα[28].

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία της προσομοίωσης του κτιρίου (Εικόνα 26) με χρήση του προγράμματος Marc Mentat 2015.0.0 Student Edition μέσω του οποίου πραγματοποιούνται γραμμικές ελαστικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



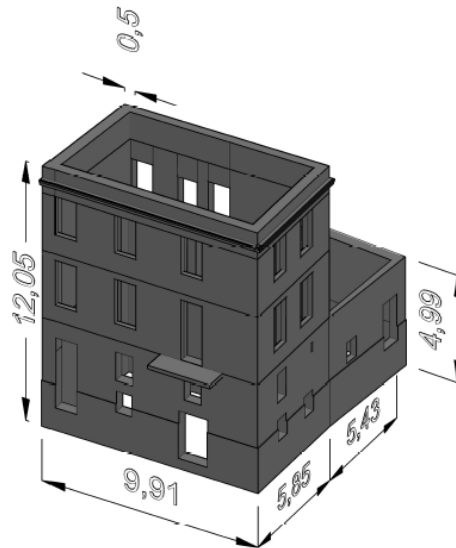
Εικόνα 26: Απεικόνιση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, νοτιοανατολική όψη

Παρακάτω παρατίθενται όλες οι πληροφορίες που χρησιμοποιήθηκαν σχετικά με τη γεωμετρία, τα υλικά, τα στοιχεία προσομοίωσης, τις διατομές, τις συνοριακές συνθήκες και τα φορτία της κατασκευής. Παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε για τη διερεύνηση της επιρροής των στατικών φορτίων, τον προσδιορισμό των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής και τους τρόπους παραμόρφωσης της όταν υπόκειται σε σεισμική φόρτιση.

#### 4.1 Εισαγωγή γεωμετρίας

Το μοντέλο της κατασκευής σχεδιάζεται αρχικά σε περιβάλλον AutoCad και στη συνέχεια εισάγεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια της εντολής 'Import > General CAD as solid' (Εικόνα 27).





Εικόνα 27: Εισαγωγή της γεωμετρίας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Από εκεί με τη βοήθεια των εντολών 'Geometry & Mesh' το γεωμετρικό μοντέλο διακριτοποιείται σε στερεά στοιχεία.

Το υπό μελέτη κτίριο έχει εξωτερικές διαστάσεις 9.91X5.85m σε κάτοψη και 12.05m ύψος, ενώ το πάχος της τοιχοποιίας κυμαίνεται από 0.5-0.45m.

## 4.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας

Στην παρούσα μελέτη η διασταύρωση των δεδομένων εφαρμόστηκε κυρίως στην ενσωμάτωση των βασικών μεγεθών που αφορούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών της κατασκευής, δηλαδή την πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο του Poisson[29]. Στη διερεύνηση αυτή διασταυρώθηκαν πληροφορίες από δημοσιευμένες μελέτες όπως του Νεωρίου Moro[22], του κυκλικού (γενοβέζικου) πύργου[29] και του Φάρου[23], στην Παλιά πόλη Χανίων, παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία στο Βάμο Χανίων[21], του Μεσαιωνικού Νεωρίου Milly στη Ρόδο[30] και μελέτες μηχανικών χαρακτηριστικών του ψαμμόλιθου από τη διεθνή βιβλιογραφία[31][32] (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Διασταύρωση δεδομένων μηχανικών χαρακτηριστικών από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία

	Μέτρο Ελαστικότητας GPa	Πυκνότητα kg/m <sup>3</sup>	Λόγος Poisson
<b>Νεώριο Moro (Χανιά)[22]</b>			
Κανονική τοιχοποιία	8.82	1289.8	0.15
Φθαρμένη τοιχοποιία με μειωμένο Μ.Ε. στο 66% του κανονικού και την ίδια πυκνότητα μάζας	5.88	1289.8	0.15
Φθαρμένη Τοιχοποιία με μειωμένο Μ.Ε. στο 66% του κανονικού αι μειωμένη πυκνότητα μάζας στο 66% του κανονικού	5.88	851.3	0.15
<b>Κυκλικός Γενοβέζικος Πύργος (Χανιά)[29]</b>			
Τμήμα α	2.78	2180	0.2
Τμήμα β	1.95	2180	0.15
Τμήμα γ	1.39	1526	0.15
<b>Φάρος (Χανιά)[23]</b>			
Ανωδομή	<b>8.825</b>	<b>1944</b>	<b>0.15</b>
Βάση	<b>6.150</b>	<b>1700</b>	<b>0.15</b>
<b>Παραδοσιακό κτίριο στο Βάμο (Χανιά)[21]</b>			
Λιθοδομή	1.543	2000	0.25
<b>Arsenal de Milly (Ρόδος)[30]</b>			
Κανονική τοιχοποιία	1.8	2243	0.25
Φθαρμένη τοιχοποιία	0.9	2243	0.25
<b>Hawkesbury sandstone[31]</b>			
Ψαμμόλιθος I/II	8-14	2447	
Ψαμμόλιθος III	6-10	2447	
<b>Ιστορικά κτίρια από ψαμμόλιθο[32]</b>			
Ψαμμόλιθος		2179-2594	

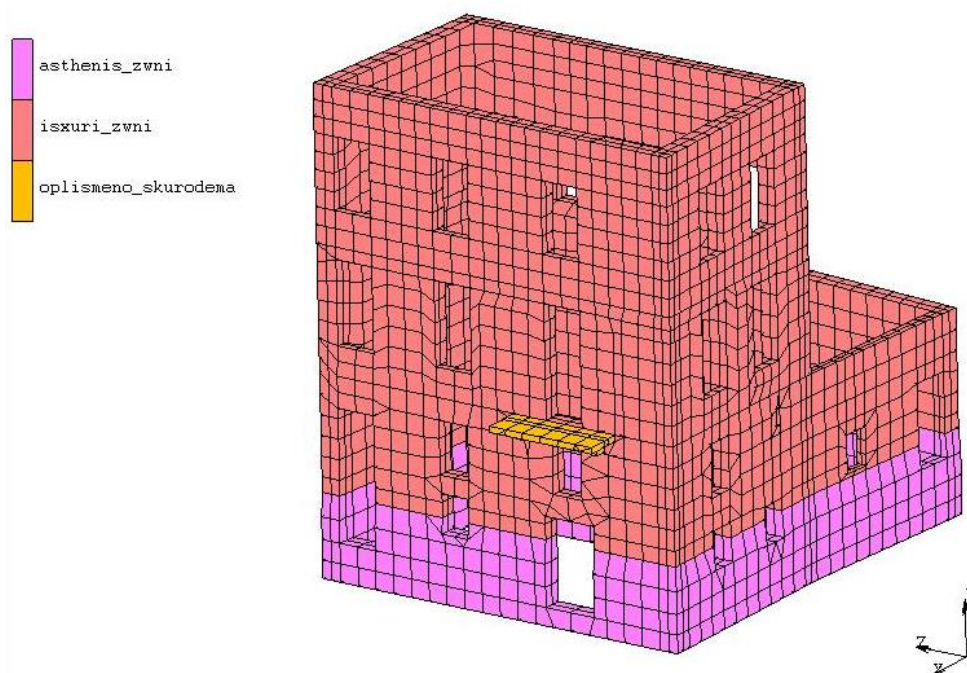
Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των τιμών και ιδιαίτερα του μέτρου ελαστικότητας για τις διαφορετικές μελέτες περίπτωσης. Για το λόγο αυτό πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή των μηχανικών χαρακτηριστικών της παρούσας κατασκευής που να προσομοιάζουν όσο γίνεται καλύτερα την πραγματική κατάσταση. Από την οπτική παρατήρηση της κατασκευής και από το γεγονός ότι η τοιχοποιία στέκεται ασκεπής για πάνω από τριάντα χρόνια με μικρές φθορές, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να αποδοθούν στην κατασκευή μηχανικά χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν σε μια υγιή συντηρημένη κατασκευή όπως ο Φάρος Χανίων και τα στοιχεία για την κανονική τοιχοποιία από το Νεώριο Moro και όχι μηχανικά χαρακτηριστικά κάποιας κατασκευής με εκτεταμένες φθορές όπως ο Κυκλικός Γενοβέζικος Πύργος. Στην επιλογή αυτή συναινεί επίσης το γεγονός ότι η τοιχοποιία έχει δεχτεί σωστικές επεμβάσεις με την εφαρμογή ενεμάτων το 2003. Σε επόμενο στάδιο της παρούσας μελέτης θα χρειαστεί να γίνουν πειραματικές μετρήσεις με καταστροφικές ή μη καταστροφικές μεθόδους για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας.

### 4.3 Ιδιότητες υλικών

Στην κατασκευή συναντούνται δύο βασικά υλικά, λιθοδομή και σκυρόδεμα, στα οποία αποδόθηκαν μηχανικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από σχετική βιβλιογραφία. Η τοιχοποιία αποφασίστηκε να χωριστεί σε δύο ζώνες όπου θα αποδοθούν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Την ασθενή ζώνη, που αποτελεί τη βάση του κτιρίου μέχρι το ύψος των 2m, και έχει εμφανή σημάδια αποσάθρωσης του λίθου και του συνδετικού κονιάματος λόγω της ανοδικής υγρασίας, και την ισχυρή ζώνη που αποτελεί το υπόλοιπο τμήμα της τοιχοποιίας. Επιπλέον, το μπαλκόνι και το ανώφλι του βόρειου παραθύρου της κατασκευής είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα (Εικόνα 28). Για το κάθε υλικό θα πρέπει να οριστεί η πυκνότητα μάζας, ο λόγος του Poisson και το μέτρο ελαστικότητας. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2) παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά που αποδόθηκαν σε κάθε τμήμα της κατασκευής.

Πίνακας 2: Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών

	Μέτρο Ελαστικότητας GPa	Πυκνότητα kg/m <sup>3</sup>	Λόγος Poisson $\nu$
Ασθενής ζώνη	6.15	1700	0.15
Ισχυρή ζώνη	8.825	1944	0.15
Οπλισμένο σκυρόδεμα	7.6	2200	0.2



Εικόνα 28: Απεικόνιση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με βάση τα υλικά

#### 4.4 Διακριτοποίηση του φορέα - τύπος στοιχείων προσομοίωσης

Ανάλογα με τις δυνατότητες παραμόρφωσης που προσδίδονται στα στοιχεία και της μορφής τους χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες όπως στοιχεία ράβδου, δοκού, επίπεδα στοιχεία τριγωνικής ή τετραγωνικής μορφής, στερεά στοιχεία όπως τετραεδρικά κ.α. Συνεπώς η επιλογή του τύπου στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν βασίζεται στη δυνατότητά τους να περιγράψουν την μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής που προσομοιώνεται με ικανοποιητική ακρίβεια. Ο ορισμός των στοιχείων γίνεται με βάση τους κόμβους (nodes) που τοποθετούνται αρχικά. Σε κάθε κόμβο ενός στοιχείου αντιστοιχούν οι αριθμοί 'κομβικών μετατοπίσεων' που ονομάζονται βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom).

Η διακριτοποίηση του φορέα της κατασκευής πρέπει να γίνεται προσεκτικά και έχοντας στόχο να περιγράψει, όσο το δυνατόν πιο πιστά την πραγματική κατασκευή και τις γεωμετρικές ιδιαιτερότητες του φορέα. Ο αριθμός των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν είναι καθοριστικός της αξιοπιστίας του μοντέλου, η χρήση μικρού αριθμού στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε μοντέλο πιο δύσκαμπτο από την πραγματική κατασκευή ενώ ο υπερβολικά μεγάλος αριθμός στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε δύσκληστο υπολογιστικό μοντέλο.

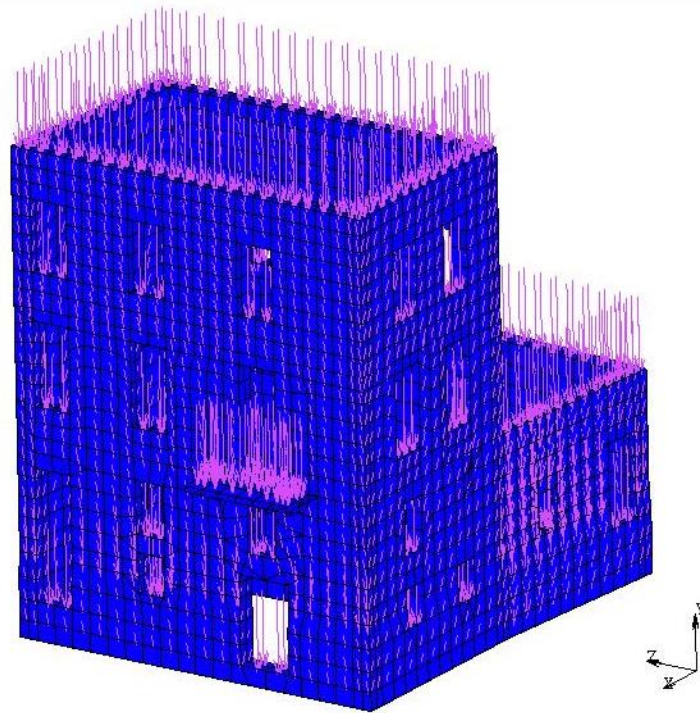
Το υπό μελέτη κτίριο είναι δομημένο με φέρουσα τοιχοποιία. Κατά συνέπεια, η χρήση γραμμικών μοντέλων είναι ανεπαρκής, λόγω του τρισδιάστατου χαρακτήρα του φέροντα οργανισμού και για αυτό επιλέχθηκε χρήση τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό γενικής εφαρμογής που χρησιμοποιήθηκε είναι το Marc Mentat.

Για τη διακριτοποίηση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν αρχικά 2119 τρισδιάστατα στοιχεία (εξαεδρικά, οκτακομβικά – hex8) διαστάσεων περίπου 0.5x0.5x0.5cm και 4196 κόμβοι. Στο δεύτερο στάδιο της διακριτοποίησης αποφασίστηκε η δημιουργία στοιχείων με μικρότερη διάσταση για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση. Έτσι ο τελικός αριθμός τρισδιάστατων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της υφιστάμενης κατασκευής ανέρχεται στα 3803 στοιχεία διαστάσεων περίπου 0.5x0.5x0.25cm και 6307 κόμβοι.

#### 4.5 Συνοριακές συνθήκες

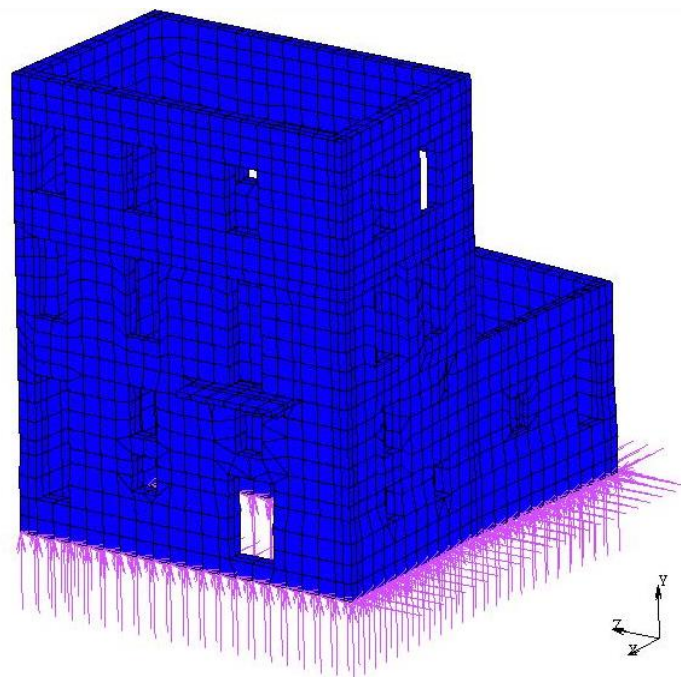
Στο κτίριο εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα φορτία:

- Το ίδιο βάρος της κατασκευής (structural gravity load) για την επιβολή του οποίου ορίζεται το μέγεθος της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $g=9.81\text{m/s}^2$  με κατεύθυνση προς το έδαφος (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Ιδίο βάρος της κατασκευής

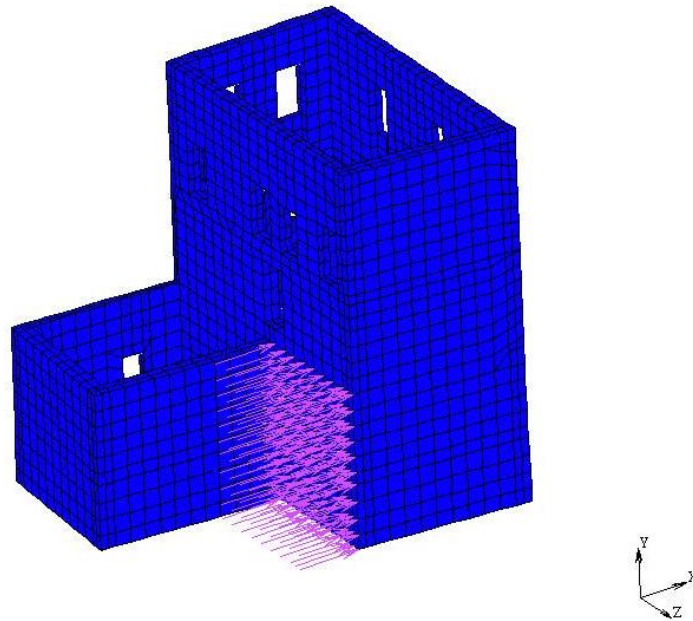
- Η θεμελίωση του κτιρίου θεωρήθηκε περιμετρικά ως πάκτωση απευθείας εδρασμένη στο έδαφος στη στάθμη 0.00. Η εισαγωγή της πάκτωσης της κατασκευής στο έδαφος (structural fixed displacement) γίνεται με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος (Εικόνα 30).



Εικόνα 30: Έδραση της κατασκευής



- Η στήριξη του κτιρίου στα γειτονικά του (structural fixed displacement) η οποία ορίζεται με την επιβολή μηδενικής μετατόπισης κατά τον άξονα που είναι κάθετος στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο κτιρίων (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Στήριξη του κτιρίου σε γειτονικές κατασκευές

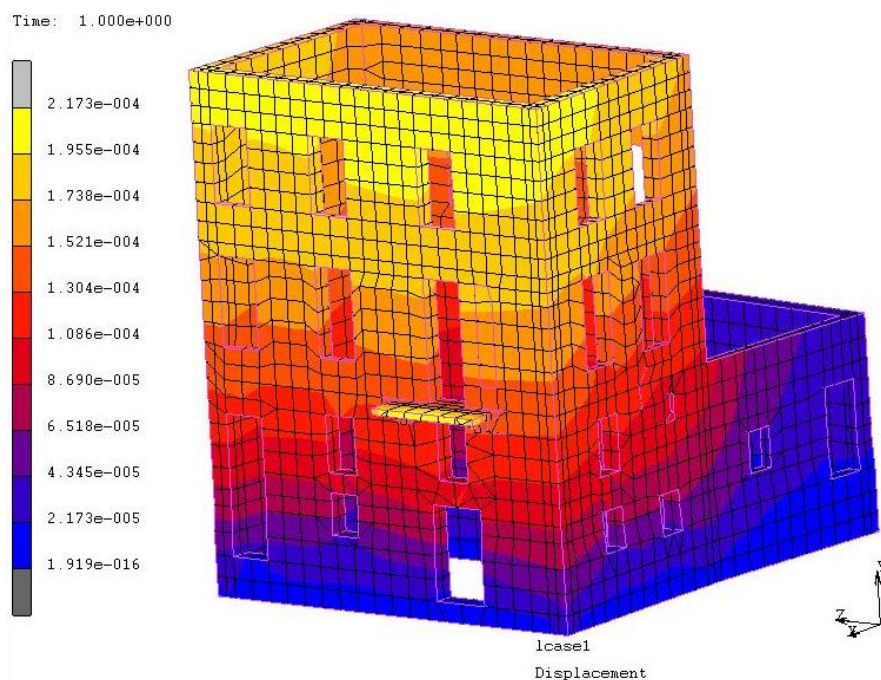
## 4.6 Αποτελέσματα

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Marc Mentat προσφέρει μια σειρά από επιλογές σχετικά με τα σενάρια φόρτισης και τη μέθοδο ανάλυσης – επίλυσης που θα ακολουθηθεί. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε αρχικά μια επίλυση μόνο για τα στατικά φορτία (Static analysis), με την οποία επιβεβαιώνεται και η σωστή λειτουργία του μοντέλου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση (Modal analysis) ώστε να εντοπιστούν οι ιδιοσυχνότητες που διεγείρουν την κατασκευή και οι ιδιομορφές της και τέλος έγινε επίλυση του μοντέλου με την επιβολή πραγματικής σεισμικής καταπόνησης που να περιέχει συχνότητες που διεγείρουν την κατασκευή.

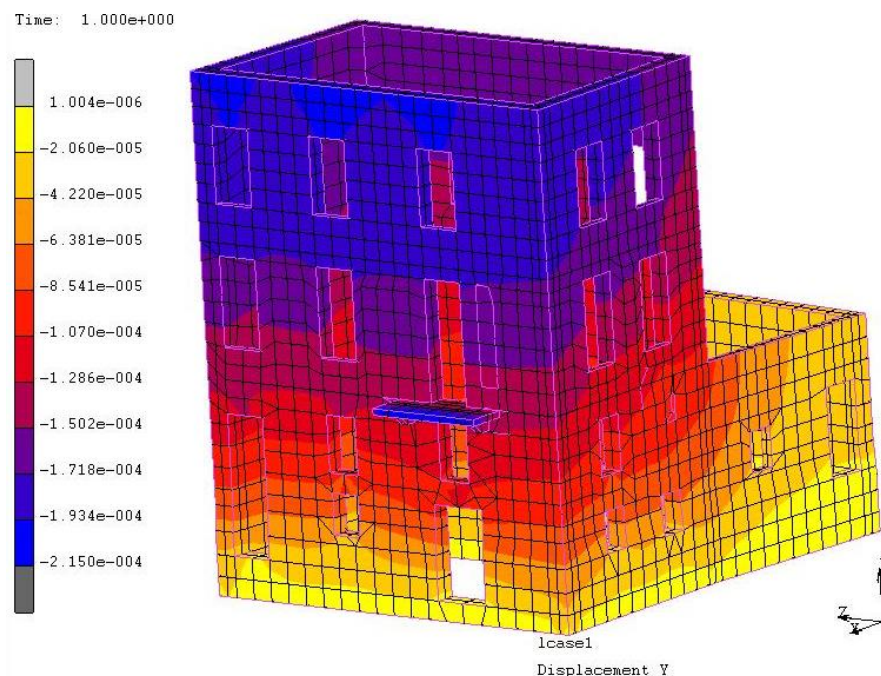
### 4.6.1 Στατική ανάλυση

Η στατική ανάλυση θεωρεί ότι οι δυνάμεις που καταπονούν μια κατασκευή είναι στατικές δηλαδή ανεξάρτητες του χρόνου. Στα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης που παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνες 32,33) βλέπουμε ότι το εύρος των συνολικών μετατοπίσεων (displacement) ανέρχεται στα  $2.173 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  ενώ των μετατοπίσεων στον κατακόρυφο άξονα στα  $2.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ , παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες συνολικές και κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω του ίδιου βάρους της κατασκευής συντελούνται στον τελευταίο όροφο της κατασκευής και συγκεκριμένα στην ελεύθερη

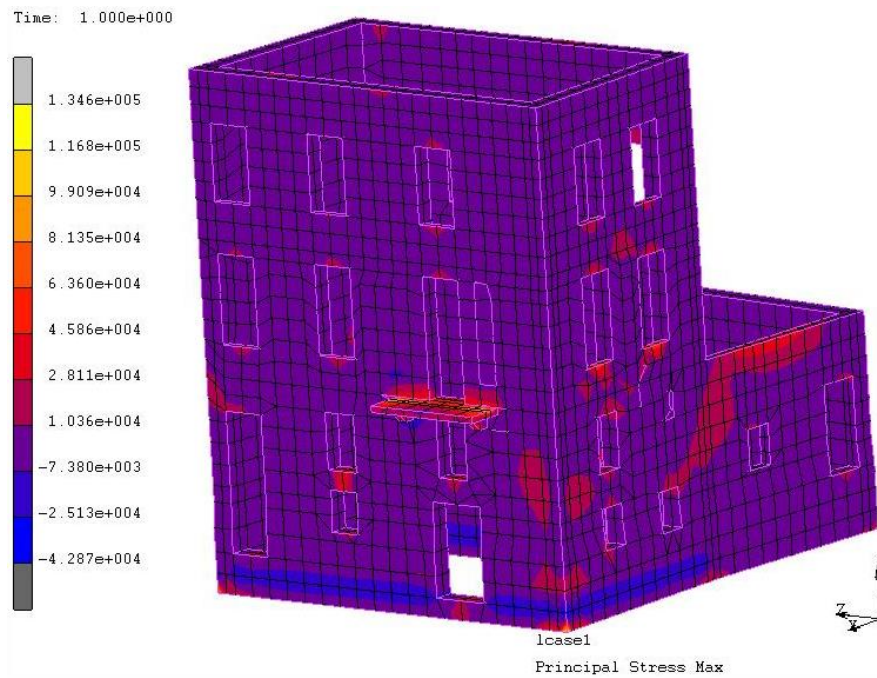
νοτιοανατολική γωνία του κτιρίου. Οι συγκέντρωση μέγιστων κύριων τάσεων (Εικόνα 34) υποδεικνύει περιοχές με εφελκυσμό, άρα ασθενείς περιοχές της κατασκευής, λόγω της μειωμένης αντοχής της τοιχοποιίας σε εφελκυσμό. Τέτοιες περιοχές είναι οι γωνίες των ανοιγμάτων, τα πρέκια και οι ποδιές των παραθύρων.



Εικόνα 32: Συνολικές μετατοπίσεις (displacement)



Εικόνα 33: Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα



Εικόνα 34: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principle Stress Max)

#### 4.6.2 Ιδιομορφική ανάλυση

Η επίλυση ενός φορέα με εφαρμογή απλών κινήσεων ανεξάρτητων από την εξωτερική (σεισμική) διέγερση, ως ελεύθερη ταλάντωση με μηδενική απόσβεση κατά την αρχή μέτρησης του χρόνου, μας δίνει τις ιδιομορφές και τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Μια τέτοια συμπεριφορά είναι καθαρά θεωρητική δεδομένου ότι στις πραγματικές κατασκευές τα φαινόμενα εσωτερικής τριβής αποσβένουν τις ταλαντώσεις. Για κάθε ιδιοσυχνότητα, κάθε σημείο της κατασκευής εκτελεί μια αρμονική κίνηση γύρω από τη θέση ισορροπίας του. Η παραμορφωσιακή κατάσταση κατά την οποία όλα τα σημεία της κατασκευής έχουν το μέγιστο εύρος, χαρακτηρίζει τον τρόπο ταλάντωσης και άρα την αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα. Η πιο χαμηλή ιδιοσυχνότητα λέγεται θεμελιώδης[33]. Σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία, δύσκαμπτες με κατανεμημένη μάζα καθ' ύψος η κύρια συχνότητα που διεγείρει την κατασκευή δεν είναι πάντα η πρώτη και επίσης συμμετέχουν με σημαντικό ποσοστό περισσότερες συχνότητες. Αυτό αποτελεί μια βασική διαφορά με τον πλαίσιακό φορέα σκυροδέματος[23].

Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες μιας κατασκευής αποτελούν εργαλείο διερεύνησης της παθολογίας της. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων έχουν τη δυνατότητα εύρεσης αυτών των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων σύμφωνα με τα θεωρητικά δεδομένα, τις παραδοχές και τις απλοποιήσεις που γίνονται.

Υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων που προσδιορίζονται υπολογιστικά από το τρισδιάστατο μοντέλο, με αυτά που προκύπτουν από την επεξεργασία επιτόπου μετρήσεων, ενισχύοντας έτσι τον έλεγχο της αξιοπιστίας της προσομοίωσης του φορέα και τον εντοπισμό τοπικών αστοχιών του. Εναλλακτικά υπάρχει η δυνατότητα διασταύρωσης

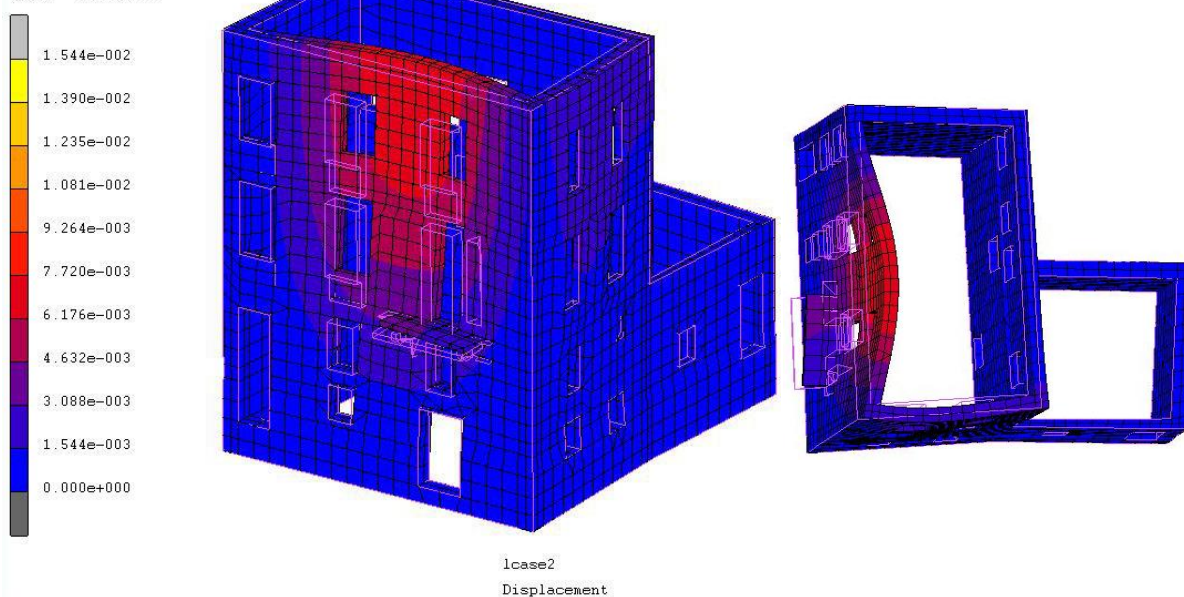


δεδομένων από τη διεθνή και την ελληνική βιβλιογραφία και κατανόησης της συμπεριφοράς του μέσα από τις ιστορικές του φάσεις.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η ιδιομορφική ανάλυση της υφιστάμενης κατασκευής για την εύρεση των 10 πρώτων ιδιομορφών που τη διεγείρουν (Εικόνα 35). Οι συχνότητες ταλάντωσης που προέκυψαν κυμαίνονται από 8.7Hz μέχρι 28.55Hz.

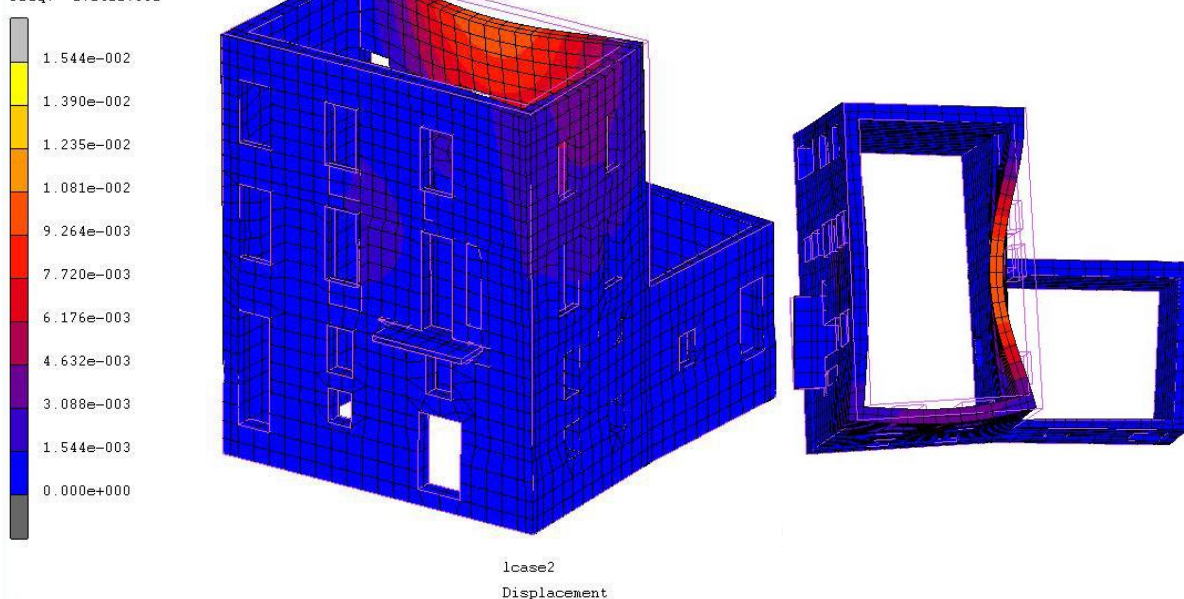
### 1<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 8.7Hz

Inc: 1:1  
Time: 1.000e+000  
Freq: 8.711e+000



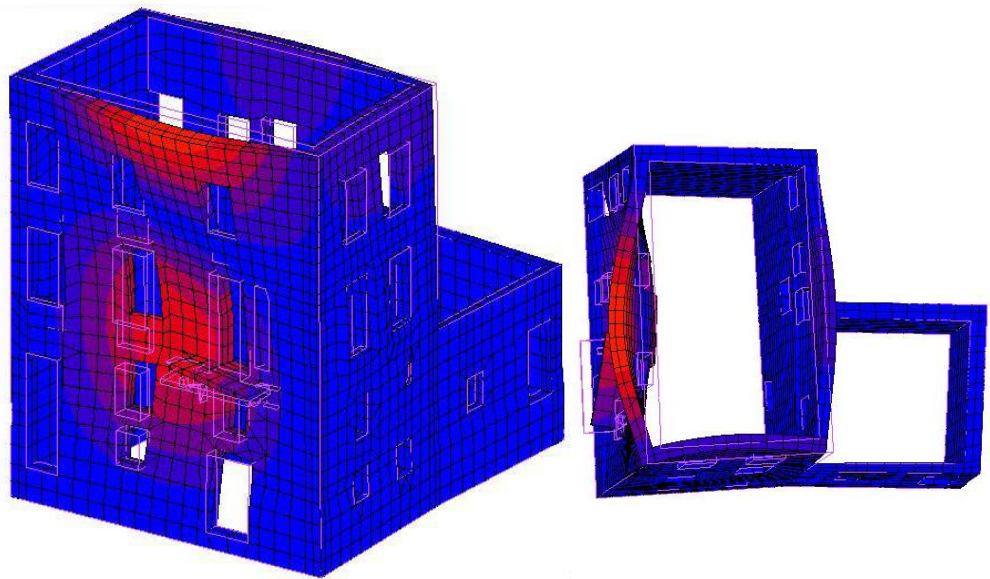
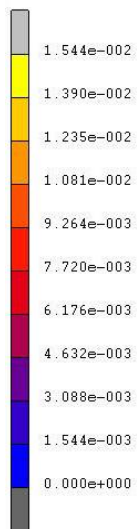
### 2<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 11.41Hz

Inc: 1:2  
Time: 1.000e+000  
Freq: 1.141e+001



**3<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 14.98Hz**

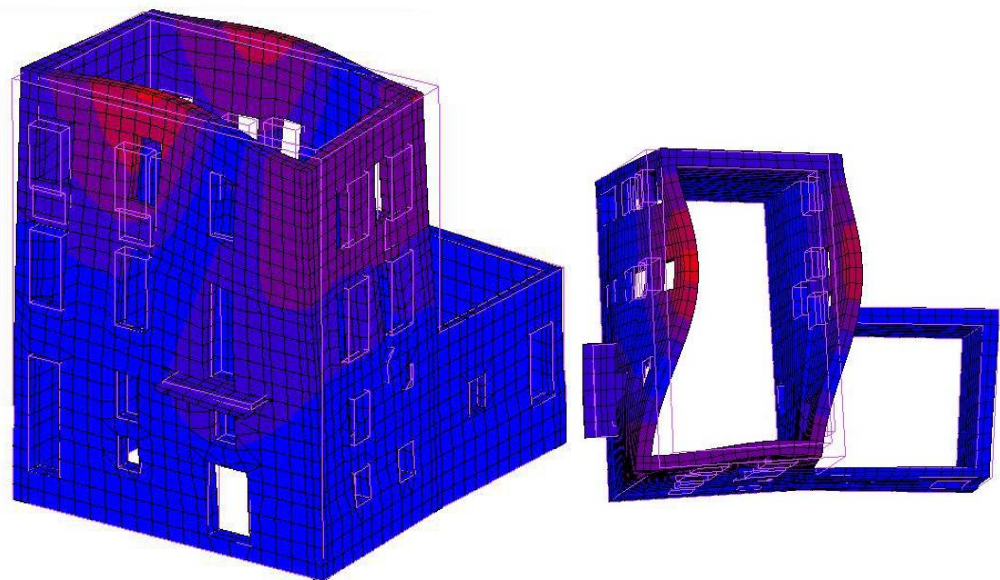
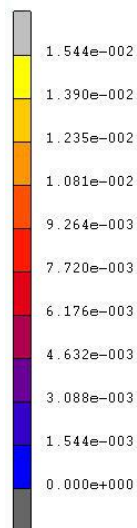
Inc: 1:3  
Time: 1.000e+000  
Freq: 1.498e+001



lcase2  
Displacement

**4<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 16.02Hz**

Inc: 1:4  
Time: 1.000e+000  
Freq: 1.602e+001

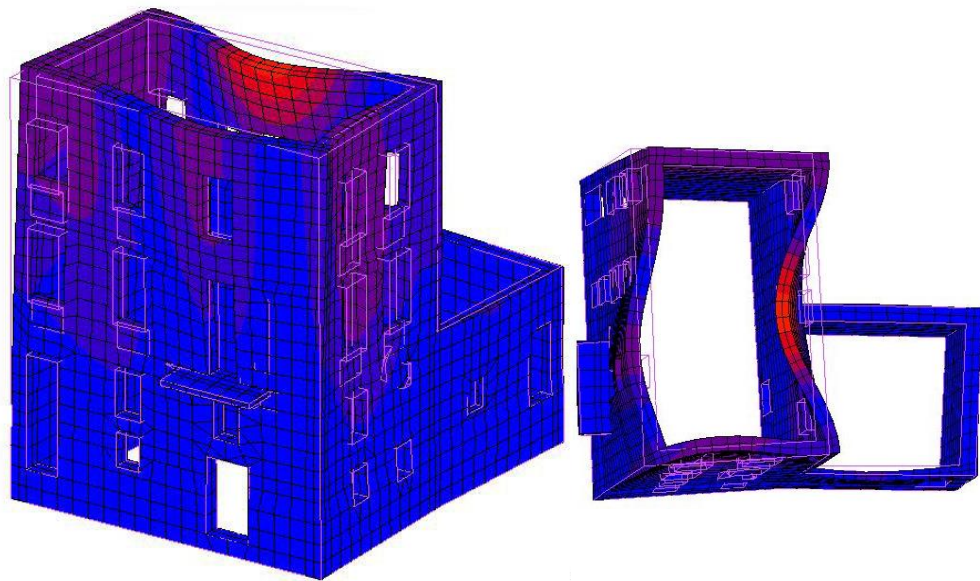
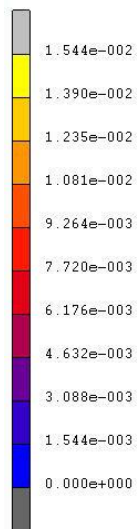


lcase2  
Displacement



**5<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 21.93Hz**

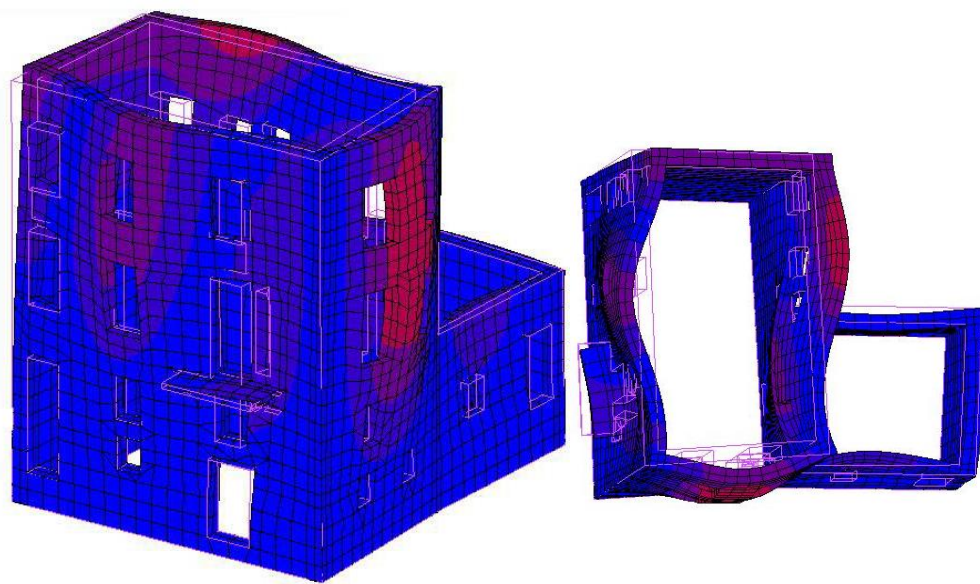
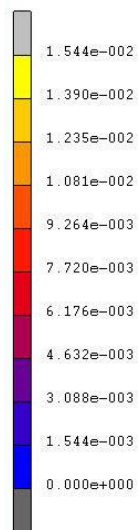
Inc: 1:5  
Time: 1.000e+000  
Freq: 2.193e+001



lcase2  
Displacement

**6<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 22.15Hz**

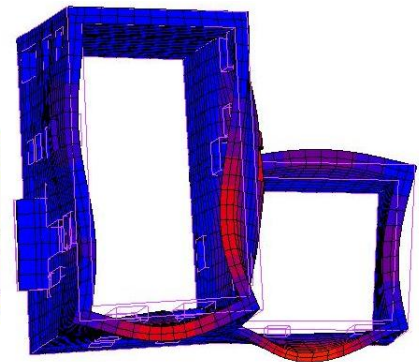
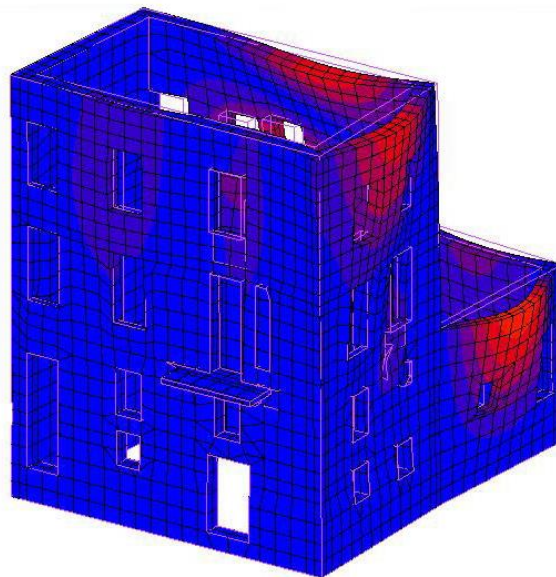
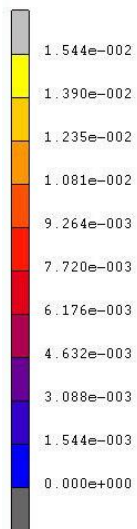
Inc: 1:6  
Time: 1.000e+000  
Freq: 2.215e+001



lcase2  
Displacement

**7<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 25.28Hz**

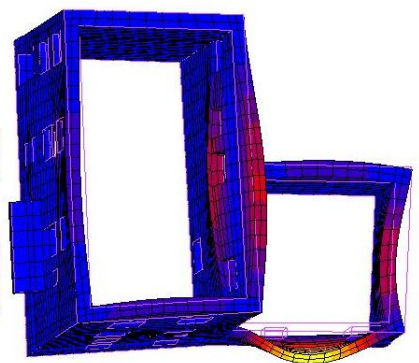
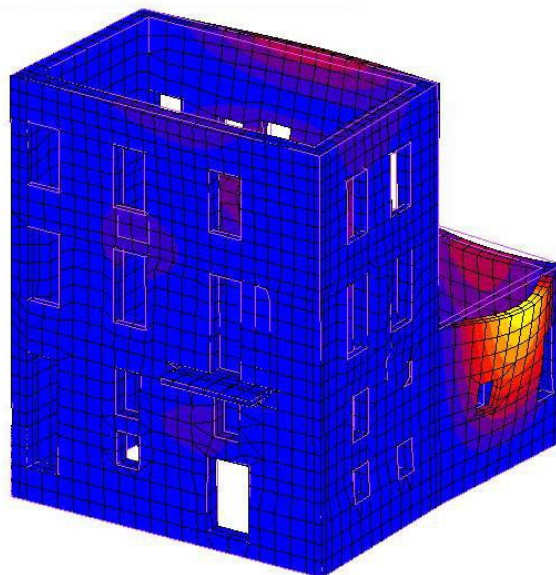
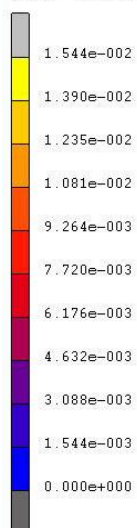
Inc: 1:7  
Time: 1.000e+000  
Freq: 2.528e+001



lcase2  
Displacement

**8<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 26.73Hz**

Inc: 1:8  
Time: 1.000e+000  
Freq: 2.673e+001

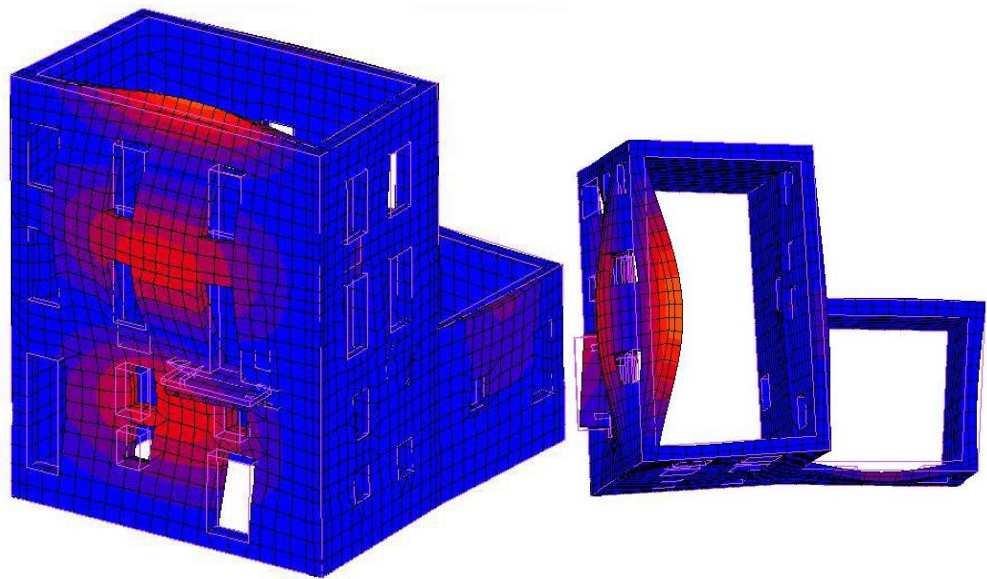
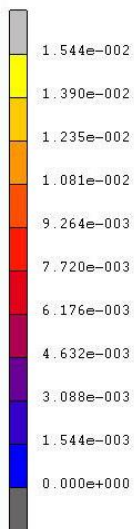


lcase2  
Displacement



**9<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 27.11Hz**

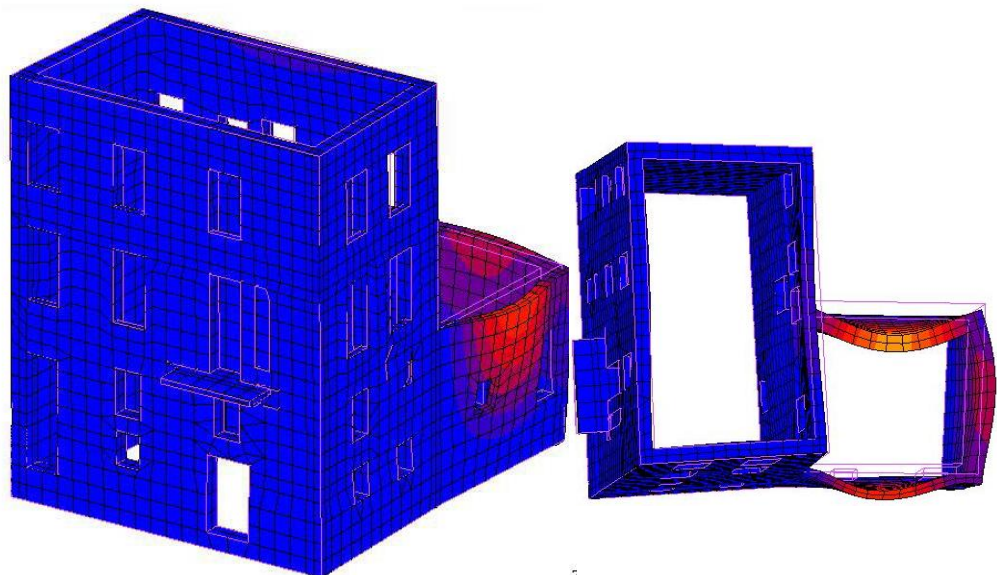
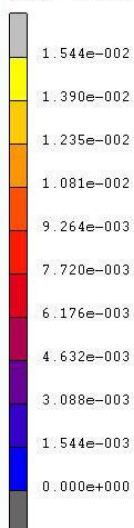
Inc: 1:9  
Time: 1.000e+000  
Freq: 2.711e+001



lcase2  
Displacement

**10<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 28.55Hz**

Inc: 1:10  
Time: 1.000e+000  
Freq: 2.855e+001



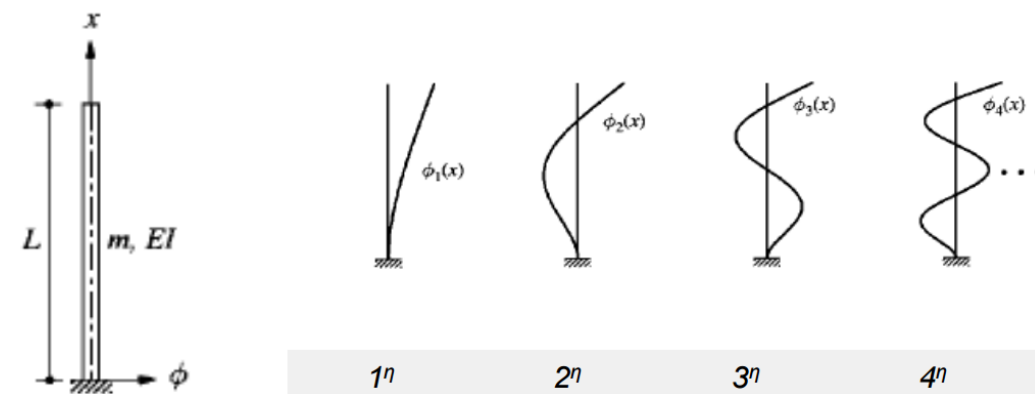
lcase2  
Displacement

**Εικόνα 35: Οι 10 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής και η συνολική μετατόπιση που προκύπτει για κάθε μια από αυτές**

Στην 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 8.7Hz, ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο η νότια όψη της κατασκευής προς τον βορρά σύμφωνα με την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή προβόλου, ενώ στη 2<sup>η</sup>, στα 11.41Hz, αντίστοιχα η βόρεια όψη προς το νότο. Στην 3<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 14.98Hz, ταλαντώνεται επίσης η νότια όψη σύμφωνα με τη 2<sup>η</sup> ιδιομορφή προβόλου, ενώ στην 4<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 16.02Hz, παρατηρείται το φαινόμενο της στρέψης του κτιρίου αριστερόστροφα. Στην 5<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 21.93Hz, παρουσιάζεται ταλάντωση τόσο της βόρειας όσο και της νότιας όψης προς το νότο. Στην 6<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 22.15Hz και στα 25.28Hz αντίστοιχα, η ταλάντωση μεταφέρεται επίσης στην ανατολική όψη του κτιρίου. Στην 8<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 26.73Hz, ταλαντώνεται η βόρεια όψη του

κτιρίου και η περιμετρική περίφραξη της εσωτερικής αυλής. Στην 9<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 27.11Hz, η ταλάντωση επηρεάζει κυρίως τη νότια όψη η οποία ταλαντώνεται σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ελεύθερου προβόλου και τέλος, στη 10<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 28.55Hz, ταλαντώνεται η περιμετρική περίφραξη της εσωτερικής αυλής και συγκεκριμένα η ανατολική και δυτική της όψη προς την ανατολή. Οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές ταλάντωσης ελεύθερου προβόλου παρουσιάζονται στην Εικόνα 36.

Η μέγιστη μετατόπιση ( $1.544 \cdot 10^{-2} \text{m}$ ) παρατηρείται στην 8<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 26.73Hz, για την ανατολική όψη της περίφραξης, στη 2<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα ( $1.06 \cdot 10^{-2} \text{m}$ ), στα 11.41Hz, για τη στέψη της βόρειας όψης και στην 9<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα ( $1.011 \cdot 10^{-2} \text{m}$ ), στα 27.11Hz, για τη στέψη της νότιας όψης.



Εικόνα 36: Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ταλάντωσης – ομοιόμορφη δοκός πρόβολος[34]

## 5. Πρόταση επέμβασης επανάχρησης κελύφους φέρουσας τοιχοποιίας από λιθοδομή

Μετά την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης και την προσομοίωση του κελύφους με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Marc Mentat ακολουθεί η πρόταση επέμβασης με σκοπό την επανάχρηση του κτιρίου. Το συμπέρασμα που βγαίνει τόσο από την οπτική παρατήρηση της κατασκευής όσο και από τους αναλυτικούς υπολογισμούς που προηγήθηκαν είναι ότι η φέρουσα τοιχοποιία βρίσκεται σε πολύ καλή κατάσταση και δεν χρειάζεται κάποια ειδική τεχνική στήριξης. Παρ' όλα αυτά η στέγαση και η επανάχρηση του κτιρίου θα αποτελέσουν καθοριστικούς παράγοντες διατήρησης της δομικής ακεραιότητας του υφιστάμενου κελύφους.

### 5.1 Βασικές παράμετροι σχεδιασμού

Σημαντικό βάρος στο κομμάτι του σχεδιασμού θα δοθεί στη σωστή συνεργασία μεταξύ της υφιστάμενης κατασκευής και της προσθήκης με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα της φέρουσας τοιχοποιίας και να εξυπηρετούνται οι ανάγκες που θα προκύψουν από την επανάχρηση του κτιρίου. Ένα επίσης σημαντικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη από νωρίς στο σχεδιασμό του κτιρίου είναι η εξασφάλιση των παραμέτρων που θα επιτρέψουν τη δημιουργία ενός κτιρίου χαμηλών ενεργειακών αναγκών.

Για την επανάχρηση του κτιρίου προτείνεται η δημιουργία μεταλλικού σκελετού που θα τοποθετηθεί εσωτερικά της τοιχοποιίας αλλά θα συμπεριφέρεται ως ανεξάρτητος φορέας για το πάτωμα του πρώτου και δευτέρου ορόφου, την οροφή, το δώμα και το κλιμακοστάσιο. Τα υποστυλώματα του εσωτερικού φορέα θα τοποθετηθούν σε απόσταση 15εκ από το κέλυφος γεγονός που θα έχει διπλή λειτουργία.

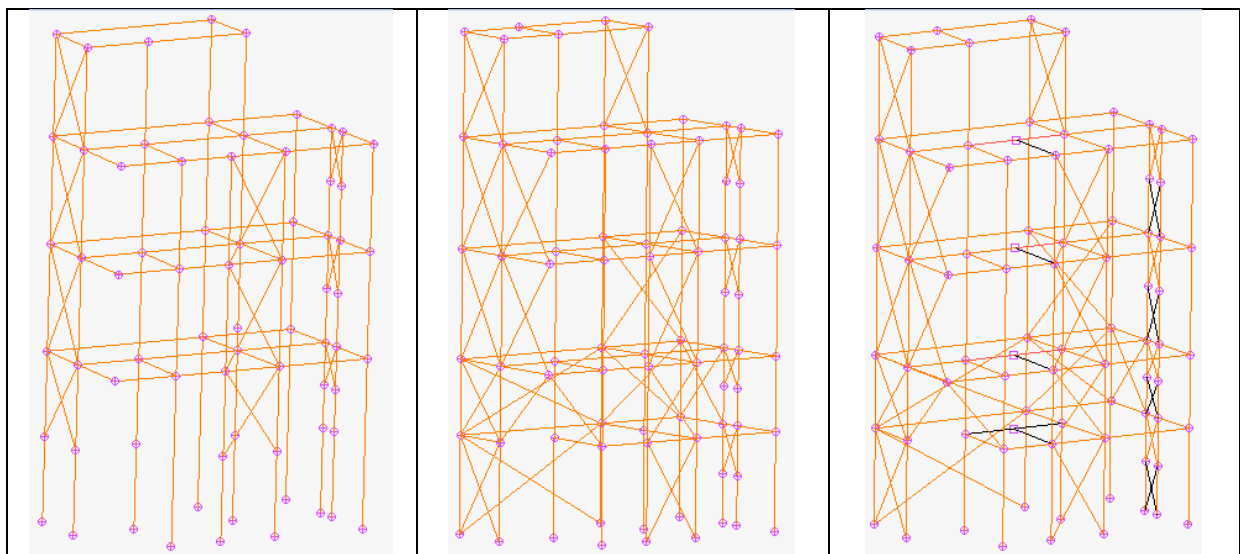
Αφενός την ικανοποίηση του Ελληνικού Αντισεισμικού κανονισμού (ΕΑΚ 2000) που εντάσσει τη διαμόρφωση αντισεισμικού αρμού στο κεφάλαιο μείωσης των αβεβαιοτήτων σεισμικής συμπεριφοράς, δίνοντας έμφαση κυρίως σε μέτρα αποφυγής καταστροφικών συνεπειών των προσκρούσεων γειτονικών κτιρίων – εμβολισμός υποστυλωμάτων. Αφετέρου με τη δημιουργία ανεξάρτητου εσωτερικού φορέα παρέχεται αρκετός χώρος για την επιβολή εσωτερικής θερμομόνωσης και επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των σημείων συναρμογής του εσωτερικού σκελετού με το υφιστάμενο κέλυφος και επομένως και τα πιθανά σημεία εμφάνισης κατασκευαστικών θερμογεφυρών. Οι κατασκευαστικές θερμογέφυρες είναι αυτές που εμφανίζονται σε σημεία συμβολής υλικών με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα. Παραδείγματα τέτοιων θερμογεφυρών είναι οι ενώσεις και η διακοπή της θερμομόνωσης του κτιρίου από δομικά στοιχεία, κουφώματα, προβόλους και άλλα.

Η μούχλα εμφανίζεται συχνά λόγω της υγραποίησης υδρατμών στην κρύα επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου. Σε πολλές περιπτώσεις παραδοσιακών κτιρίων η λιθόκτιστη τοιχοποιία έχει ενσωματωμένα ξύλινα δοκάρια για την στήριξη των ενδιάμεσων πατωμάτων. Με τη μείωση της θερμοκρασίας στην άκρη της δοκού λόγω της επιβολής εσωτερικής θερμομόνωσης, αυξάνεται ο

κίνδυνος δημιουργίας μούχλας και σαπίσματος του ξύλου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορους τρόπους, όπως είναι το να μη μονώνεται η περιοχή γύρω από τη δοκό, ή με αύξηση της θερμοκρασίας γύρω από το άκρο της δοκού[35]. Στην παρούσα μελέτη επιδιώκεται η λύση αυτού του προβλήματος μέσω της δημιουργίας ενός εσωτερικού σκελετού που θα φέρει τα ενδιάμεσα πατώματα, την οροφή και το δώμα, χωρίς να εισβάλλει στην υφιστάμενη τοιχοποιία. Η πρόταση για τη λύση αυτή ευνοήθηκε επίσης από το γεγονός ότι το κτίριο στην τωρινή του κατάσταση αποτελείται μόνο από το κέλυφος, δηλαδή δεν έχει ενδιάμεσα πατώματα και οροφή που θα έθεταν το δίλημμα συντήρησης τους.

## 5.2 Πρόταση επέμβασης – εξέλιξη του φορέα

Το υφιστάμενο κέλυφος εντός του οποίου θα γίνει η πρόταση είναι ένα παραλληλόγραμμο κτίριο με εμβαδόν κάτοψης  $55,7\text{m}^2$  συμπεριλαμβανομένης της τοιχοποιίας. Στο εσωτερικό αυτού θα τοποθετηθούν υποστυλώματα διατομής ΙΡΕ200 σε απόσταση 15cm από το υφιστάμενο κέλυφος για τη στήριξη δύο ενδιάμεσων πατωμάτων, της οροφής και του δώματος. Η σχεδιαστική εξέλιξη του φορέα για την κάλυψη τόσο λειτουργικών όσο και στατικών αναγκών φαίνεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 37).



Εικόνα 37: Μοντέλο εσωτερικού μεταλλικού σκελετού

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας παρατίθενται αναλυτικά σχέδια της πρότασης αποκατάστασης.

## 5.3 Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός – αντισεισμικός αρμός

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000, ο σεισμικός αρμός πλήρους διαχωρισμού πρέπει να έχει εύρος ίσο με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των μέγιστων

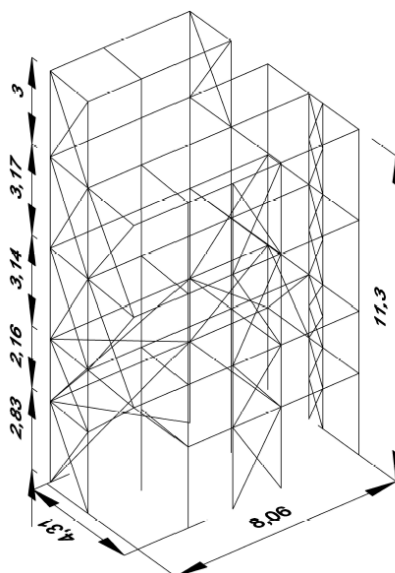


σεισμικών μετακινήσεων των δύο φορέων στις θέσεις των επικίνδυνων υποστυλωμάτων, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης της στροφής περί κατακόρυφο άξονα[36].

## 6. Στατική και ιδιομορφική ανάλυση του εσωτερικού μεταλλικού σκελετού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

### 6.1 Εισαγωγή γεωμετρίας

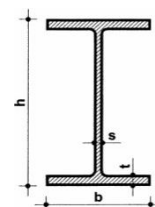
Η γεωμετρία του μοντέλου του μεταλλικού σκελετού δημιουργήθηκε απλοποιημένη στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCad, παρουσιάζοντας τον φέρον οργανισμό με ευθύγραμμα στοιχεία που ενώνονται σε διακριτούς κόμβους (Εικόνα 38). Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή του μοντέλου στο πρόγραμμα Marc-Mentat και εκεί αποδόθηκαν οι γεωμετρικές ιδιότητες (Geometric Properties) των μεταλλικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά που αποδόθηκαν στα μεταλλικά στοιχεία εμφανίζονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3). Το μεταλλικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του εσωτερικού φορέα είναι η δοκός IPE200.



Εικόνα 38: Μοντέλο μεταλλικού φορέα

Πίνακας 3: Γεωμετρικές ιδιότητες της μεταλλικής δοκού IPE200

Γεωμετρικές ιδιότητες IPE 200			
Εμβαδόν διατομής (cm <sup>2</sup> )		28.5	
I <sub>xx</sub> (cm <sup>4</sup> )		1940	
I <sub>yy</sub> (cm <sup>4</sup> )		142	
h (cm)	20	b (cm)	10
t (cm)	0.85	s (cm)	0.56



## 6.2 Ιδιότητες υλικών

Για την κατασκευή του σκελετού χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών

	Μέτρο Ελαστικότητας GPa	Πυκνότητα kg/m <sup>3</sup>	Λόγος Poisson $\nu$
Δομικός χάλυβας	210	7850	0.3

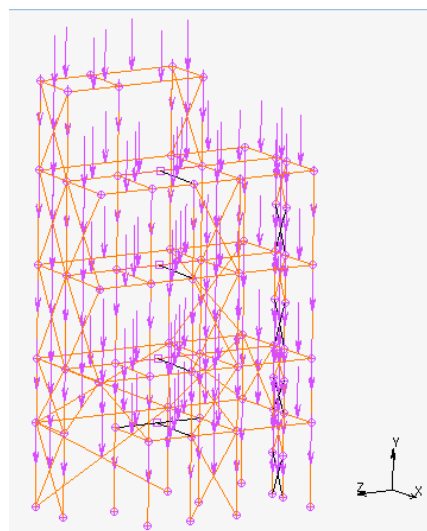
## 6.3 Διακριτοποίηση του φορέα - τύπος στοιχείων προσομοίωσης

Για τη διακριτοποίηση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν αρχικά 192 γραμμικά στοιχεία. Ο Τύπος στοιχείου (Element type) που επιλέχθηκε για την προσομοίωση είναι το Στοιχείο 52 (Element 52). Πρόκειται για μια ευθύγραμμη δοκό Euler – Bernoulli με γραμμική ελαστική συμπεριφορά υλικού, που επιτρέπει ωστόσο και μη γραμμική ελαστική ή μη ελαστική συμπεριφορά υλικού. Το στοιχείο αυτό μπορεί να δεχθεί ομοιόμορφη φόρτιση και στους τρεις άξονες του γενικού συστήματος συντεταγμένων και διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές[37].

## 6.4 Συνοριακές συνθήκες

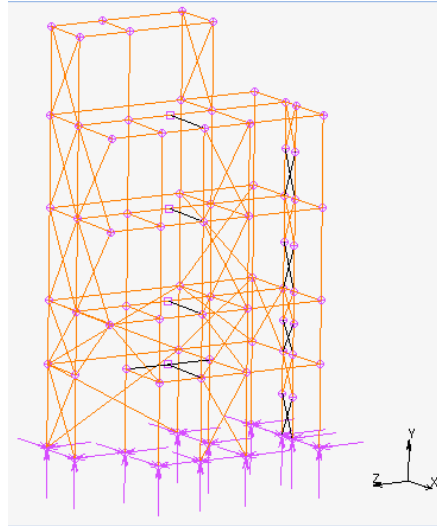
Στο κτίριο εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα φορτία:

- Το ίδιο βάρος της κατασκευής (structural gravity load) για την επιβολή του οποίου ορίζεται το μέγεθος της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $g=9.81\text{m/s}^2$  με κατεύθυνση προς το έδαφος (Εικόνα 39).



Εικόνα 39: Ιδίο βάρος της κατασκευής

- Η θεμελίωση του κτιρίου θεωρήθηκε περιμετρικά ως πάκτωση απευθείας εδρασμένη στο έδαφος στη στάθμη 0.00. Η εισαγωγή της πάκτωσης της κατασκευής στο έδαφος (structural fixed displacement) γίνεται με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος (Εικόνα 40).



Εικόνα 40: Έδραση της κατασκευής

- Η επιβολή του επιπρόσθετου φορτίου γίνεται, για απλούστευση της διαδικασίας, μόνο στα διαμήκη δοκάρια της κατασκευής (Εικόνα 41). Το κινητό φορτίο έχει υπολογιστεί για την οριακή κατάσταση αστοχίας και επιβλήθηκε στο μοντέλο μέσω της εντολής Boundary Conditions> Structural Global Load. Οριακή ορίζεται η κατάσταση πέραν της οποίας η κατασκευή δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η οριακή κατάσταση αστοχίας είναι η οριακή κατάσταση κατάρρευσης ή άλλης δομικής αστοχίας που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια των προσώπων που χρησιμοποιούν την κατασκευή. Στην κατασκευή επιδρούν μόνιμες δράσεις  $G$  από το ίδιο βάρος των πατωμάτων και της οροφής και μεταβλητές δράσεις  $Q$  από το ωφέλιμο φορτίο. Ο συνδυασμός φόρτισης προέκυψε από τον τύπο:

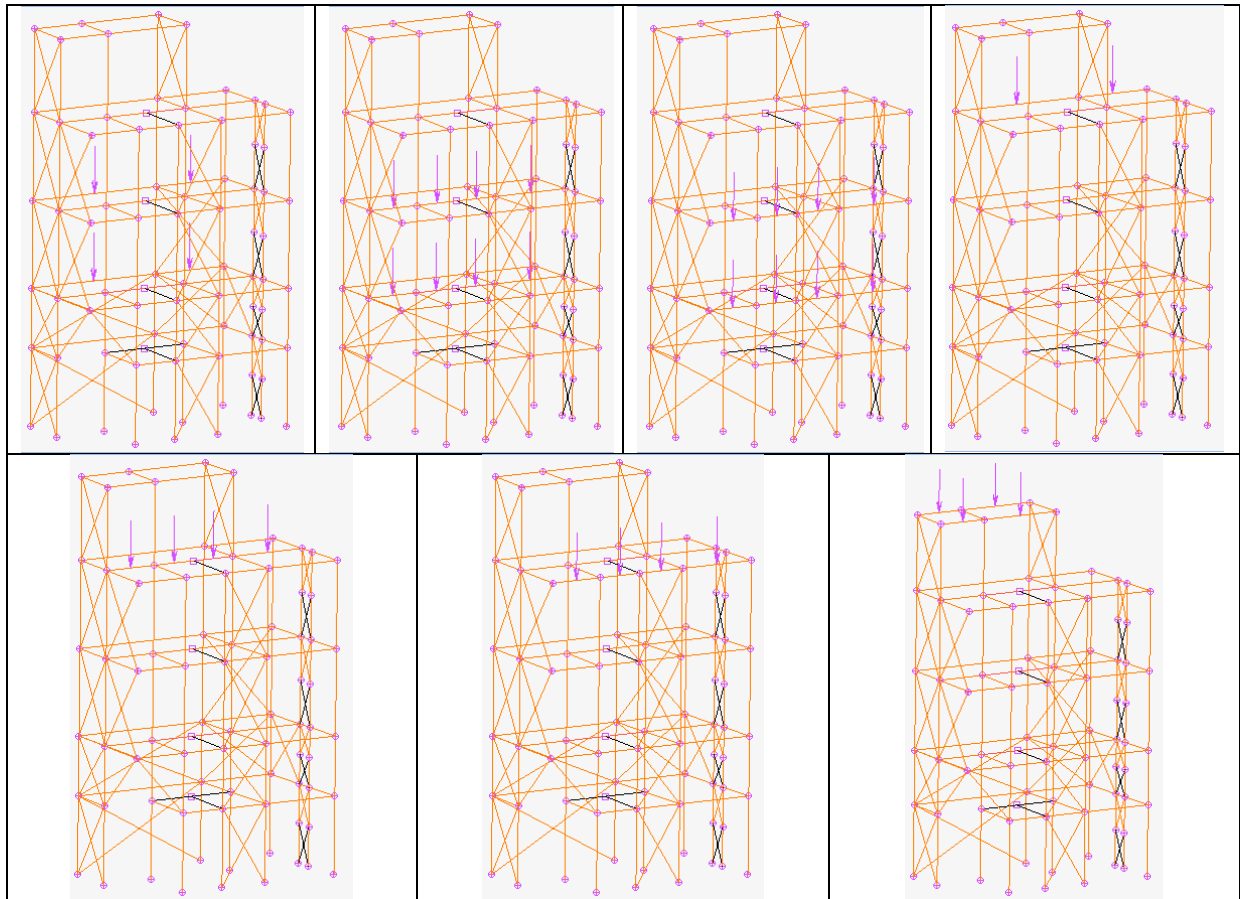
$$1.35 \times G + 1.5 \times Q \quad [1]$$

Όπου,

$G_{\pi} = 3 \text{ kN/m}^2$ , για το πάτωμα

$G_o = 6 \text{ kN/m}^2$ , για την οροφή

$Q = 3 \text{ kN/m}^2$



Εικόνα 41: Επιβολή μόνιμου και ωφέλιμου φορτίου

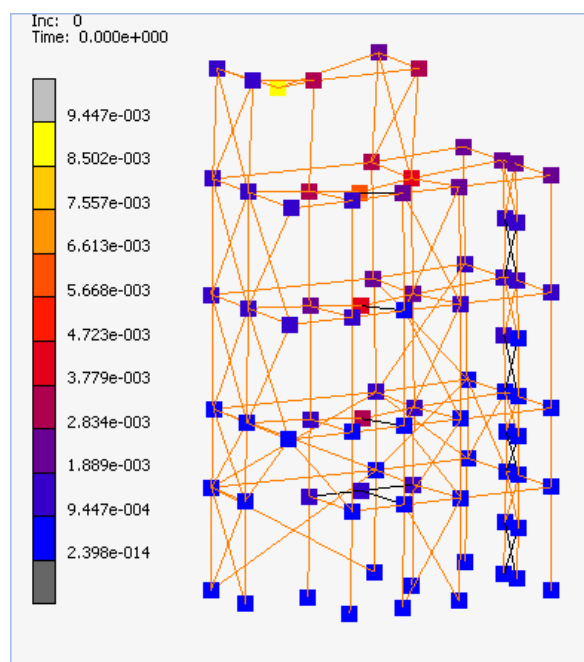
## 6.5 Αποτελέσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για το μεταλλικό σκελετό πραγματοποιήθηκε αρχικά μια επίλυση μόνο για τα στατικά φορτία (Static analysis), με την οποία επιβεβαιώνεται και η σωστή λειτουργία του μοντέλου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση (Modal analysis) ώστε να εντοπιστούν οι ιδιομορφές που διεγείρουν την κατασκευή και τέλος έγινε επίλυση του μοντέλου με την επιβολή πραγματικής σεισμικής καταπόνησης που να περιέχει ιδιομορφές που διεγείρουν την κατασκευή.

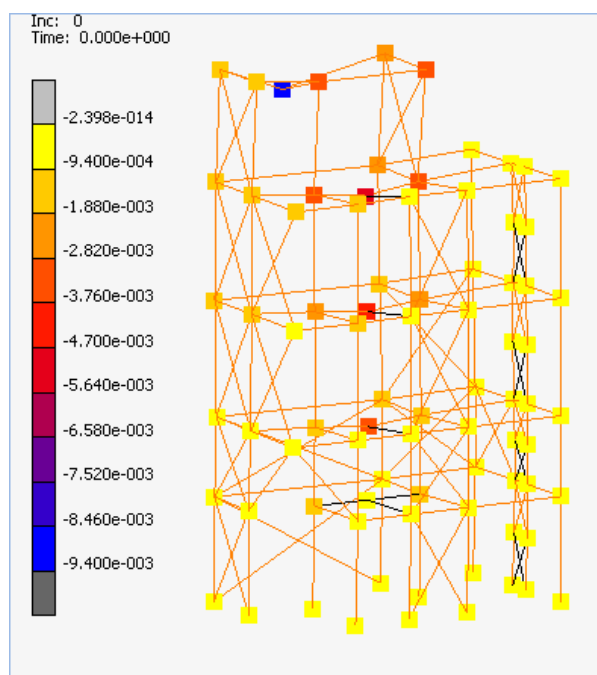
### 6.5.1 Στατική ανάλυση

Η στατική ανάλυση θεωρεί ότι οι δυνάμεις που καταπονούν μια κατασκευή είναι στατικές δηλαδή ανεξάρτητες του χρόνου. Στα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης που θα παρουσιαστούν παρακάτω βλέπουμε ότι το εύρος των συνολικών μετατοπίσεων (displacement) ανέρχεται στα  $9.45 \cdot 10^{-3} \text{m}$  ενώ των μετατοπίσεων στον κατακόρυφο άξονα στα  $9.4 \cdot 10^{-3} \text{m}$ , παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες συνολικές και κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω του ίδιου βάρους της κατασκευής συντελούνται στο δώμα (Εικόνες 42,43). Επίσης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του

κελύφους ( $2.1 \cdot 10^{-4}$ ), ο μεταλλικός σκελετός εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις για τα στατικά φορτία.



Εικόνα 42: Συνολικές μετατοπίσεις (displacement)



Εικόνα 43: Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα

### 6.5.2 Ιδιομορφική ανάλυση

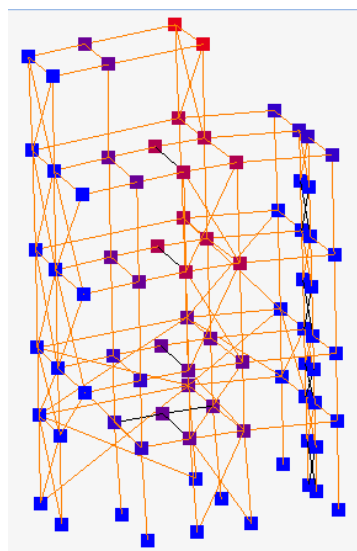
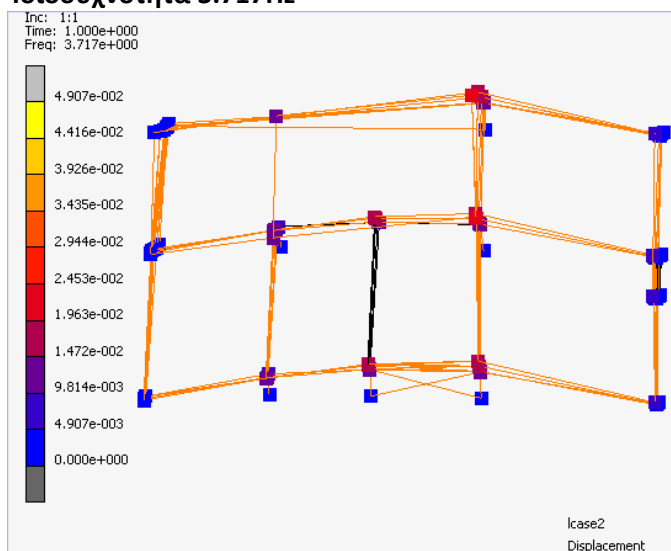
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η ιδιομορφική ανάλυση του εσωτερικού φορέα για την εύρεση των 20 πρώτων ιδιομορφών που τον διεγείρουν. Αρχικά εντοπίστηκαν οι 10 πρώτες ιδιομορφές, αλλά επειδή οι ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν ήταν αρκετά χαμηλές, μέχρι 12Hz, ενώ



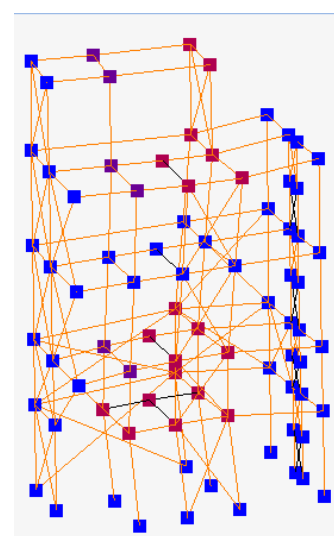
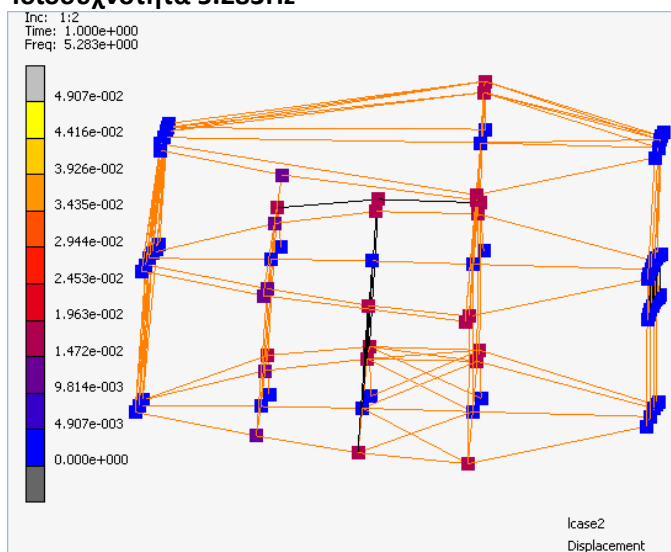
οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της υφιστάμενης κατασκευής κυμαίνονται από 8.7-28.55Hz, αποφασίστηκε να αυξηθεί ο αριθμός των απαιτούμενων ιδιοσυχνοτήτων σε 20. Οι συχνότητες ταλάντωσης που προέκυψαν τελικά κυμαίνονται από 3.7Hz μέχρι 22.44Hz (Πίνακας 5).

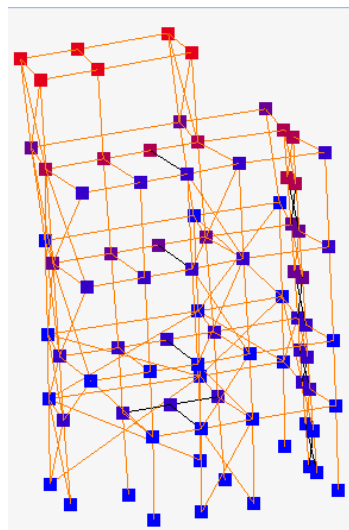
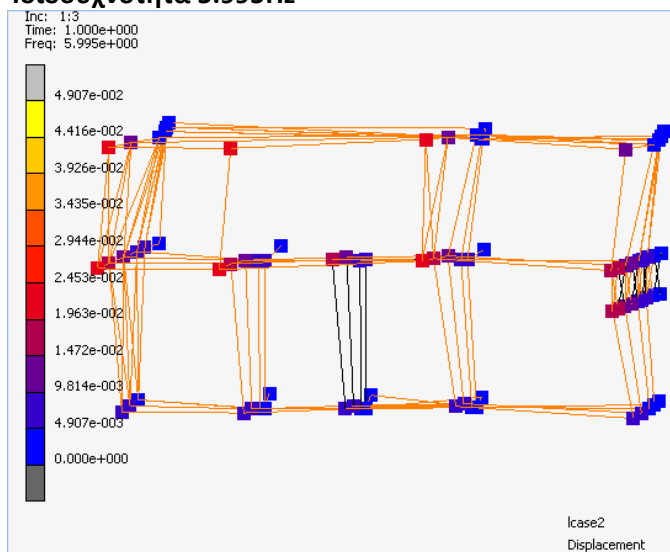
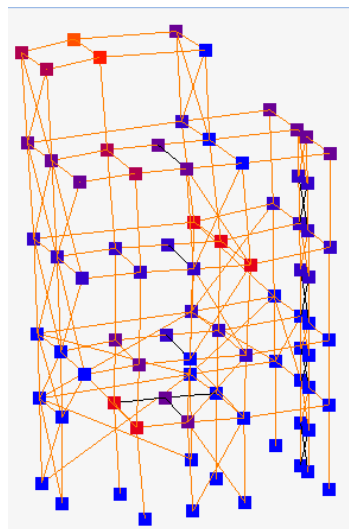
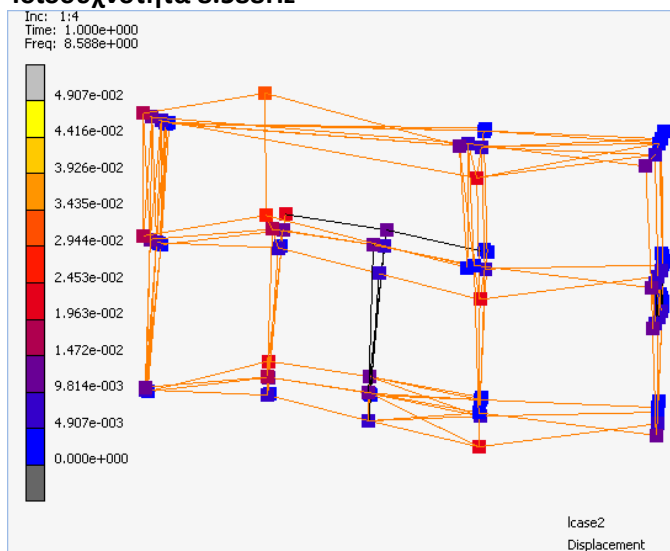
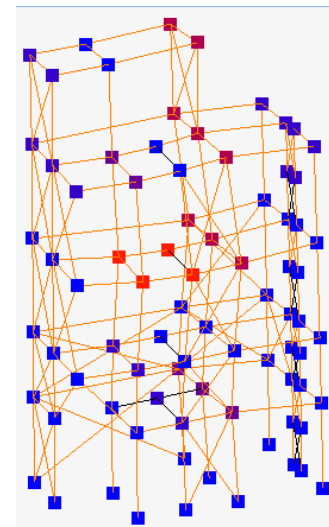
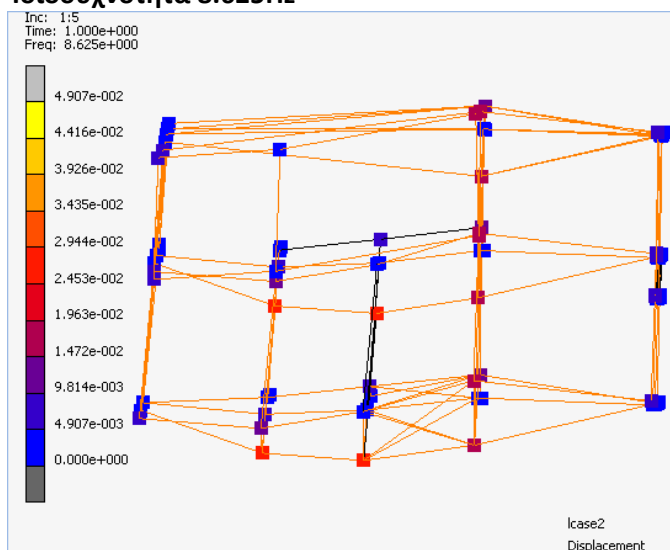
Πίνακας 5: Οι 20 ιδιοσυχνότητες που διεγείρουν τον μεταλλικό φορέα

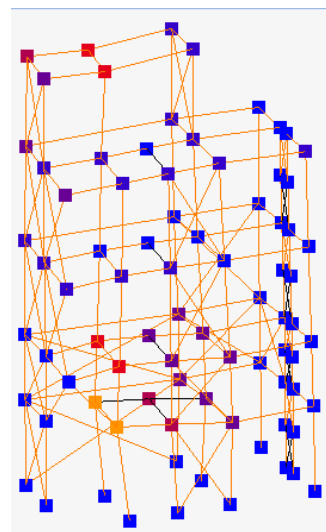
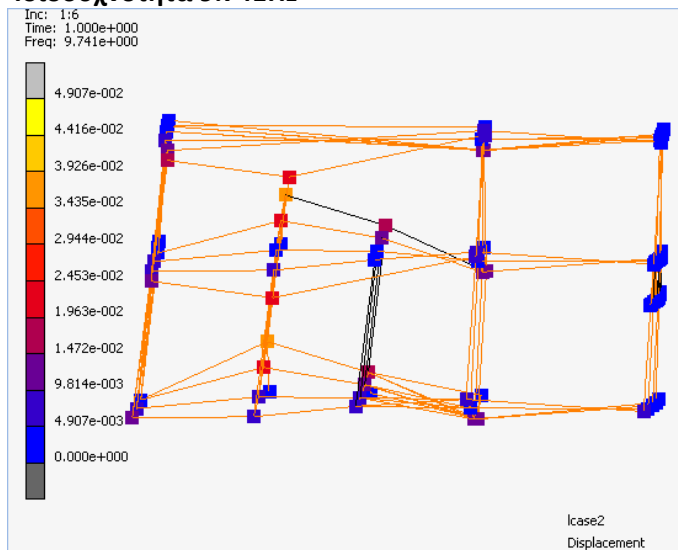
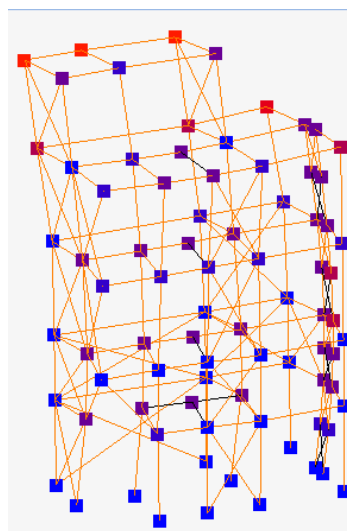
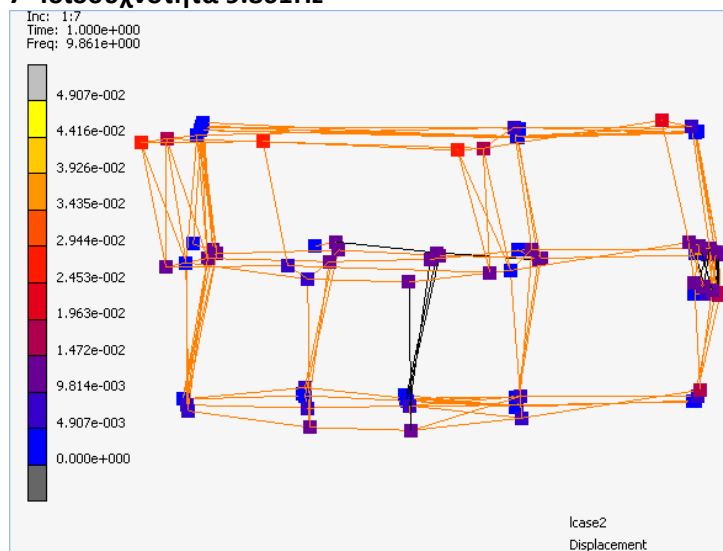
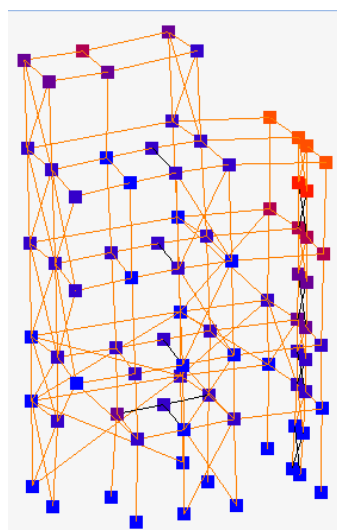
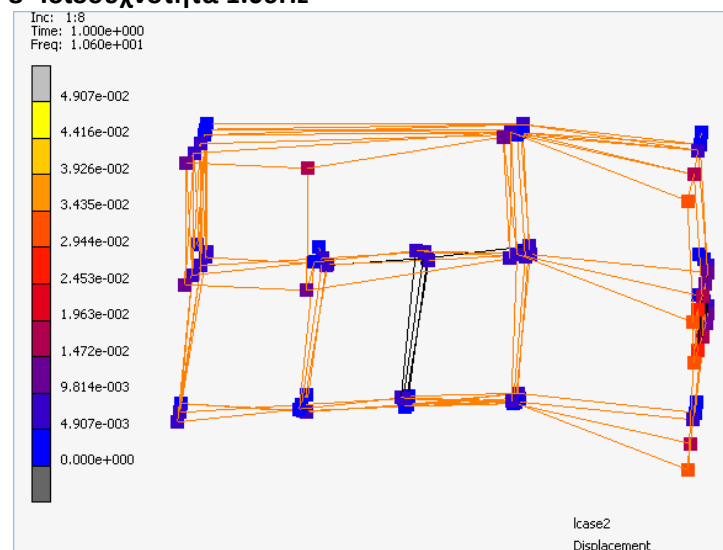
**1<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 3.717Hz**

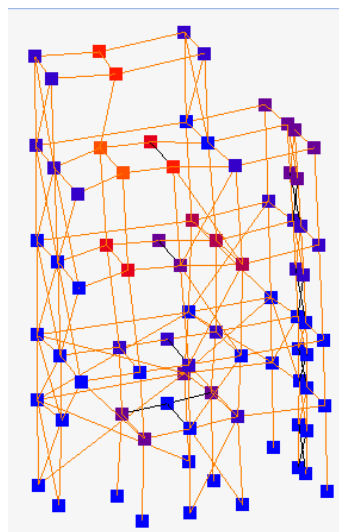
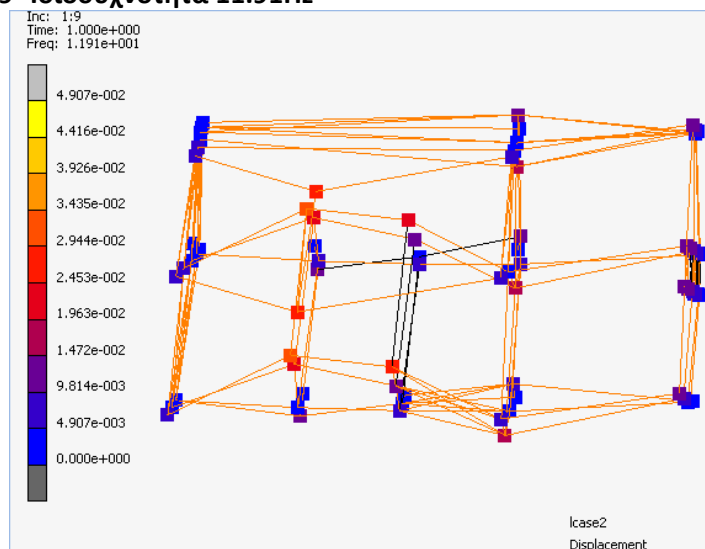
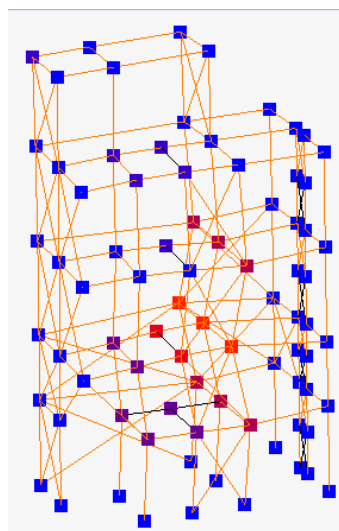
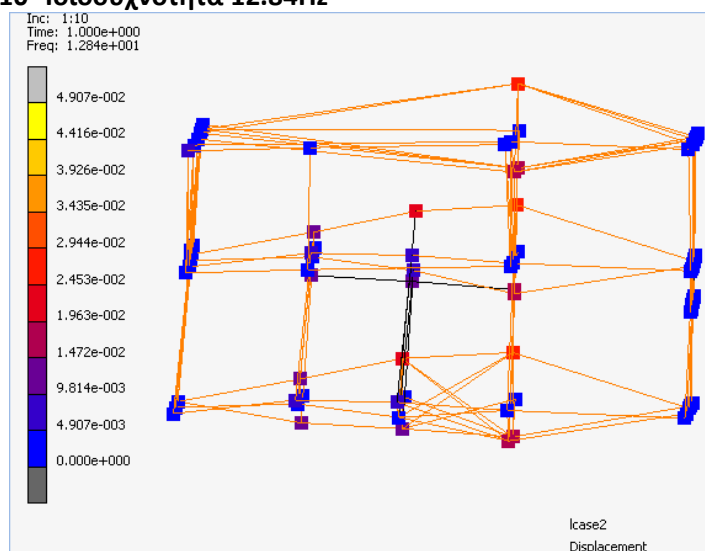
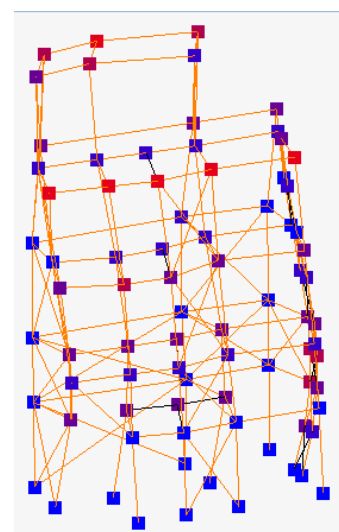
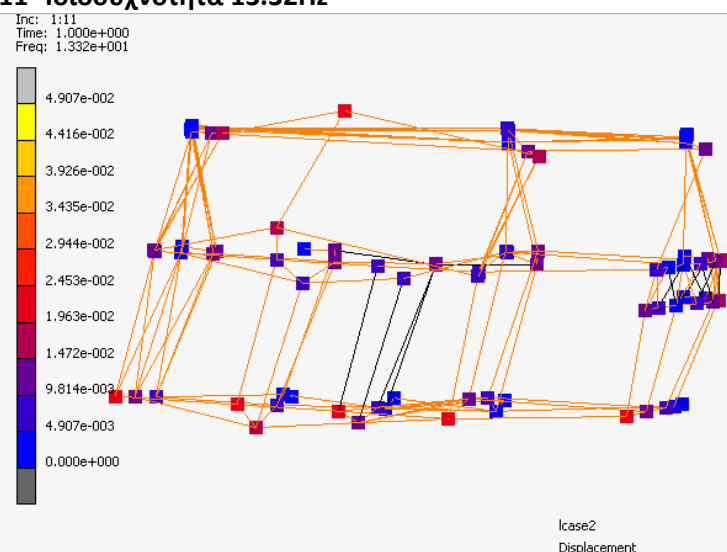


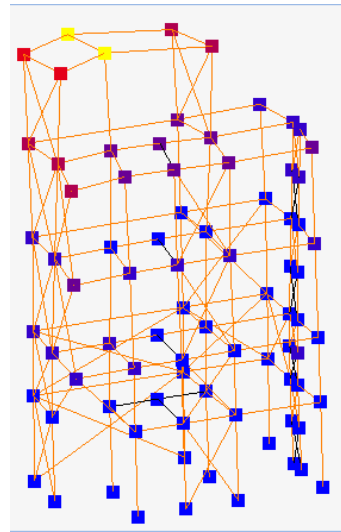
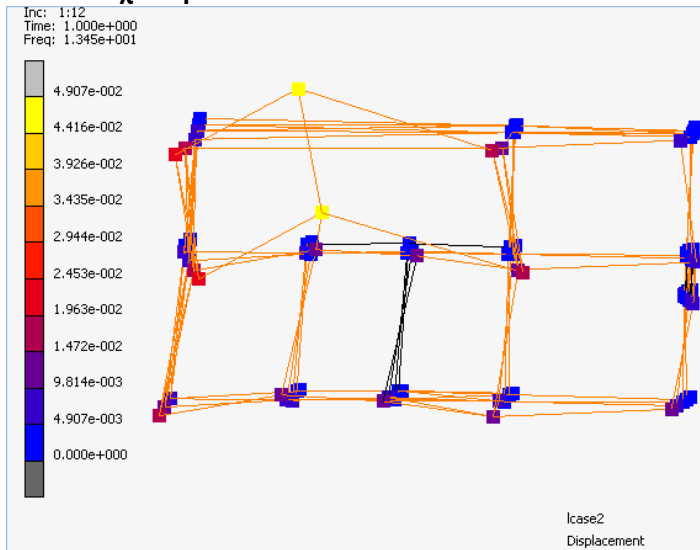
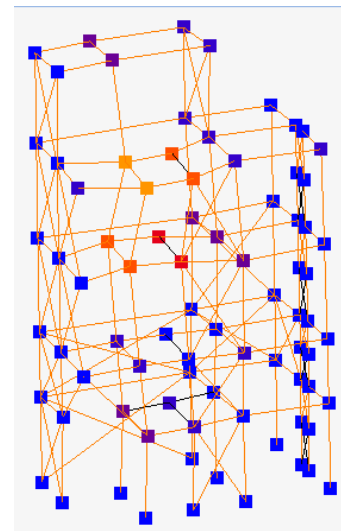
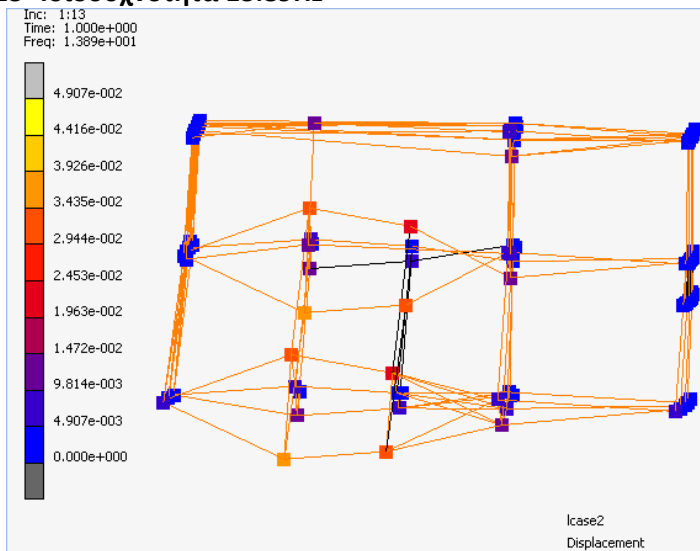
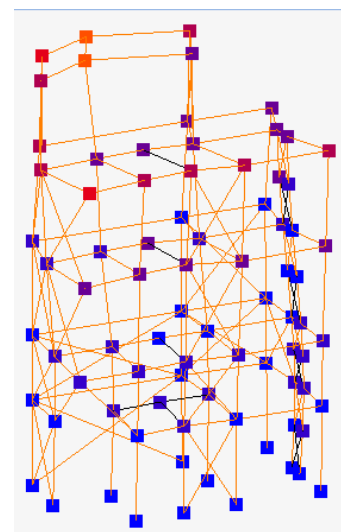
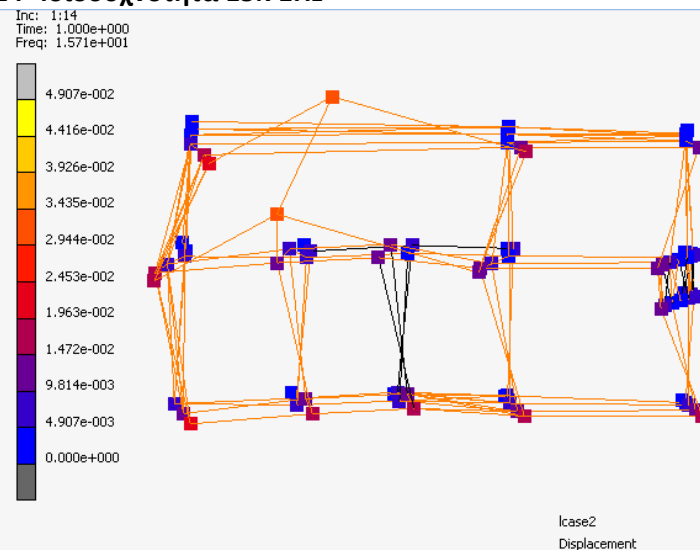
**2<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 5.283Hz**



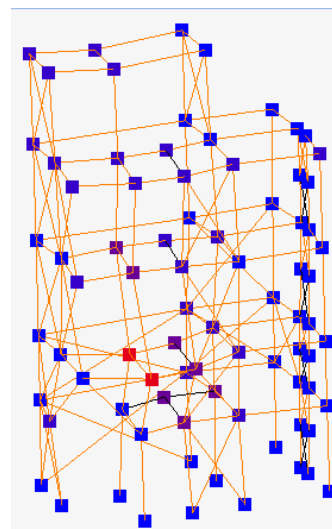
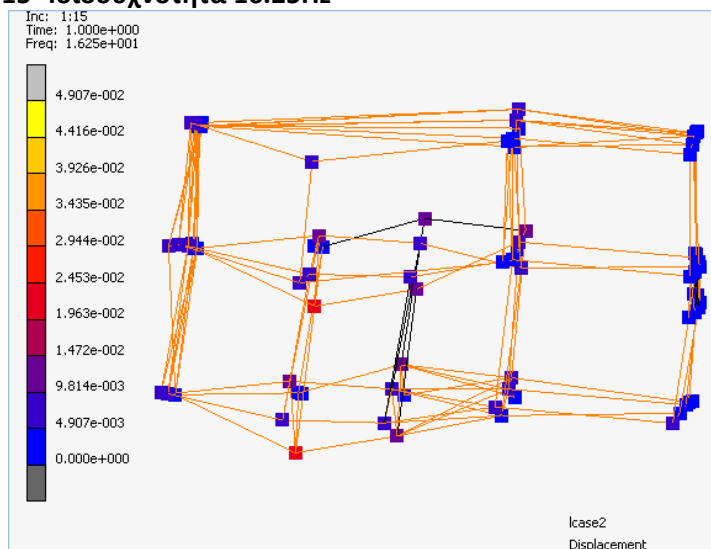
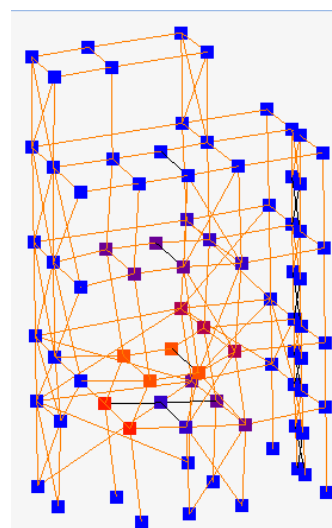
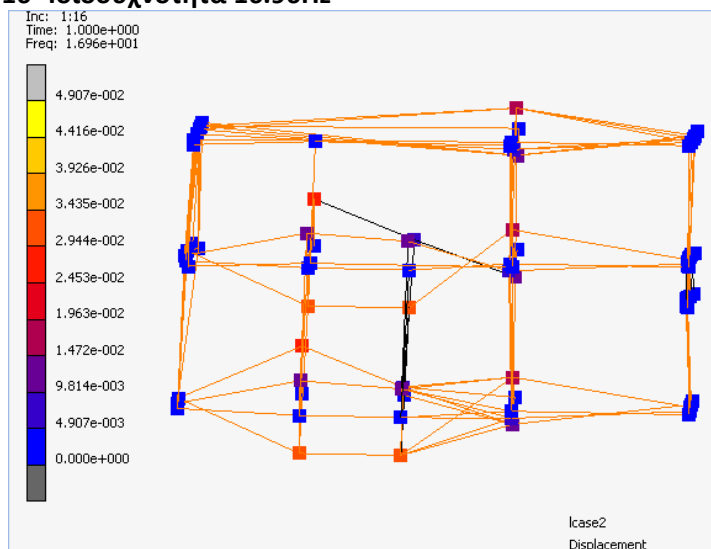
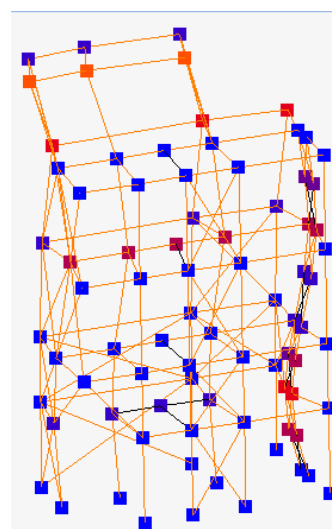
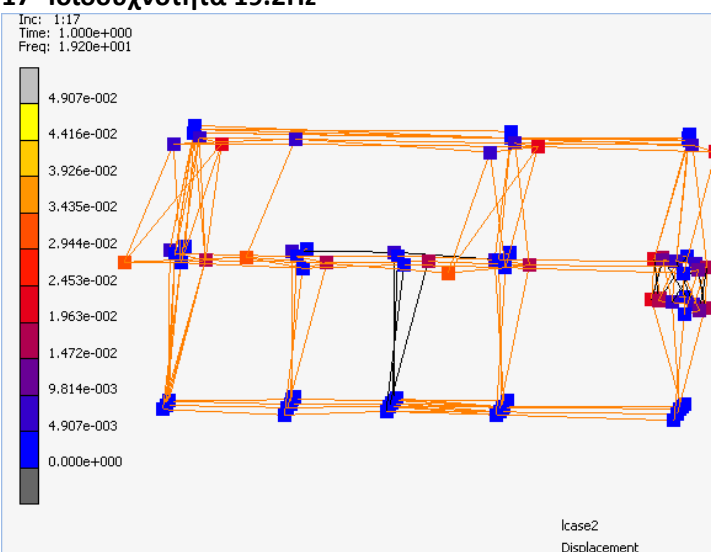
**3<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 5.995Hz****4<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 8.588Hz****5<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 8.625Hz**

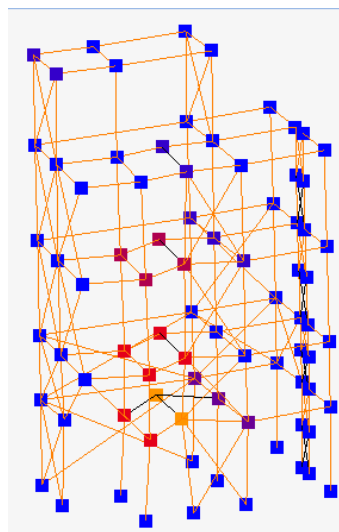
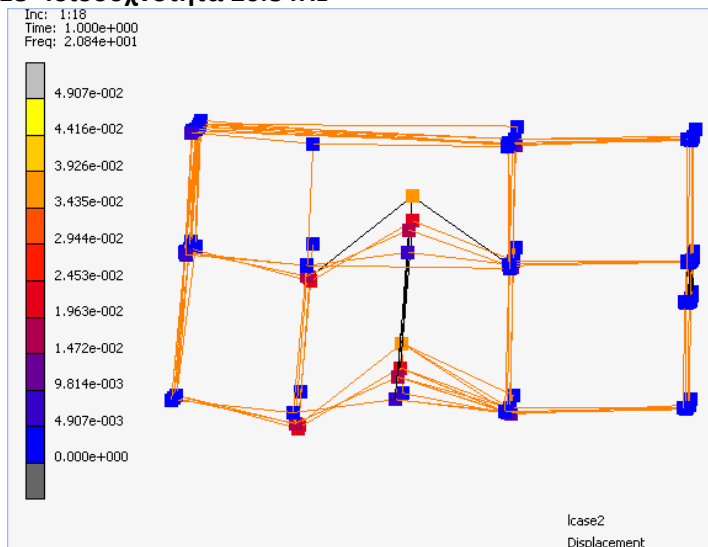
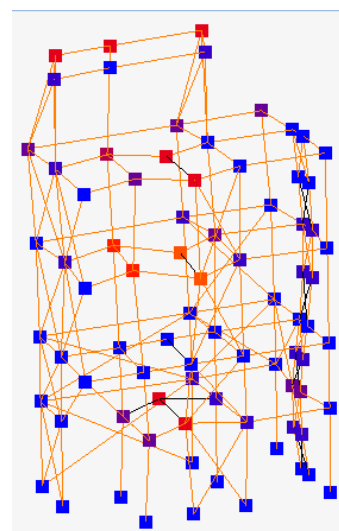
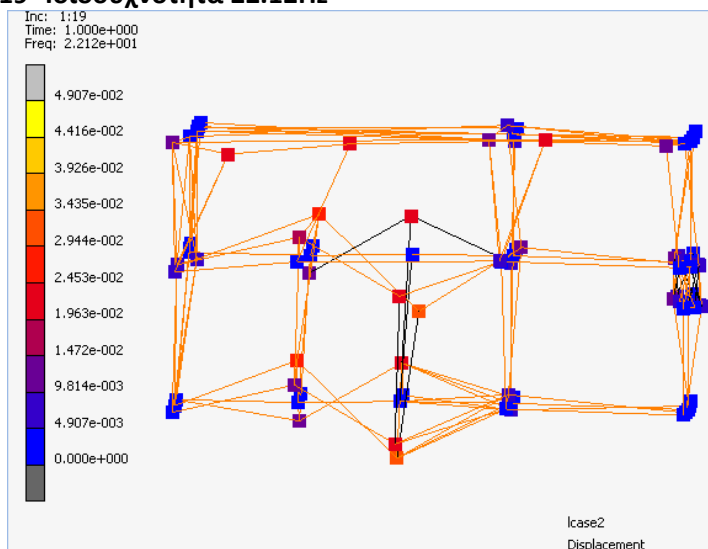
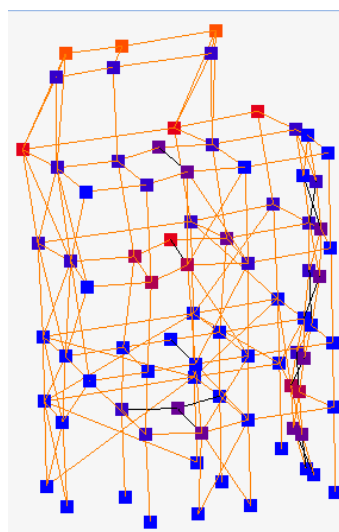
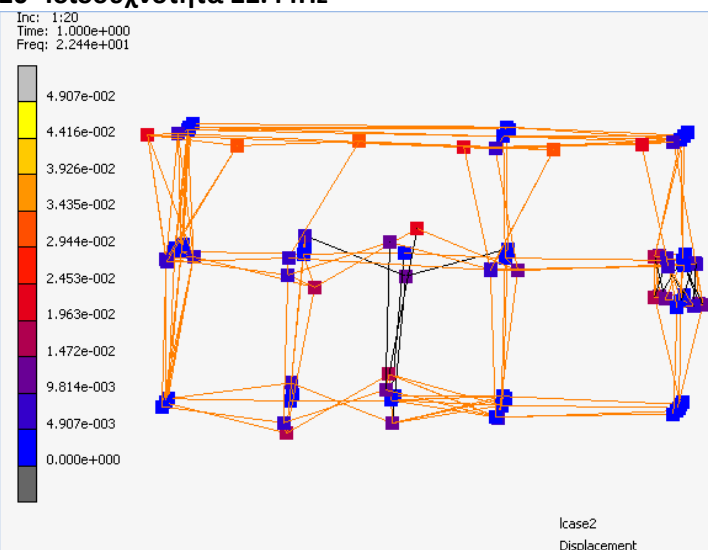
**6<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 9.741Hz****7<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 9.861Hz****8<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 1.06Hz**

**9<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 11.91Hz****10<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 12.84Hz****11<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 13.32Hz**

**12<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 13.45Hz****13<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 13.89Hz****14<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 15.71Hz**



**15<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 16.25Hz****16<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 16.96Hz****17<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 19.2Hz**

**18<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 20.84Hz****19<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 22.12Hz****20<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα 22.44Hz**

Στην 1<sup>η</sup> και στη 2<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 3.717Hz και 5.382Hz, ο φορέας ταλαντώνεται κατά τον άξονα βορρά νότου σύμφωνα με την 1<sup>η</sup> και τη 2<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου αντίστοιχα. Στην 3<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 5.995Hz, ο φορέας ταλαντώνεται κατά τον άξονα ανατολής δύσης. Στην 4<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 8.588Hz, ο φορέας ταλαντώνεται κατά τον άξονα βορρά νότου και παρατηρείται το φαινόμενο της στρέψης του κτιρίου δεξιόστροφα. Στην 5<sup>η</sup>, 9<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 8.625Hz, 11.91Hz και 12.84Hz, ο φορέας ταλαντώνεται κατά τον άξονα βορρά νότου σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου. Στην 6<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 9.741Hz, παρατηρείται στρέψη του κτιρίου δεξιόστροφα. Στην 7<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 9.861Hz, ο φορέας ταλαντώνεται κατά τον άξονα ανατολής δύσης σύμφωνα με τη 2<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου. Στην 8<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 10.6Hz, η ταλάντωση μεταφέρεται στην ανατολική όψη του κτιρίου. Στην 11<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 13.32Hz, ο φορέας ταλαντώνεται κατά τον άξονα ανατολής δύσης σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου, με ταυτόχρονη δεξιόστροφη στρέψη. Στην 12<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 13.45Hz, ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο το δώμα της κατασκευής κατά τον άξονα βορρά νότου. Στη 13<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 13.89Hz, ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο η νότια όψη της κατασκευής και τα κεντρικά υποστυλώματα στην κατεύθυνση βορρά νότου σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου. Στη 14<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 15.71Hz, ταλαντώνονται τα κεντρικά υποστυλώματα της ανατολικής και δυτικής όψης του φορέα. Στη 15<sup>η</sup> και στη 16<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 16.25Hz και στα 16.96Hz, ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο η νότια όψη του φορέα σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου. Στη 17<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 19.2Hz, ταλαντώνεται ο φορέας κατά τον άξονα ανατολής δύσης σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης προβόλου. Στη 18<sup>η</sup> και 19<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 20.84Hz και 22.12Hz, ταλαντώνεται η νότια όψη και τα κεντρικά υποστυλώματα του φορέα. Στη 20<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 22.44Hz ταλαντώνεται ο φορέας κατά τον άξονα ανατολής δύσης σύμφωνα με την 3<sup>η</sup> ιδιομορφή ταλάντωσης του προβόλου, ενώ ταυτόχρονα ταλαντώνεται η νότια όψη και τα κεντρικά υποστυλώματα του φορέα.

Η μέγιστη μετατόπιση ( $4.907 \cdot 10^{-2} \text{m}$ ) παρατηρείται στην 12<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα, στα 13.45Hz, για το κεντρικό υποστυλώμα και δοκάρι του δώματος, στη 18<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα ( $3.834 \cdot 10^{-2} \text{m}$ ), στα 20.84Hz, για κεντρικό υποστυλώμα της νότιας όψης στο επίπεδο το ημιώροφου και στην 13<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα ( $3.602 \cdot 10^{-2} \text{m}$ ), στα 13.89Hz, για κεντρικό δοκάρι κατά τον άξονα βορρά νότου στο επίπεδο της οροφής του φορέα.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά οι ιδιοσυχνότητες που διεγείρουν τους δύο φορείς και οι αντίστοιχες μέγιστες μετατοπίσεις στους άξονες x,y,z όπως επίσης και η συμμετοχή των μαζών (Modal Mass) κατά του κύριους άξονες και εντοπίζονται οι 2 ιδιοσυχνότητες που διεγείρουν και τους δύο φορείς που είναι 8.6Hz και τα 22Hz (Πίνακες 6,7).

Πίνακας 6: Ιδιοσυχνότητες, μέγιστες μετατοπίσεις και συμμετοχή των μαζών (Modal mass) της φέρουσας τοιχοποιίας

ΚΕΛΥΦΟΣ							
	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Displacement X (cm)	Displacement Y (cm)	Displacement Z (cm)	Modal mass X	Modal mass Y	Modal mass Z
1η	8.711	-0.761	0.128	-0.185	-0.405	0.024	-0.111
2η	11.410	1.059	0.057	-0.281	0.380	0.024	-0.118
3η	14.980	0.885	-0.076	0.249	0.476	-0.023	0.137
4η	16.020	-0.632	0.092	0.114	-0.341	0.062	0.053
5η	21.930	0.817	0.144	0.376	0.345	0.081	0.192
6η	22.150	-0.569	0.122	-0.585	0.329	0.066	-0.250
7η	25.280	0.711	0.091	-0.781	-0.460	0.028	-0.251
8η	26.730	-0.625	-0.091	0.236	0.431	-0.026	-0.907
9η	27.110	-1.001	0.127	0.16	-0.418	-0.081	-0.200
10η	28.550	0.224	-0.132	-0.061	-0.469	-0.099	-0.718

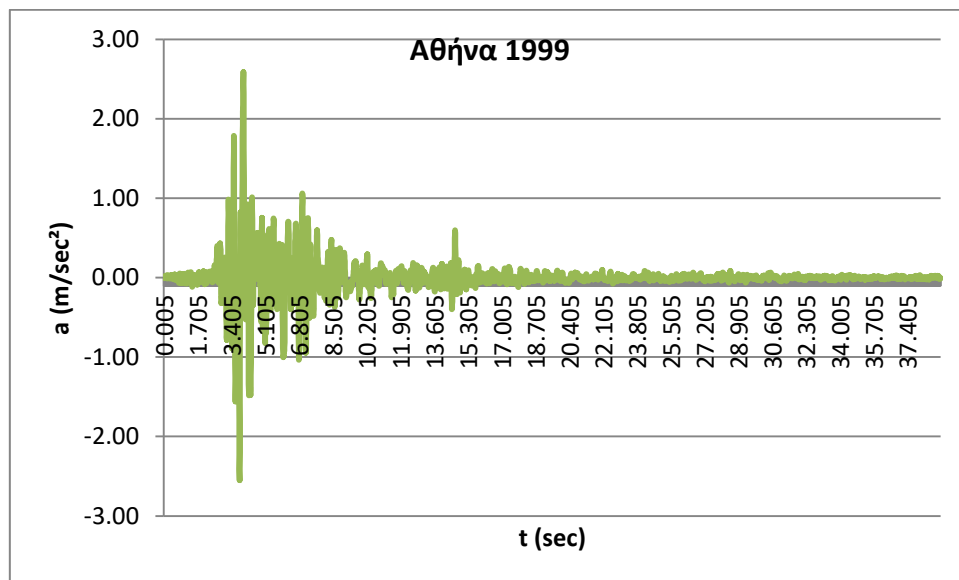
Πίνακας 7: Ιδιοσυχνότητες, μέγιστες μετατοπίσεις και συμμετοχή των μαζών (Modal mass) του μεταλλικού σκελετού

ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ							
	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Displacement X (cm)	Displacement Y (cm)	Displacement Z (cm)	Modal mass X	Modal mass Y	Modal mass Z
1η	3.717	-1.975	0.087	0.225	-3.927	0.087	-0.272
2η	5.283	-1.948	-0.077	0.38	-5.232	-0.074	0.585
3η	5.995	0.470	-0.128	2.158	0.733	-0.166	4.327
4η	8.588	-2.808	0.35	0.988	3.865	0.343	1.266
5η	8.625	2.790	0.188	-0.225	4.722	-0.19	0.293
6η	9.741	-3.588	-0.339	0.581	4.231	-0.333	0.866
7η	9.861	-1.387	0.091	2.773	-1.233	-0.115	3.209
8η	10.600	3.185	-0.314	0.761	2.795	-0.31	0.753
9η	11.910	-3.023	-0.2	0.558	-3.315	-0.203	-0.698
10η	12.840	-2.791	-0.096	0.334	-6.425	-0.949	0.307
11η	13.320	-1.675	0.214	1.987	-1.56	0.342	2.854
12η	13.450	-4.720	-0.417	-1.729	-4.035	-0.447	1.746
13η	13.890	3.592	-0.123	0.667	3.625	0.096	0.843
14η	15.710	-3.186	-0.283	-1.738	-2.883	-0.28	-2.462
15η	16.250	2.219	0.201	0.922	4.853	0.185	-0.893
16η	16.960	3.075	-0.052	-0.435	4.751	-0.045	-0.751
17η	19.200	-0.754	0.156	3.355	-0.694	0.314	-4.085
18η	20.840	-3.832	0.141	-0.43	-6.019	-0.13	-0.676
19η	22.120	3.107	-0.158	-2.139	5.341	-0.239	2.403
20η	22.440	-1.958	-0.395	-3.168	-3.395	-0.339	4.204

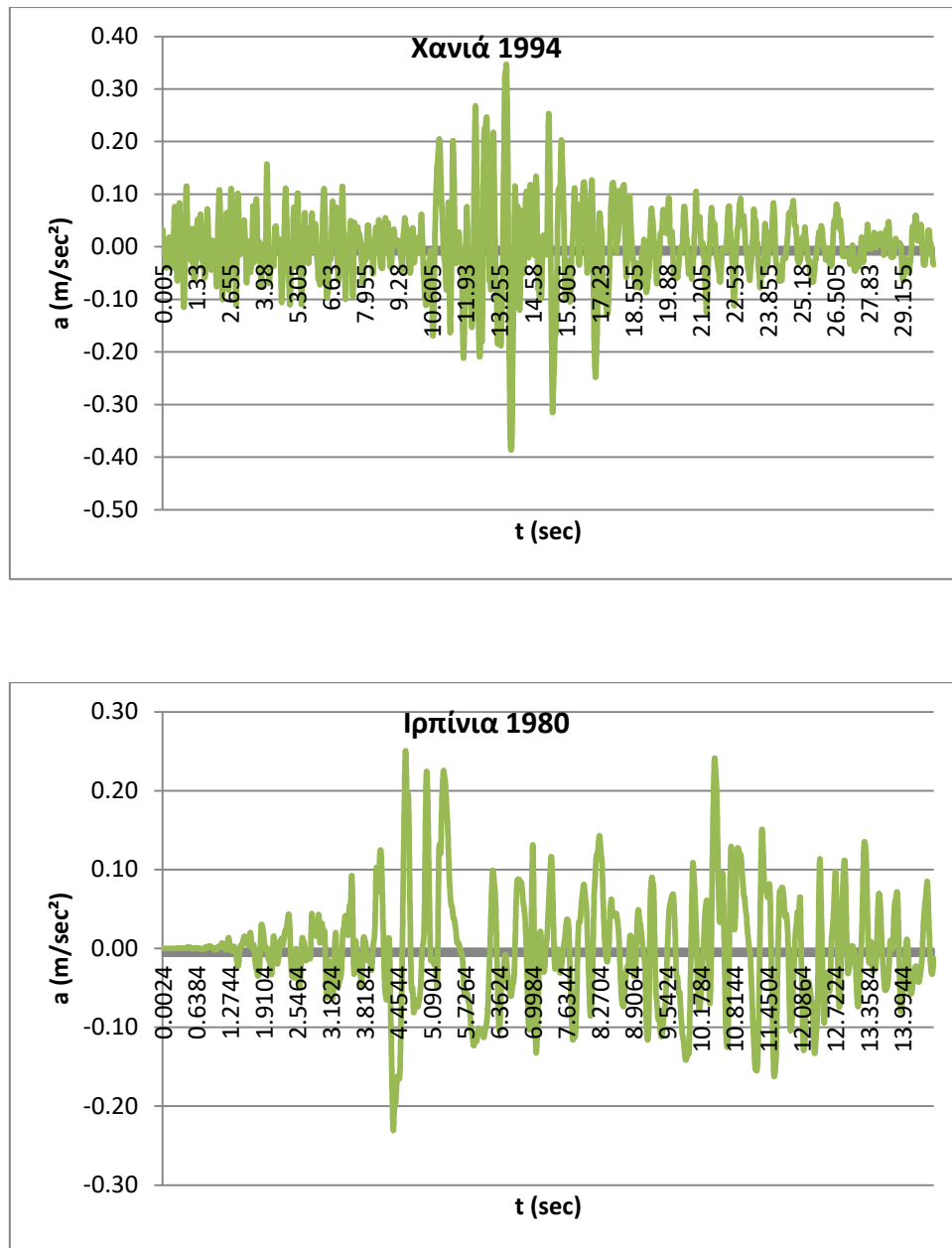
## 7. Δυναμική απόκριση κατασκευής σε πραγματικά σεισμικά γεγονότα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται δυναμική ανάλυση του υφιστάμενου κελύφους και του μεταλλικού φορέα για τρεις ιστορίες επιταχύνσεων που αποτελούν καταγραφές πραγματικών σεισμικών γεγονότων. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη αποτελεί καταγραφή από το σεισμό της Αθήνας (1999), η δεύτερη προέρχεται από το σεισμό των Χανίων (1994) και η τρίτη από τον σεισμό της Ιρπίνια-Ιταλία (1980). Οι τρεις σεισμοί ήταν μεγέθους 5.9, 6.1 και 6.9 Ρίχτερ αντίστοιχα.

Οι διεγέρσεις που επιλέχθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι ιστορίες επιτάχυνσης των τριών διεγέρσεων παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνα 44).







Εικόνα 44: Οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τριών διεγέρσεων

## 7.1 Ιδιότητες υλικών

Η τοιχοποιία λόγω της δομής της θεωρείται ψαθυρό υλικό και ως τέτοιο εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη από ότι σε εφελκυσμό και διάτμηση. Οι τρόποι αστοχίας των ψαθυρών υλικών κατηγοριοποιούνται σε αστοχία σε διάτμηση και αστοχία σε εφελκυσμό. Η διατμητική αστοχία εκδηλώνεται κατά μήκος ενός επιπέδου όταν η συνισταμένη διατμητική τάση ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Οι κυριότερες θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν τη διατμητική αστοχία ψαθυρών υλικών είναι αυτές των Coulomb (1773) και Mohr (1900). Για το λόγο αυτό και τα κριτήρια διατμητικής αστοχίας των ψαθυρών υλικών, συνήθως αναφέρονται ως κριτήρια Mohr-Coulomb με πιο διαδεδομένα το γραμμικό και το παραβολικό.[38] Στην ανάλυση της φέρουσας

τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε το παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Η θλιπτική αντοχή του υλικού υπολογίστηκε από την ακόλουθη εξίσωση, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 6.

$$f_k = K f_b^{0.65} f_{mc}^{0.25} \quad \text{για } f_{mc} \leq \min(20 \text{ N/mm}^2, 2f_b) \quad [2]$$

Όπου,

$f_b = 100 \text{ MPa}$ , θλιπτική αντοχή λίθου (για ψαμμόλιθο 30-180 MPa)

$f_{mc} = 5 \text{ MPa}$ , θλιπτική αντοχή κονιάματος

$$K = 0.5 (\text{N/mm}^2)^{0.1}$$

Η σταθερά  $\beta$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta = \frac{(m-1)}{\sqrt{3m}} \quad [3]$$

Όπου,

$$m = \frac{f_k}{f_{wt}}$$

$f_k$ , η αντοχή του υλικού σε θλίψη

$f_{wt}$ , η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό

$f_{wt} = \lambda \cdot f_{mt}$ , εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας

$\lambda = 0.7-0.9$  ανάλογα με τις συνθήκες συντήρησης της τοιχοποιίας

$$f_{mt} = \frac{1}{4} \sqrt{f_{mc}}, \text{ εφελκυστική αντοχή κονιάματος}$$

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της φέρουσας τοιχοποιίας συνοψίζονται στον Πίνακα 8.

**Πίνακας 8: Μηχανικά χαρακτηριστικά φέρουσας τοιχοποιίας**

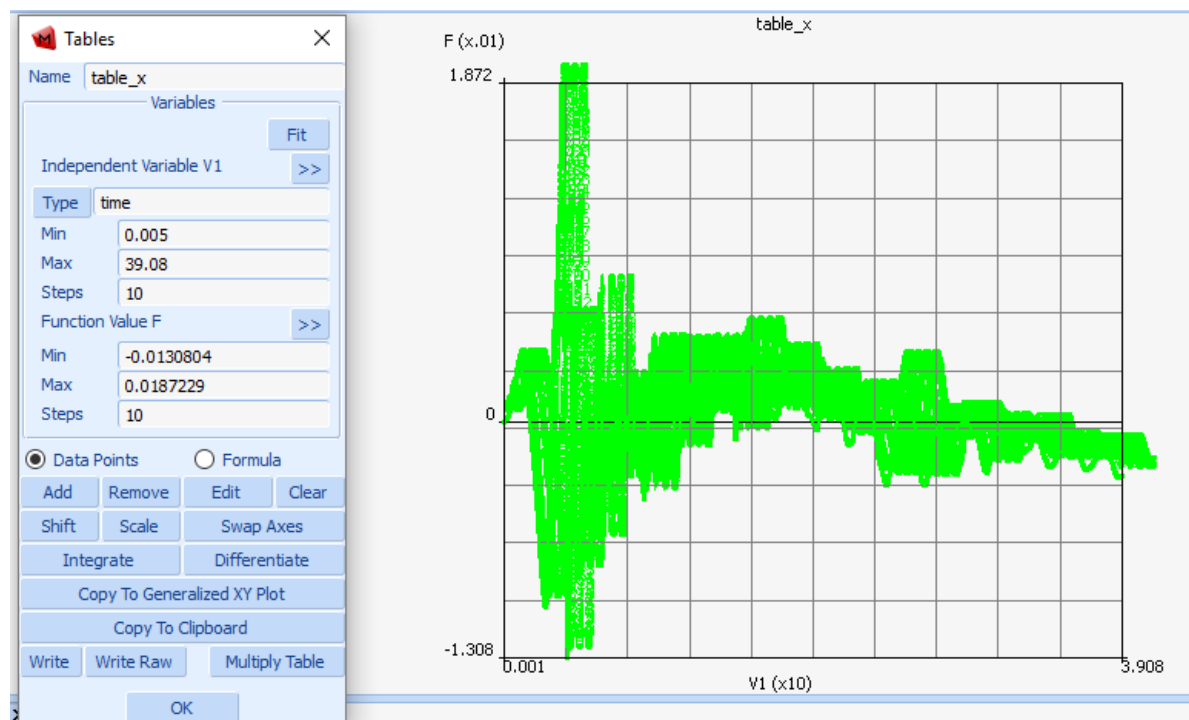
$f_k$ (MPa)	$m$	$\beta$	$f_{mt}$ (MPa)	$f_{wt}$ (MPa)
14.92	29.65	3.04	0.56	0.5

Στην περίπτωση του μεταλλικού σκελετού έγινε η παραδοχή ελαστοπλαστικού γραμμικά κρατυνόμενου υλικού με ιστροπική κράτυνση σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises, η θλιπτική αντοχή Yield Stress του υλικού λαμβάνεται 235 MPa.

## 7.2 Συνοριακές συνθήκες

Η επιβολή της σεισμικής διέγερσης στους δύο φορείς έγινε με διέγερση της βάσης τους κατά τους άξονες x,y,z αντίστοιχα. Τα σεισμικά δεδομένα εισήχθηκαν στο πρόγραμμα Marc Mentat με τη

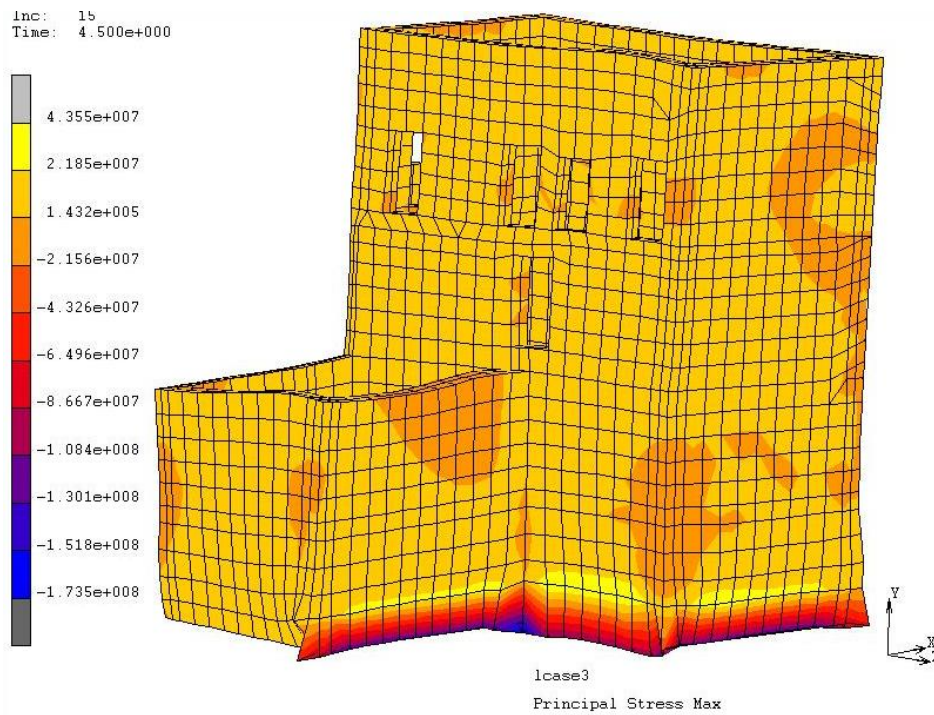
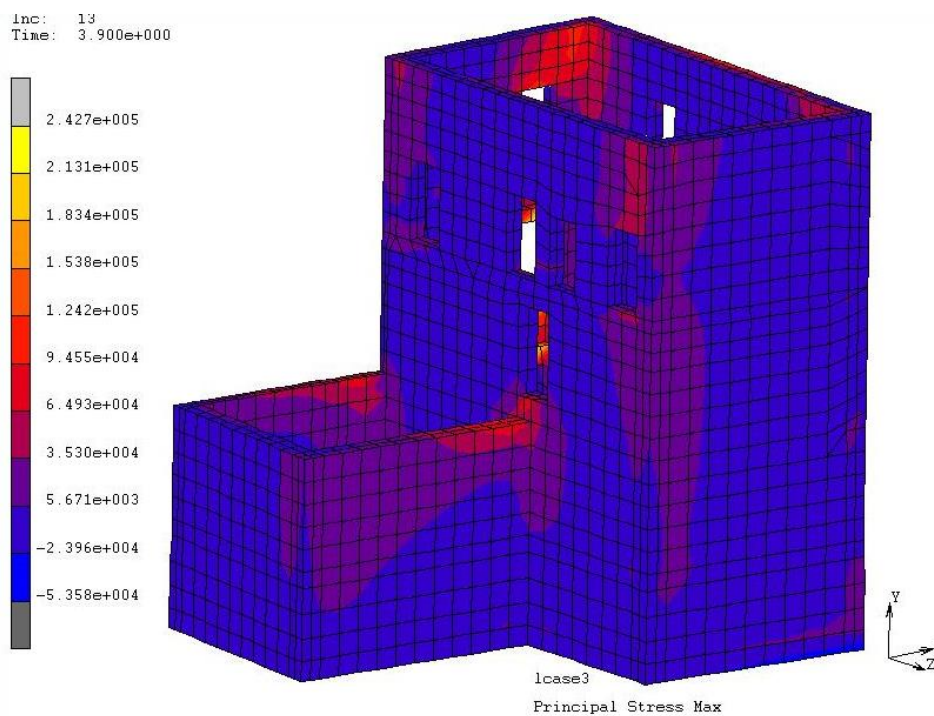
μορφή πίνακα (table), κατόπιν διπλής ολοκλήρωσης για τη μετατροπή τους από χρονοϊστορία επιτάχυνσης σε μετατόπιση (Εικόνα 45).



Εικόνα 45: Εισαγωγή του πίνακα διέγερσης της βάσης της κατασκευής σύμφωνα με πραγματικά σεισμικά γεγονότα

Έπειτα οι τρεις πίνακες που περιγράφουν μετατοπίσεις κατά τους τρεις κύριους άξονες, εισάγονται σαν συνοριακές συνθήκες που περιγράφουν την έδραση της κατασκευής στο έδαφος.

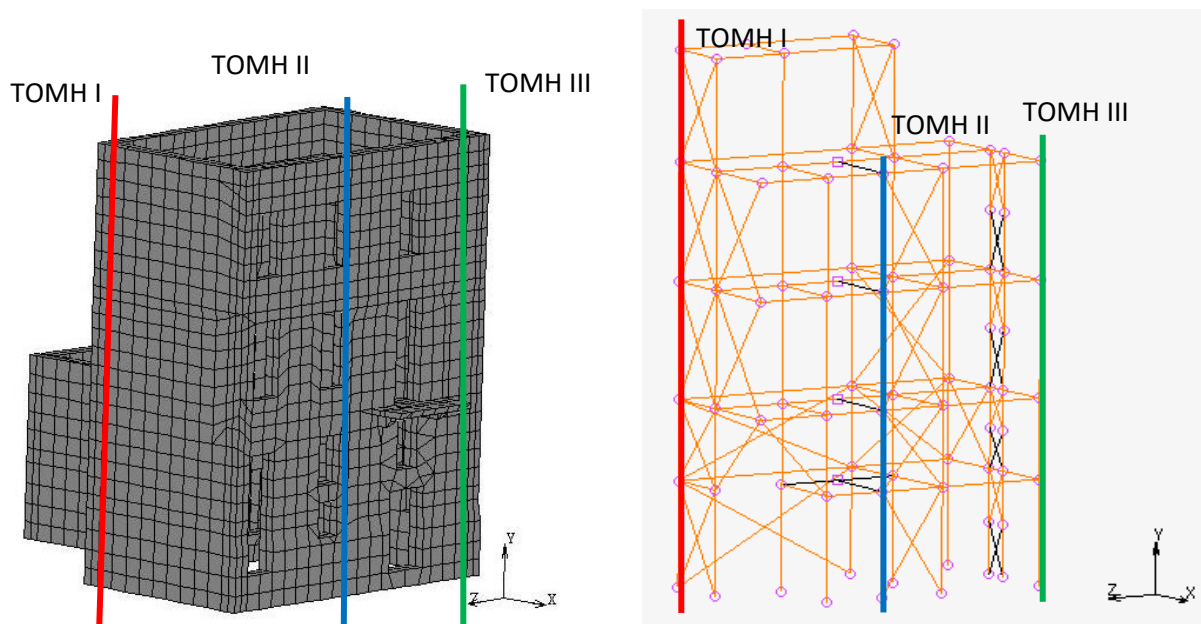
Η επιβολή του σεισμού στη βάση του κτιρίου σε συνδυασμό με την συνοριακή συνθήκη της μεσοτοιχίας, που προβλέπει μηδενική μετατόπιση στον άξονα κάθετο στην τοιχοποιία, οδηγούν σε συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της βάσης που δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δύο σενάρια για την καλύτερη προσομοίωση αυτής της συνθήκης (Εικόνες 46,47). Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει την επιβολή του περιορισμού λόγω μεσοτοιχίας στους κόμβους της βάσης που εφάπτονται με το γειτονικό κτίριο και την αφαίρεση του σεισμού από τους κόμβους αυτούς και το δεύτερο σενάριο την θεώρηση του κτιρίου χωρίς τον περιορισμό της μεσοτοιχίας. Από τα δύο σενάρια για τη συνέχεια των υπολογισμών επιλέγεται το 1<sup>ο</sup> καθώς, όπως προκύπτει και από τα ακόλουθα διαγράμματα μέγιστων κύριων τάσεων, είναι το δυσχερέστερο.

Εικόνα 46: Σενάριο 1<sup>ο</sup> – συνοριακή συνθήκη μεσοτοιχίαςΕικόνα 47: Σενάριο 2<sup>ο</sup> – χωρίς συνοριακή συνθήκη μεσοτοιχίας

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς η μεσοτοιχία με το γειτονικό κτίριο θα μπορούσε να προσομοιωθεί με ελαστική στήριξη με χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τη δυσκαμψία του κτιρίου. Μια τέτοια θεώρηση αποτελεί αντικείμενο για μελλοντική έρευνα.

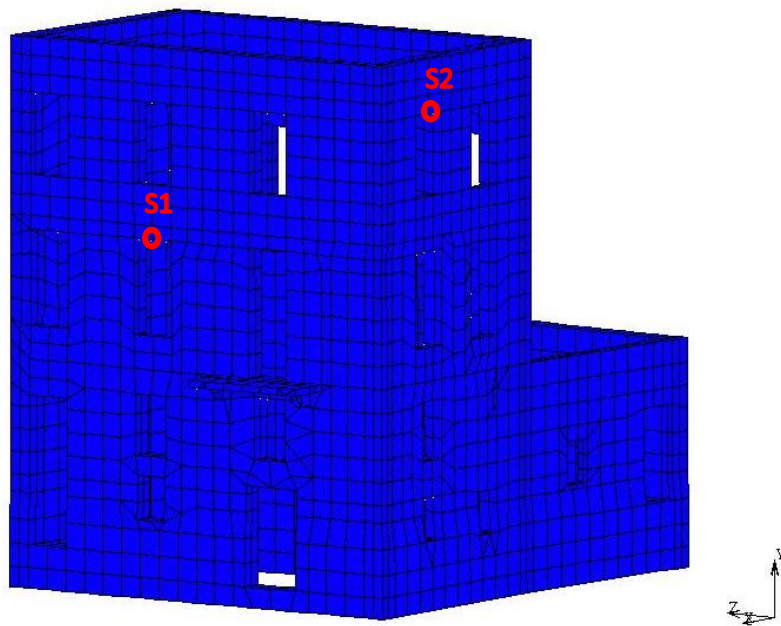
### 7.3 Δυναμική απόκριση για φορείς χωρίς σύνδεση

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας με χρήση του λογισμικού Marc – Mentat παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά η σεισμική διέγερση επιβλήθηκε ξεχωριστά στο κέλυφος και στον μεταλλικό σκελετό. Στις Εικόνες 48,49,50 παρουσιάζονται, στους δύο φορείς ξεχωριστά, οι τρεις τομές για παρακολούθηση των μετατοπίσεων και τα τέσσερα σημεία (δύο ανά φορέα) για την παρακολούθηση των ιστορικών μετατόπισης με την επιβολή της σεισμικής καταπόνησης.

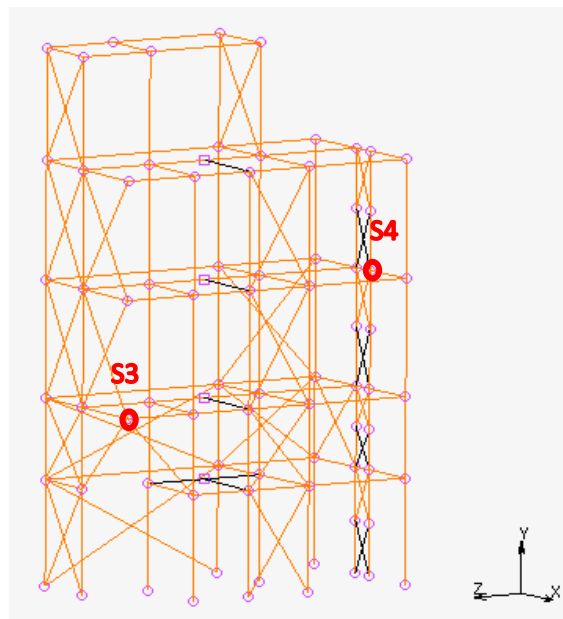


Εικόνα 48: Οι τρεις τομές παρακολούθησης των μετατοπίσεων





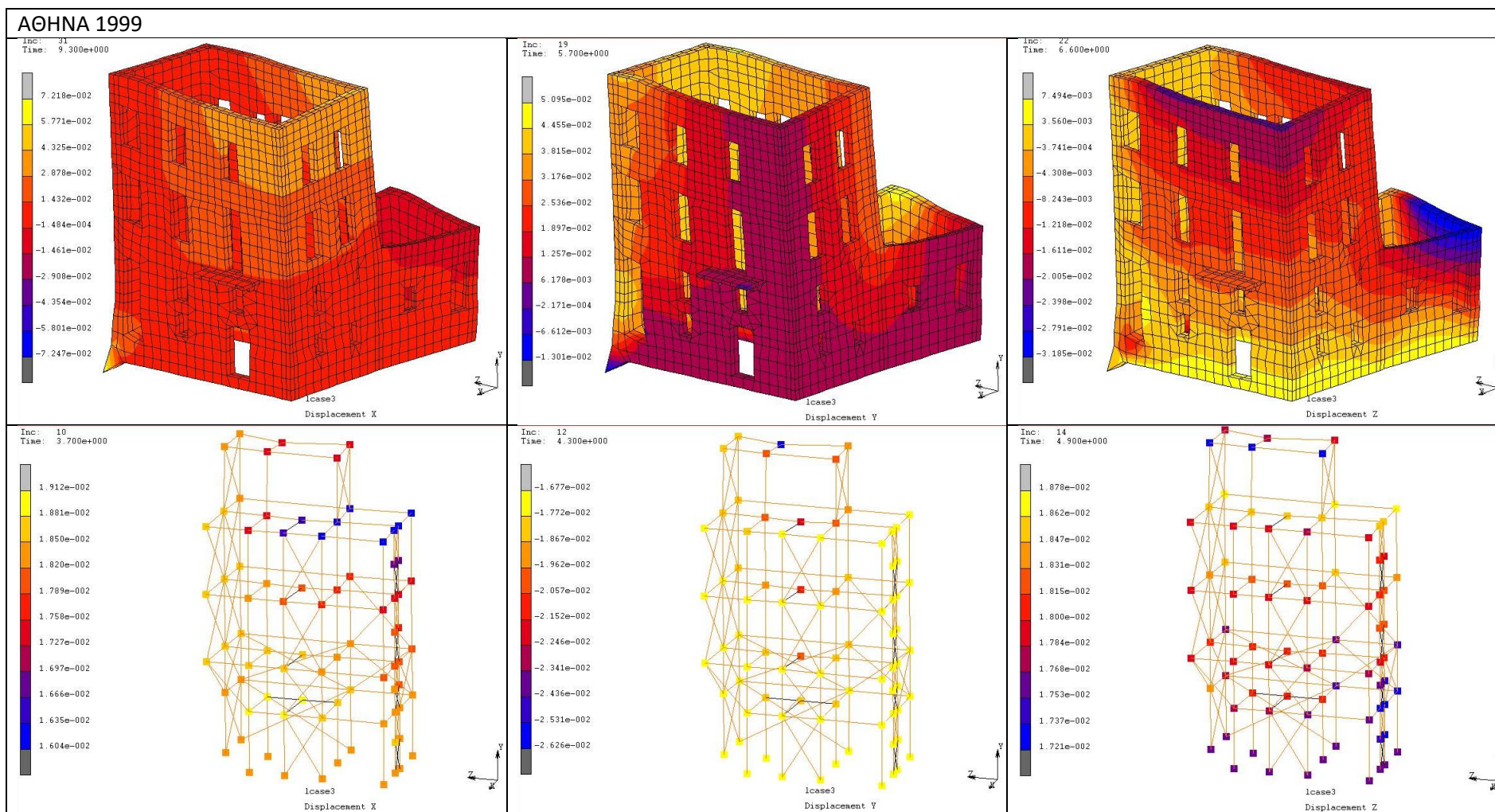
Εικόνα 49: Σημεία παρακολούθησης χρονοϊστοριών μετατόπισης στο κέλυφος (κόμβοι S1:9439 και S2:12539)



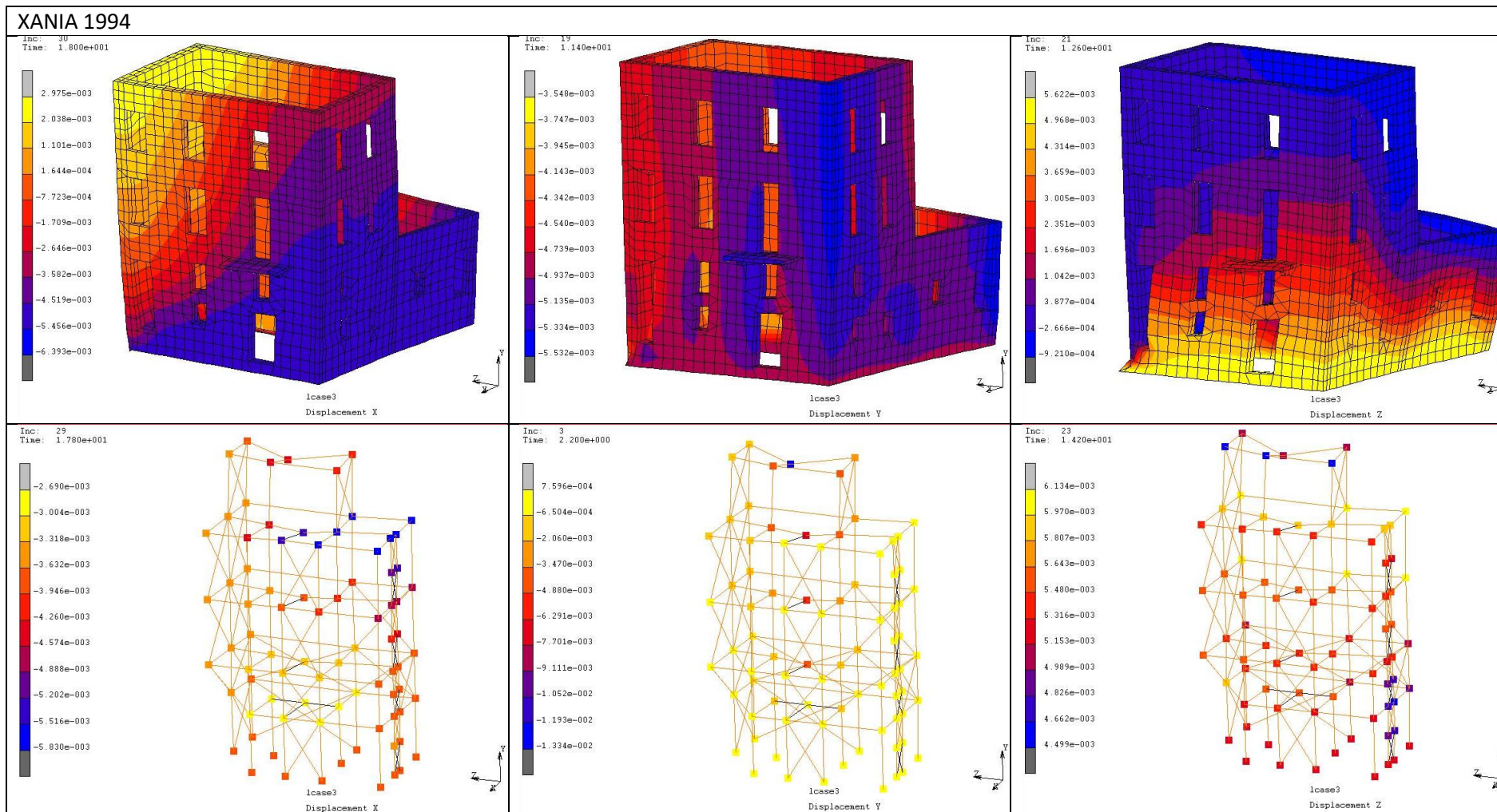
Εικόνα 50: Σημεία παρακολούθησης χρονοϊστοριών μετατόπισης στον μεταλλικό σκελετό (κόμβοι S3:145 και S4:97)

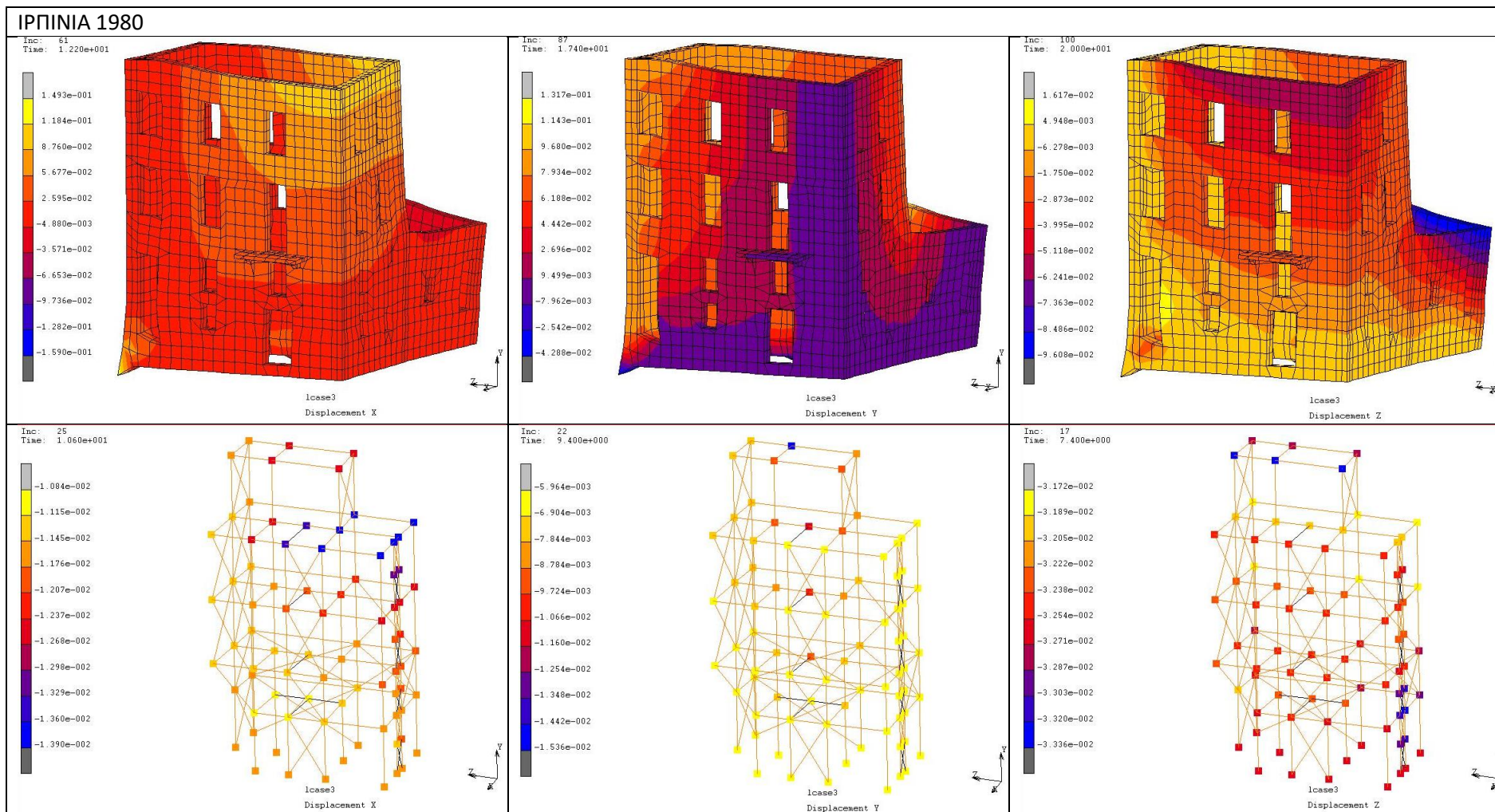
Στις ακόλουθες εικόνες και διαγράμματα παρακολουθούμε την απόκριση των δύο φορέων ξεχωριστά με την επιβολή των τριών σεισμικών γεγονότων (Πίνακας 9).

Πίνακας 9: Μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες του κελύφους και του μεταλλικού σκελετού για τα τρία σεισμικά γεγονότα









Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10) παρουσιάζεται η εικόνα των μέγιστων μετατοπίσεων που προκαλούνται από τα τρία σεισμικά γεγονότα και είναι εμφανές ότι το σεισμικό γεγονός των Χανίων διεγείρει λιγότερο τόσο το κέλυφος όσο και τον μεταλλικό σκελετό. Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες για τα τρία σεισμικά γεγονότα που μελετήθηκαν. Ως μέγιστη μετατόπιση κελύφους λαμβάνεται υπόψη η μετατόπιση που αφορά το κυρίως κτίσμα και όχι την εσωτερική αυλή που βρίσκεται από πίσω. Γίνεται υπολογισμός των συνολικών μετατοπίσεων στους τρεις κύριους άξονες, έτσι ώστε να εκτιμηθεί ο αρμός που χρειάζεται να υπάρχει μεταξύ τοιχοποιίας και μεταλλικού σκελετού, τόσο για την προσθήκη της εσωτερικής θερμομόνωσης όσο και για την αποφυγή εμβολισμού της τοιχοποιίας σε περίπτωση σεισμού. Για τις οριζόντιες διευθύνσεις X και Z οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις καταγράφονται για το σεισμό της Ιρπίνια και προσεγγίζουν τα 11.2cm και 10cm αντίστοιχα. Επίσης για τους σεισμούς σε Αθήνα και Ιρπίνια οι μετατοπίσεις στο κέλυφος εμφανίζονται μεγαλύτερες από αυτές του μεταλλικού σκελετού.

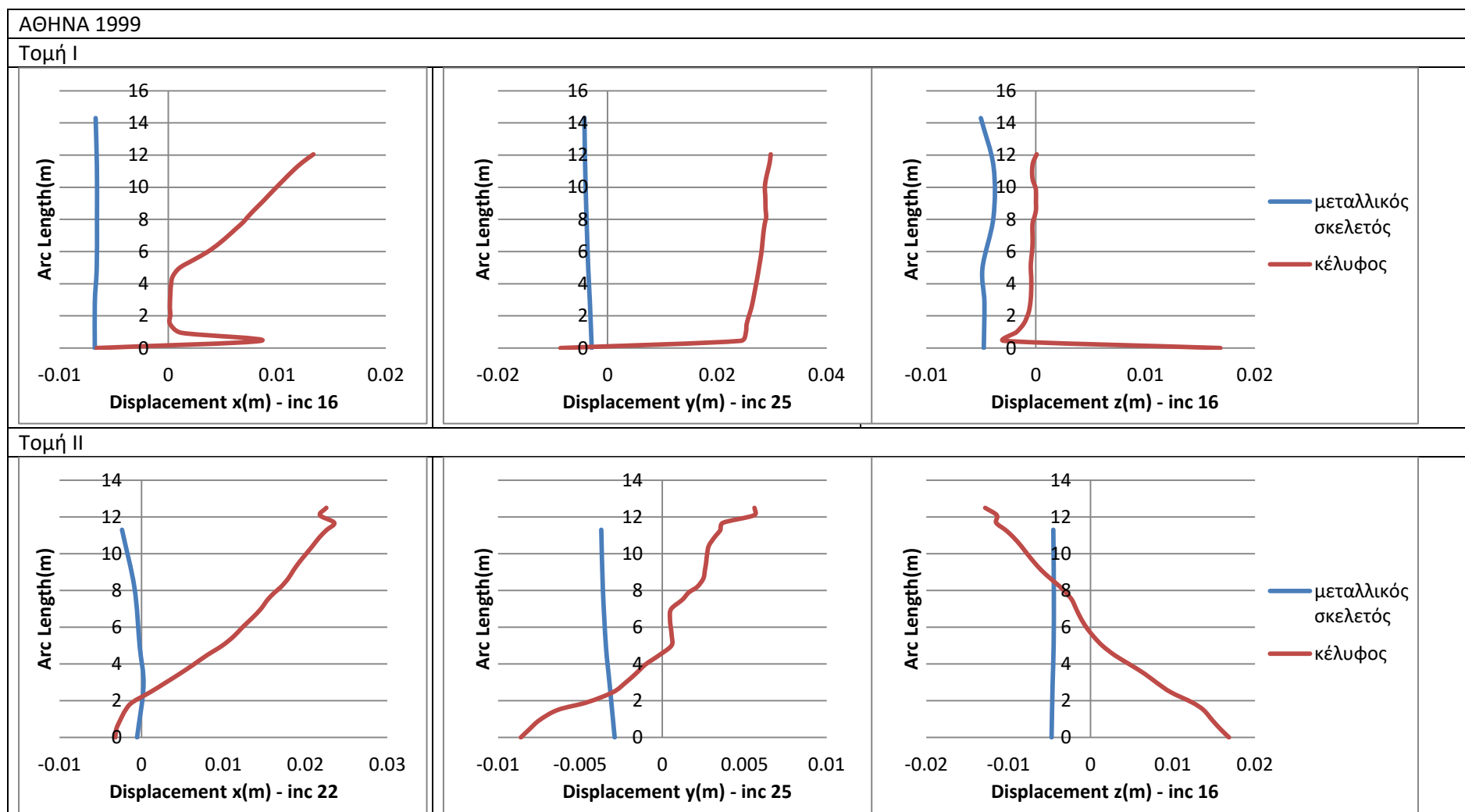
**Πίνακας 10: Μέγιστες μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες για τα τρία σεισμικά γεγονότα**

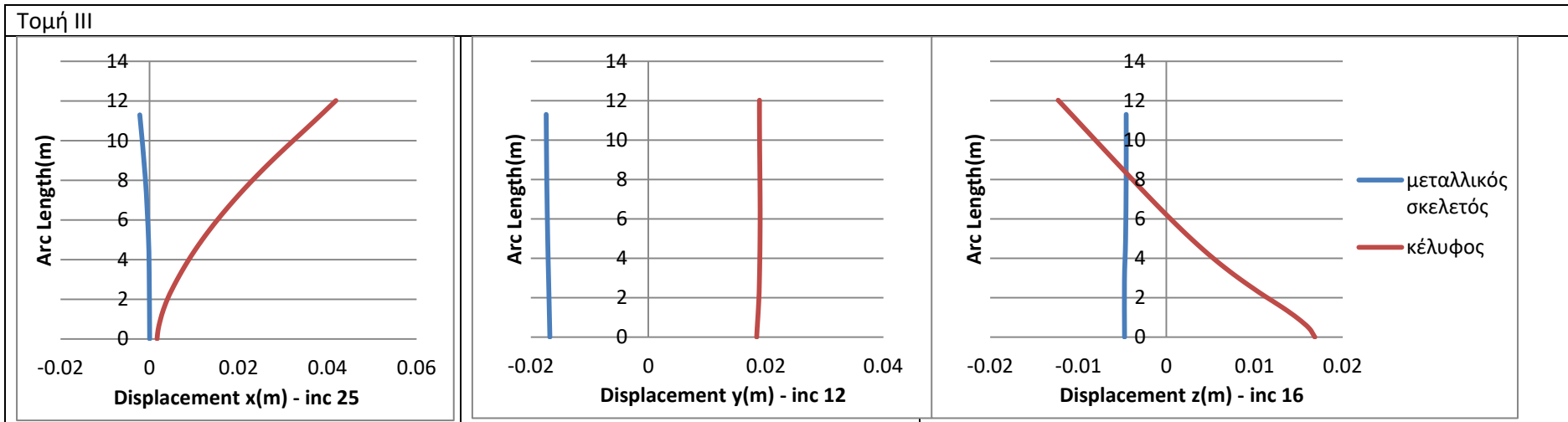
		X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Αθήνα	Κέλυφος	5.771	4.455	2.791
	Μεταλλικός σκελετός	1.912	2.626	1.878
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>7.683</b>	<b>7.081</b>	<b>4.669</b>
Χανιά	Κέλυφος	0.639	0.914	0.562
	Μεταλλικός σκελετός	0.583	1.334	0.613
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>1.222</b>	<b>2.248</b>	<b>1.175</b>
Ιρπίνια	Κέλυφος	9.823	8.219	6.727
	Μεταλλικός σκελετός	1.396	0.904	3.25
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>11.219</b>	<b>9.123</b>	<b>9.977</b>

Το σεισμικό γεγονός στην Ιρπίνια της Ιταλίας το 1980 φαίνεται να διεγείρει ιδιαίτερα το υφιστάμενο κέλυφος με μέγιστες μετατοπίσεις κατά X στα 9.823cm, ενώ αντίστοιχα για τον μεταλλικό σκελετό η μέγιστη μετατόπιση κατά X υπολογίζεται 1.4cm.

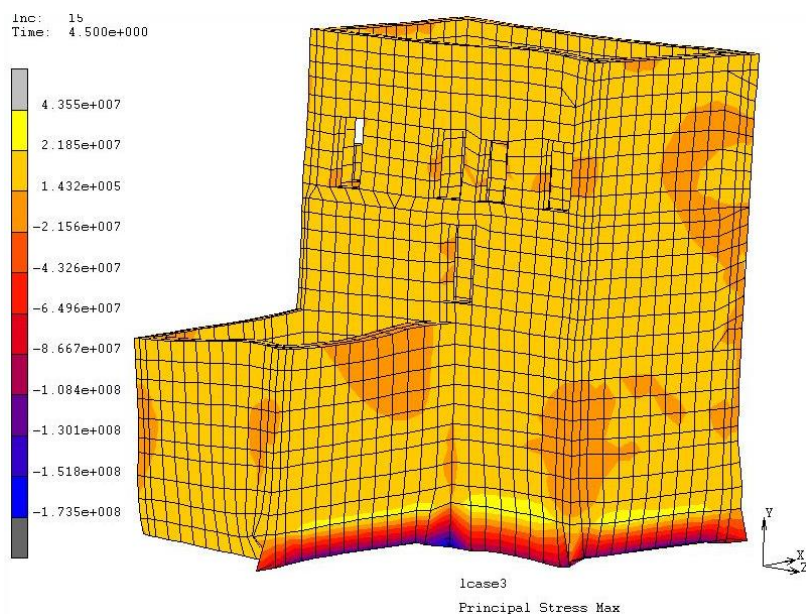


Πίνακας 11: Διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες – Αθήνα 1999

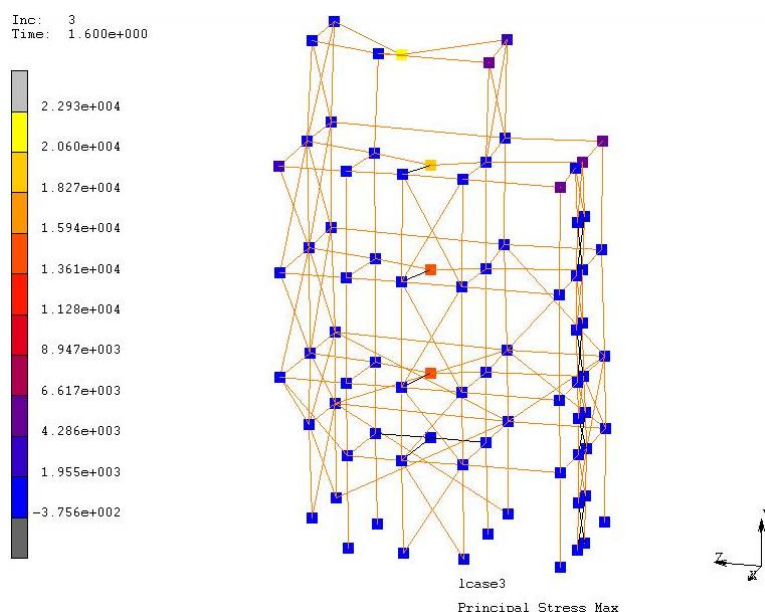




Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 11) φαίνονται τα διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες, για το κέλυφος και τον μεταλλικό σκελετό, για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές. Για τον άξονα X η μέγιστη μετατόπιση από την κατακόρυφο ανέρχεται στα 4.2cm. Για τον άξονα Y (κατακόρυφος άξονας) οι μέγιστες μετατοπίσεις για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές κυμαίνονται στα 3cm για το κέλυφος και 2cm για το μεταλλικό σκελετό, ενώ κατά τον άξονα Z είναι 1.7cm για το κέλυφος και 0.5cm για τον μεταλλικό σκελετό. Η δυσμενέστερη τομή είναι η τομή III που αντιστοιχεί στην ελεύθερη νοτιοανατολική γωνία του κτίσματος.



Εικόνα 51: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Αθήνα 1999

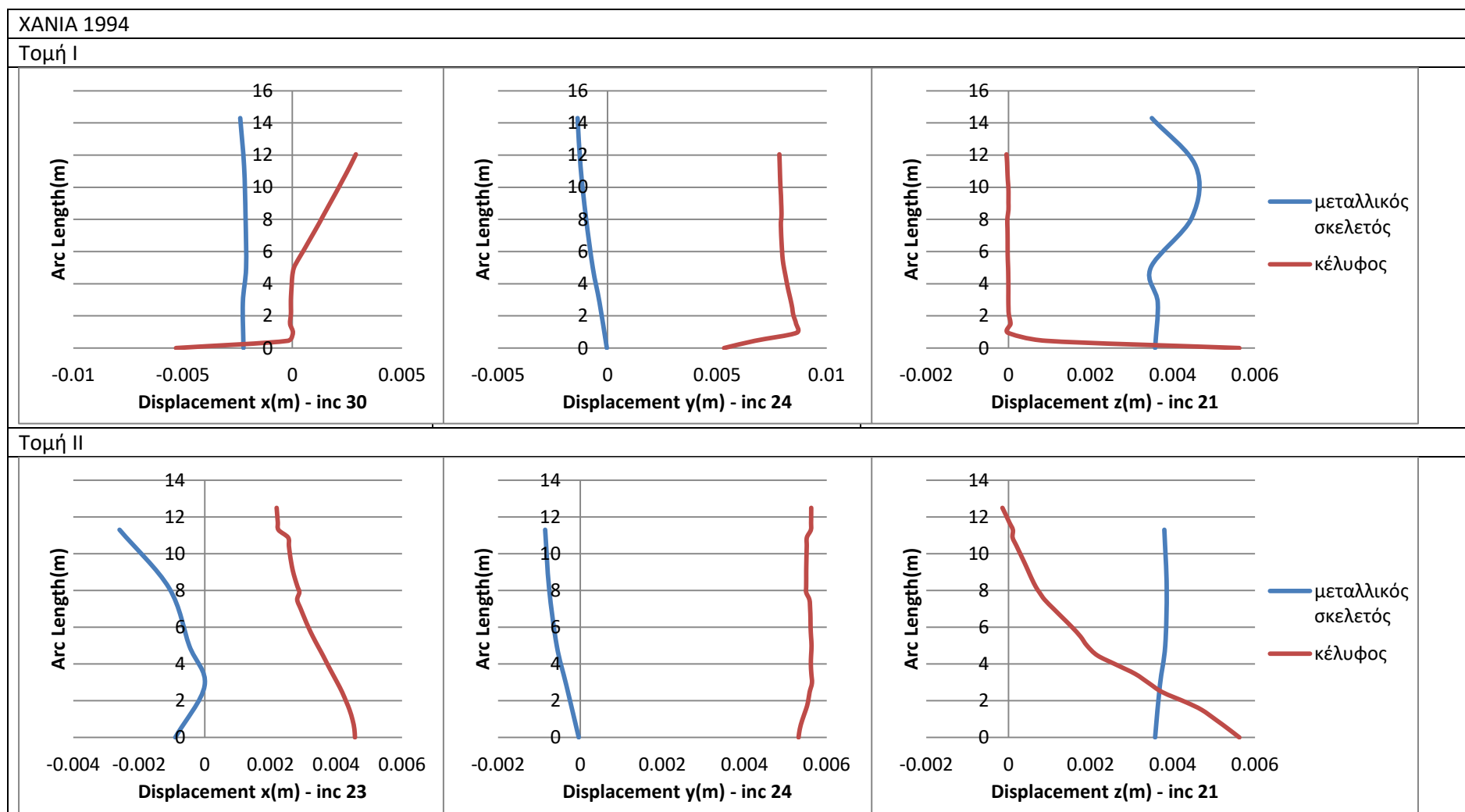


Εικόνα 52: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Αθήνα 1999

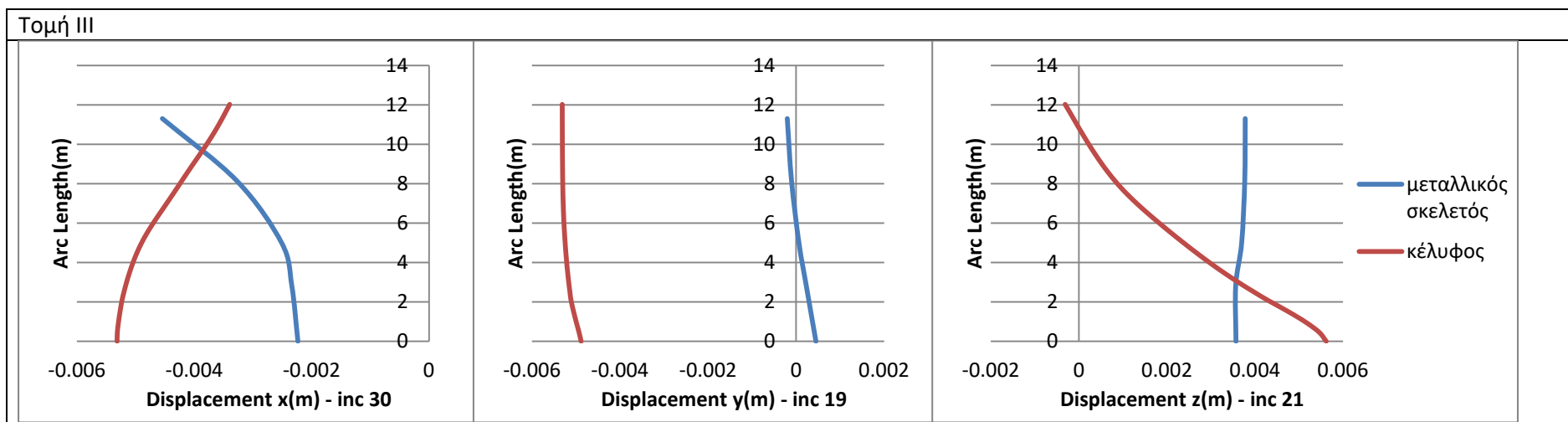
Από τα διαγράμματα των μέγιστων κύριων τάσεων για τους δύο φορείς (Εικόνες 51,52), προκύπτει ότι το κέλυφος υπόκειται σε μεγαλύτερες καταπονήσεις σε σχέση με τον μεταλλικό σκελετό. Από τα διαγράμματα κατανομής ισοτασικών περιοχών των μέγιστων κύριων τάσεων μπορούμε να

εκτιμήσουμε τις 'ευάλωτες περιοχές' όπου ο φορέας επιβαρύνεται με θλιπτικές ή εφελκυστικές τάσεις.

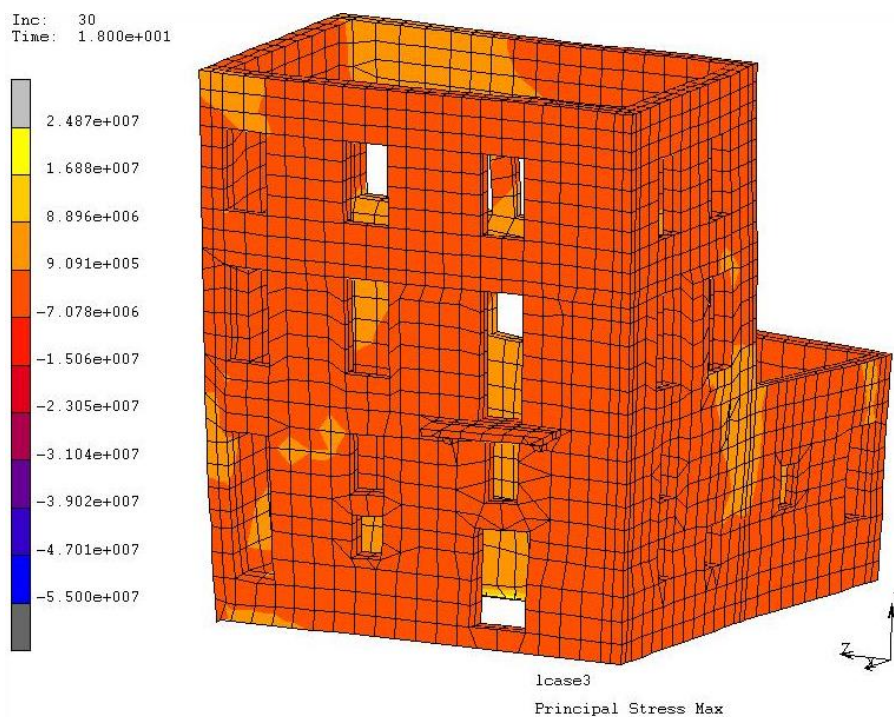
Πίνακας 12: Διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες – Χανιά 1994



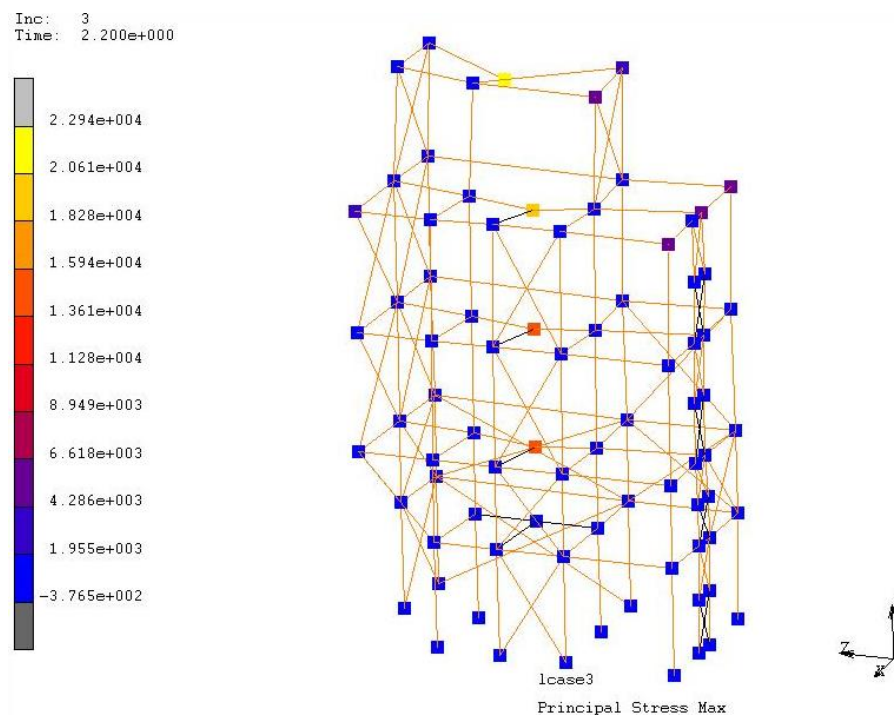




Για το σεισμικό γεγονός των Χανίων (Πίνακας 12) οι μέγιστες μετατοπίσεις για τις προεπιλεγμένες τομές κυμαίνονται, στον άξονα X από -0.5cm για τον μεταλλικό σκελετό έως 0.5cm για το κέλυφος, στον άξονα Y (κατακόρυφο άξονα), ανέρχονται σε 0.9cm για το κέλυφος και -0.1cm για τον μεταλλικό σκελετό, ενώ στον άξονα Z σε 0.56cm για το κέλυφος και 0.5cm για το μεταλλικό σκελετό.



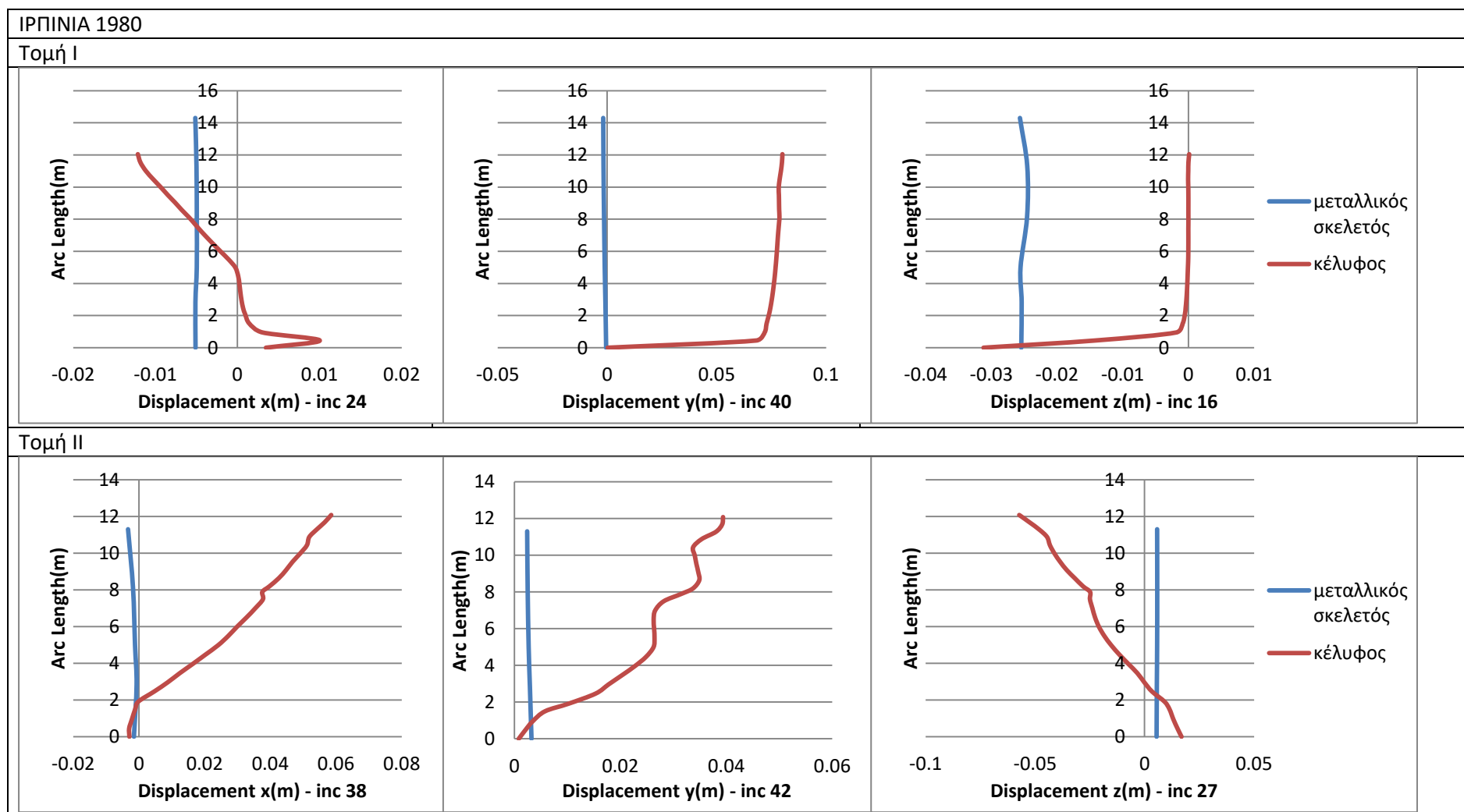
Εικόνα 53: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Κέλυφος – Χανιά 1994

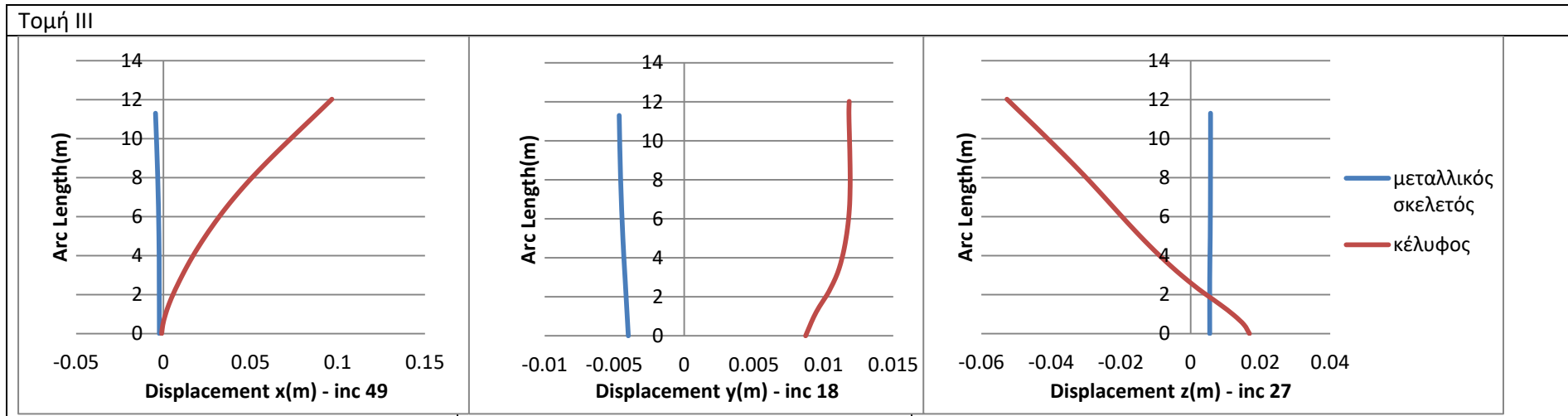


Εικόνα 54: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Μεταλλικός σκελετός – Χανιά 1994

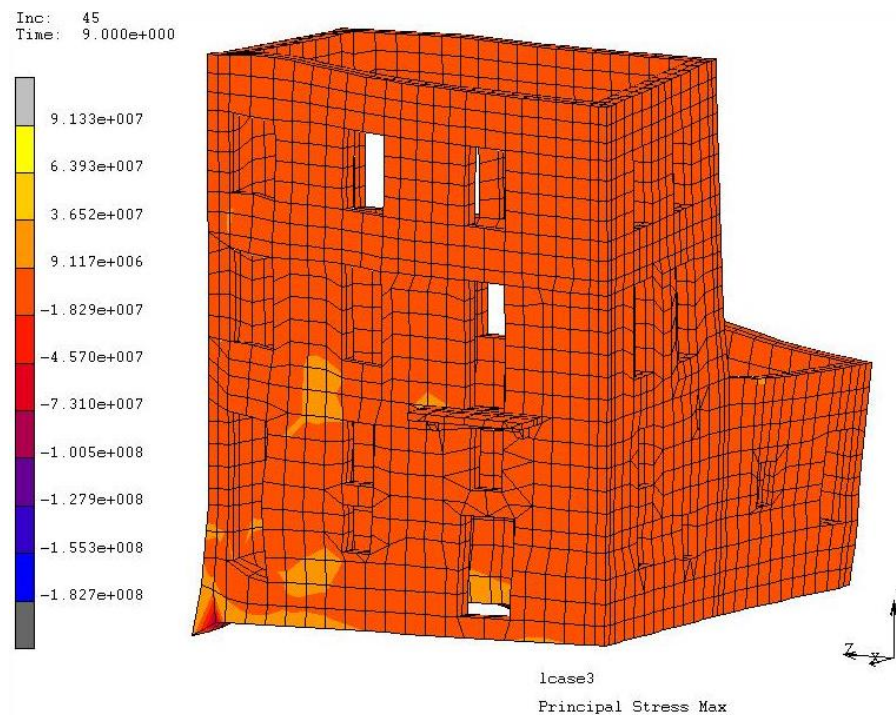
Οι μέγιστες κύριες τάσεις και στην περίπτωση του σεισμικού γεγονότος στα Χανιά εμφανίζονται πολύ μεγαλύτερες στο κέλυφος από ότι στον μεταλλικό σκελετό (Εικόνες 53,54).

Πίνακας 13: Διαγράμματα μετατοπίσεων κατά τους τρεις κύριους άξονες – Ιρπίνια 1980

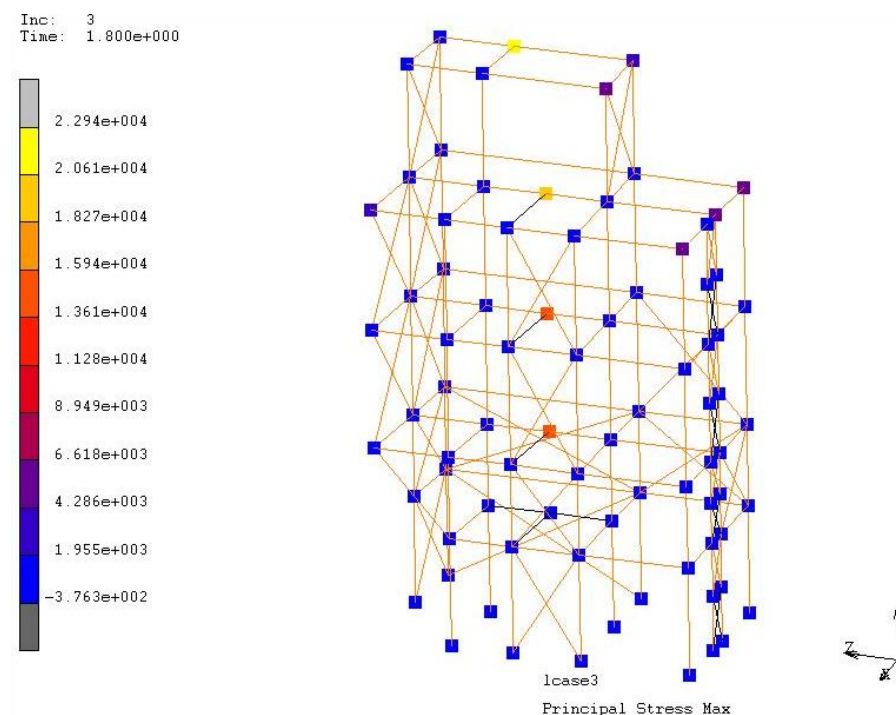




Για το σεισμικό γεγονός στην Ιρπίνια (Πίνακας 13) οι μέγιστες μετατοπίσεις για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές, για τον άξονα X ανέρχονται σε 9.7cm για το κέλυφος και 1.4cm για τον μεταλλικό σκελετό, για τον κατακόρυφο άξονα Y σε 8cm για το κέλυφος και 1cm για τον μεταλλικό σκελετό και για τον άξονα Z σε 5.7cm για το κέλυφος και 3.2cm για το μεταλλικό σκελετό.

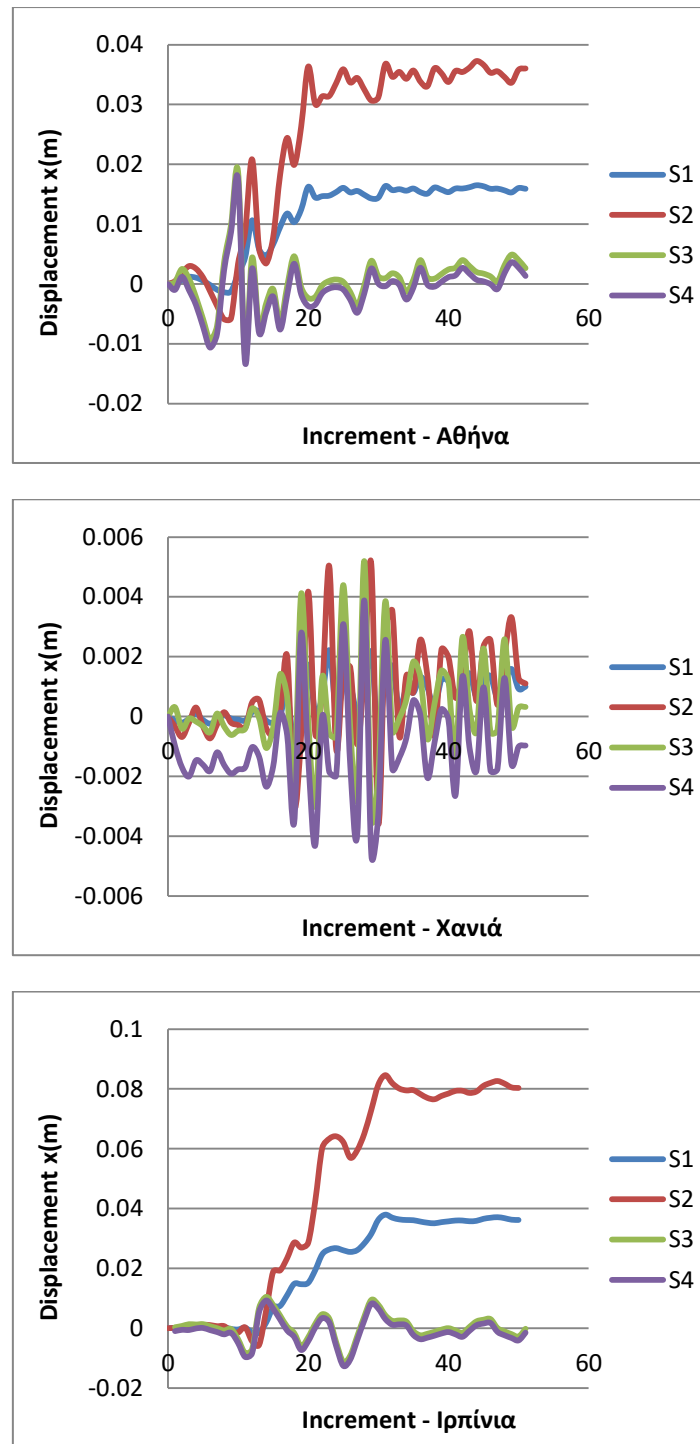


Εικόνα 55: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Κέλυφος – Ιρπίνια 1980



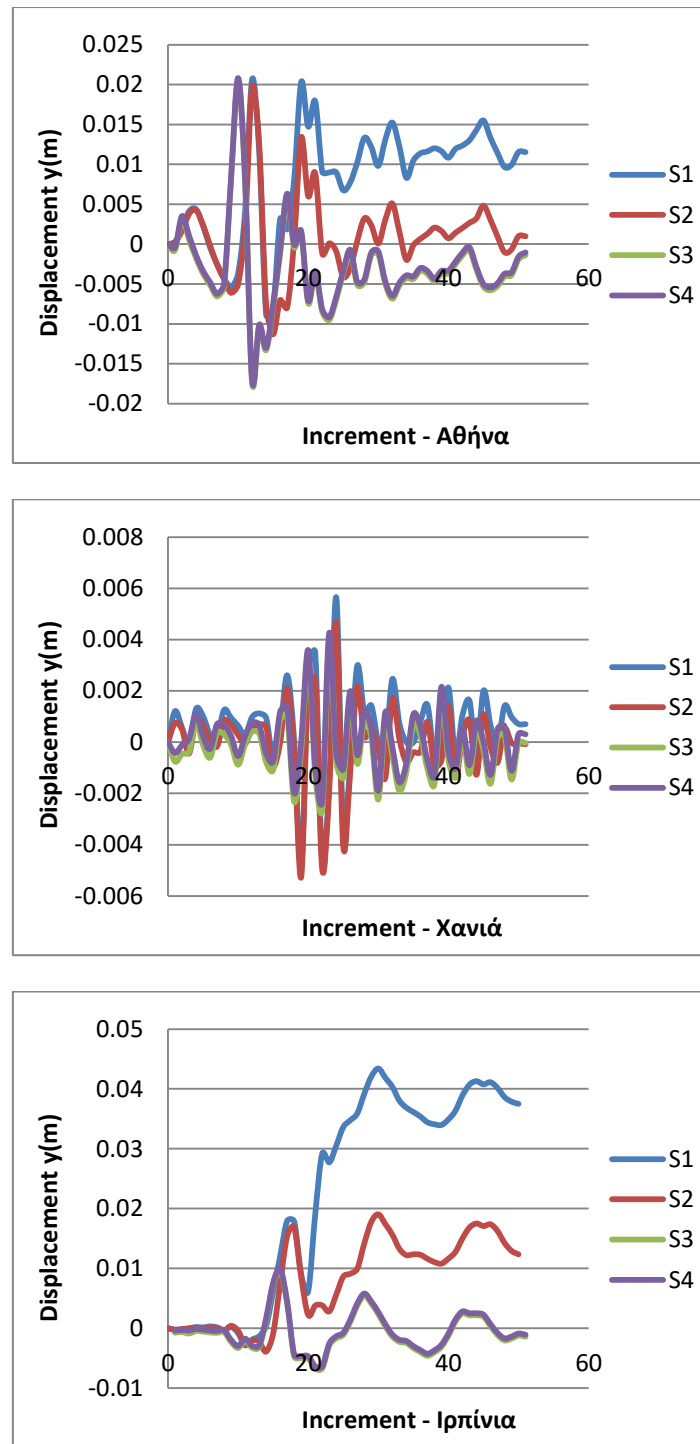
Εικόνα 56: Μέγιστες κύριες τάσεις (Principal Stress Max) – Μεταλλικός σκελετός – Ιρπίνια 1980





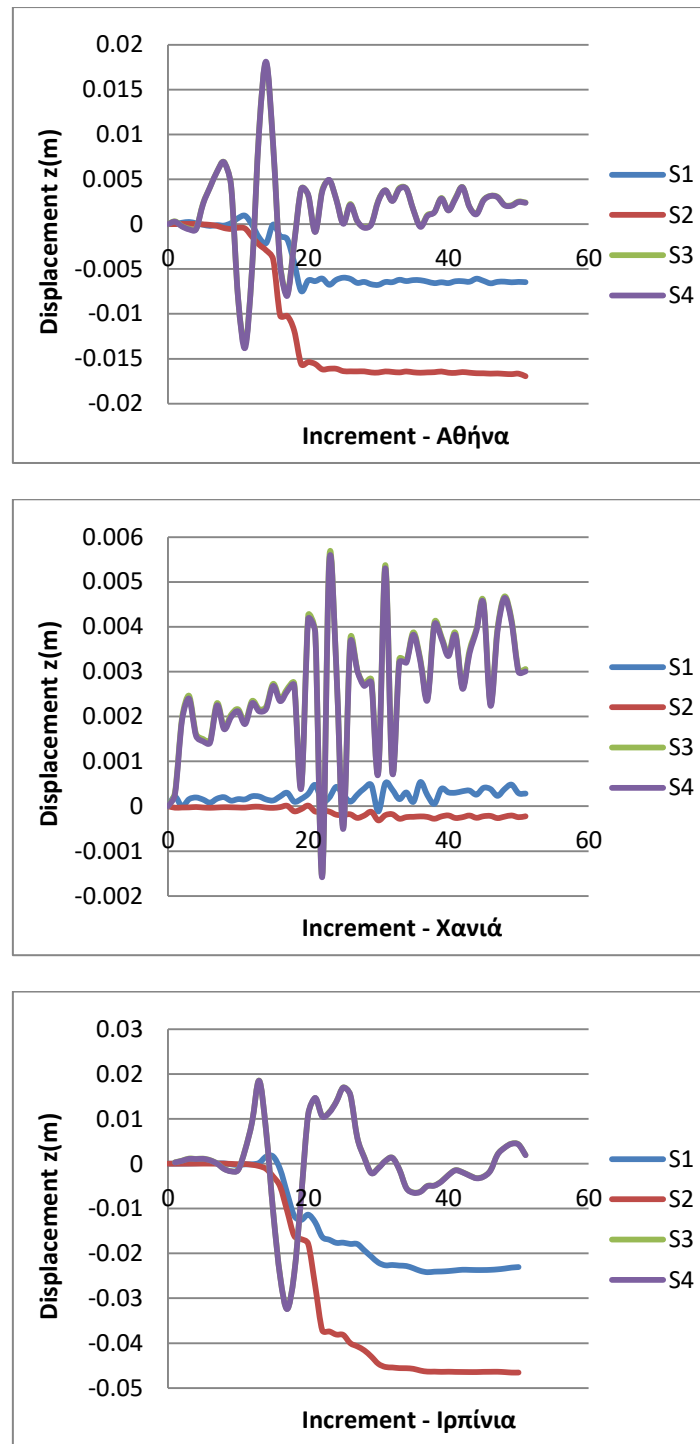
Εικόνα 57: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) κατά τον άξονα Χ

Από την παρατήρηση των χρονοϊστοριών μετατόπισης - κατά τον άξονα Χ, των τεσσάρων προεπιλεγμένων κόμβων, για τα τρία σεισμικά γεγονότα - παρατηρείται ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται κατά βάση στον κόμβο S2:12539 που βρίσκεται στην ανατολική όψη – παράλληλα με τον άξονα Χ και στον δεύτερο όροφο του κελύφους (Εικόνα 57). Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται για το σεισμικό γεγονός της Ιρπίνια στα 8.5cm. Επίσης οι δύο κόμβοι που ανήκουν στον μεταλλικό σκελετό έχουν σχεδόν ταυτόσημο διάγραμμα μετατόπισης για το σεισμικό γεγονός της Αθήνας και της Ιρπίνια.



Εικόνα 58: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) κατά το άξονα Y

Οι μέγιστες μετατοπίσεις κατά τον άξονα Y (που είναι ο κατακόρυφος άξονας) παρατηρούνται και για τα τρία σεισμικά γεγονότα στον κόμβο S1:9439 που βρίσκεται στον πρώτο όροφο της νότιας όψης του κελύφους, με μέγιστη μετατόπιση για το σεισμικό γεγονός της Ιρπίνια στα 4.3cm. Για τα τρία σεισμικά γεγονότα τα διαγράμματα μετατόπισης των κόμβων S3:145 και S4:97 του μεταλλικού σκελετού παρουσιάζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά (Εικόνα 58).



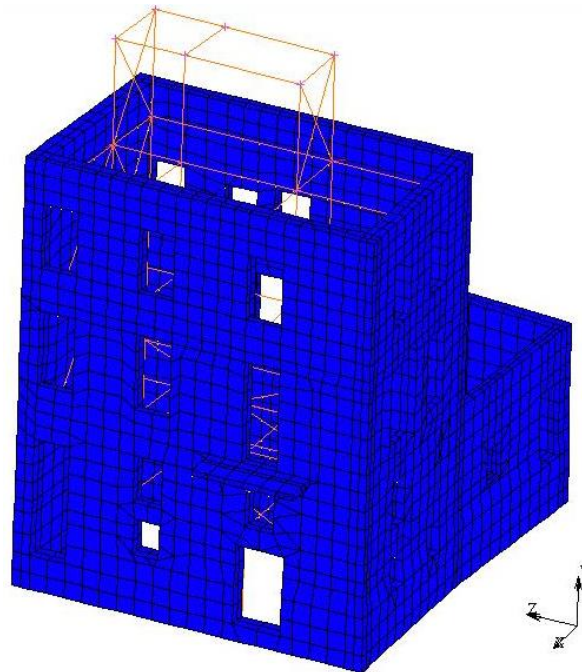
Εικόνα 59: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) κατά το άξονα Z

Οι μέγιστες μετατοπίσεις στους τέσσερις προεπιλεγμένους κόμβους κατά τον άξονα Z εμφανίζονται, όπως και στην περίπτωση του άξονα X για τον κόμβο S2:12539, με μέγιστη μετατόπιση για το σεισμικό γεγονός της Ιρπίνια στα -4.6cm. Σημαντικές μετατοπίσεις εμφανίζονται για τα τρία σεισμικά γεγονότα και από τους δύο κόμβους του μεταλλικού σκελετού S3:145 και S4:97 με μεγαλύτερη του σεισμικού γεγονότος της Ιρπίνια στα -3.2cm (Εικόνα 59).

Από την ανάλυση των τριών σεισμικών γεγονότων προκύπτει ότι ο σεισμός στην Ιρπίνια προκαλεί τις μέγιστες μετατοπίσεις για το κέλυφος, ενώ ο μεταλλικός σκελετός παρουσιάζει μέγιστες μετατοπίσεις τόσο από τη σεισμική διέγερση του σεισμού στην Ιρπίνια όσο και αυτή της Αθήνας.

#### 7.4 Δυναμική απόκριση για σύνδεση των δύο φορέων

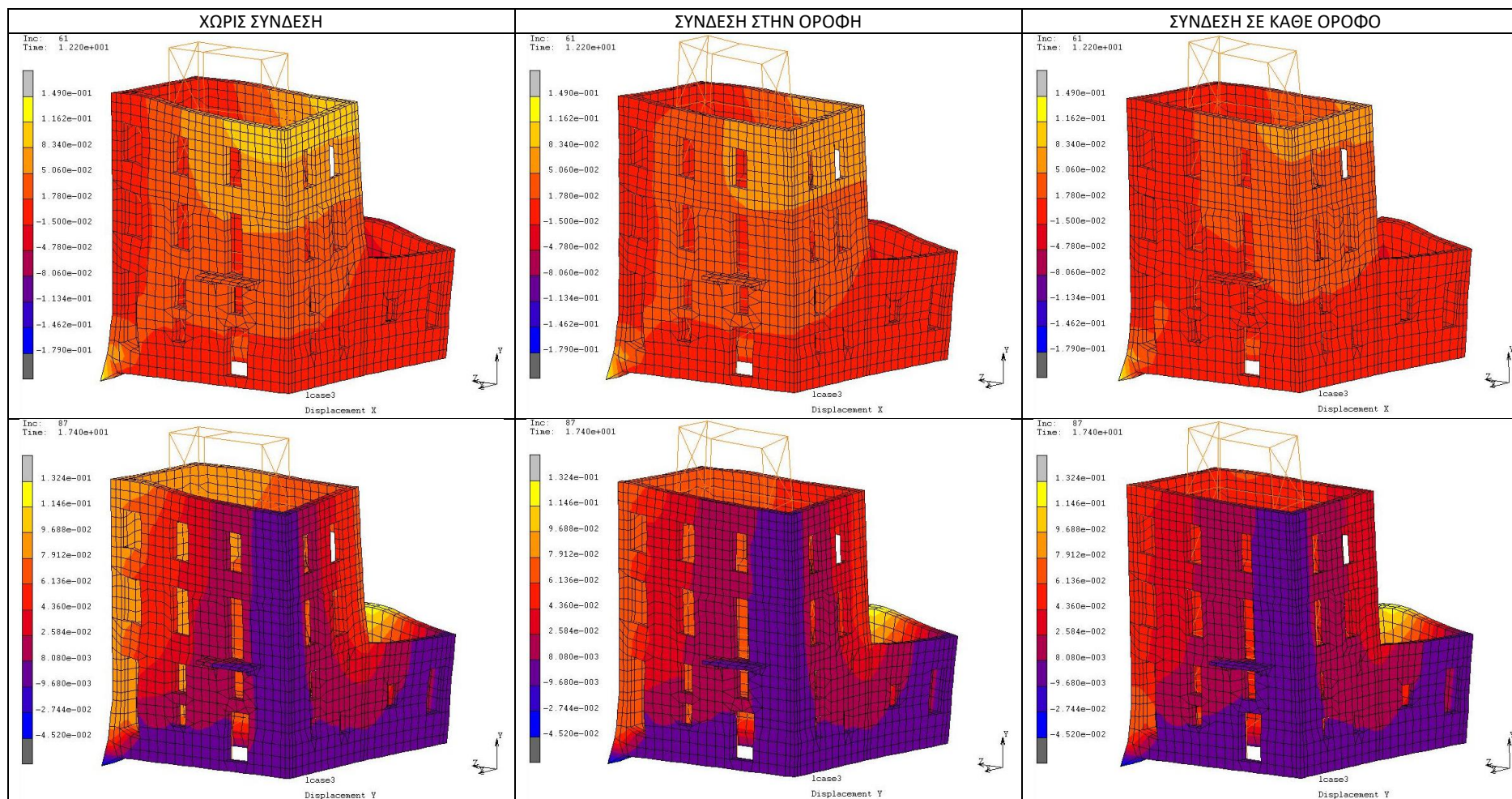
Στη συνέχεια οι δύο φορείς συνδέθηκαν με χρήση στερεών συνδέσεων (rigid links with all degrees of freedom). Μελετήθηκαν δύο σενάρια, το πρώτο αφορά σύνδεση μεταξύ των κόμβων της οροφής της τοιχοποιίας και της μεταλλικής κατασκευής, ενώ το δεύτερο σύνδεση των δύο κατασκευών στο ύψος κάθε ορόφου (Εικόνα 60). Και τα δύο σενάρια υποβλήθηκαν σε διέγερση σύμφωνα με το σεισμικό γεγονός της Ιρπίνια, που είναι αυτό το οποίο προκάλεσε τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις στους ασύνδετους φορείς.



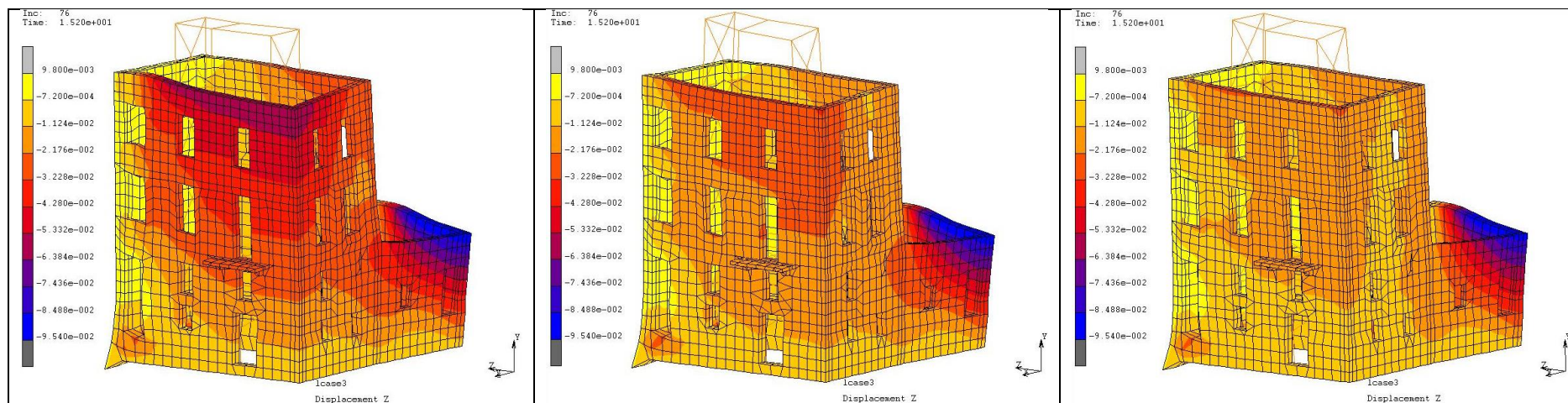
Εικόνα 60: Σύνδεση τοιχοποιίας μεταλλικού σκελετού με στερεές συνδέσεις: σενάριο 1. στην οροφή, σενάριο 2. στο ύψος κάθε ορόφου

Στις ακόλουθες εικόνες και διαγράμματα παρακολουθούμε τη διέγερση των δύο φορέων για τις τρεις περιπτώσεις σύνδεσης (χωρίς σύνδεση, σύνδεση στην οροφή και σύνδεση σε κάθε όροφο) με την επιβολή του σεισμικού γεγονότος της Ιρπίνια (Πίνακας 14).

Πίνακας 14: Μετατοπίσεις κατά τους τρεις κύριους άξονες για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης



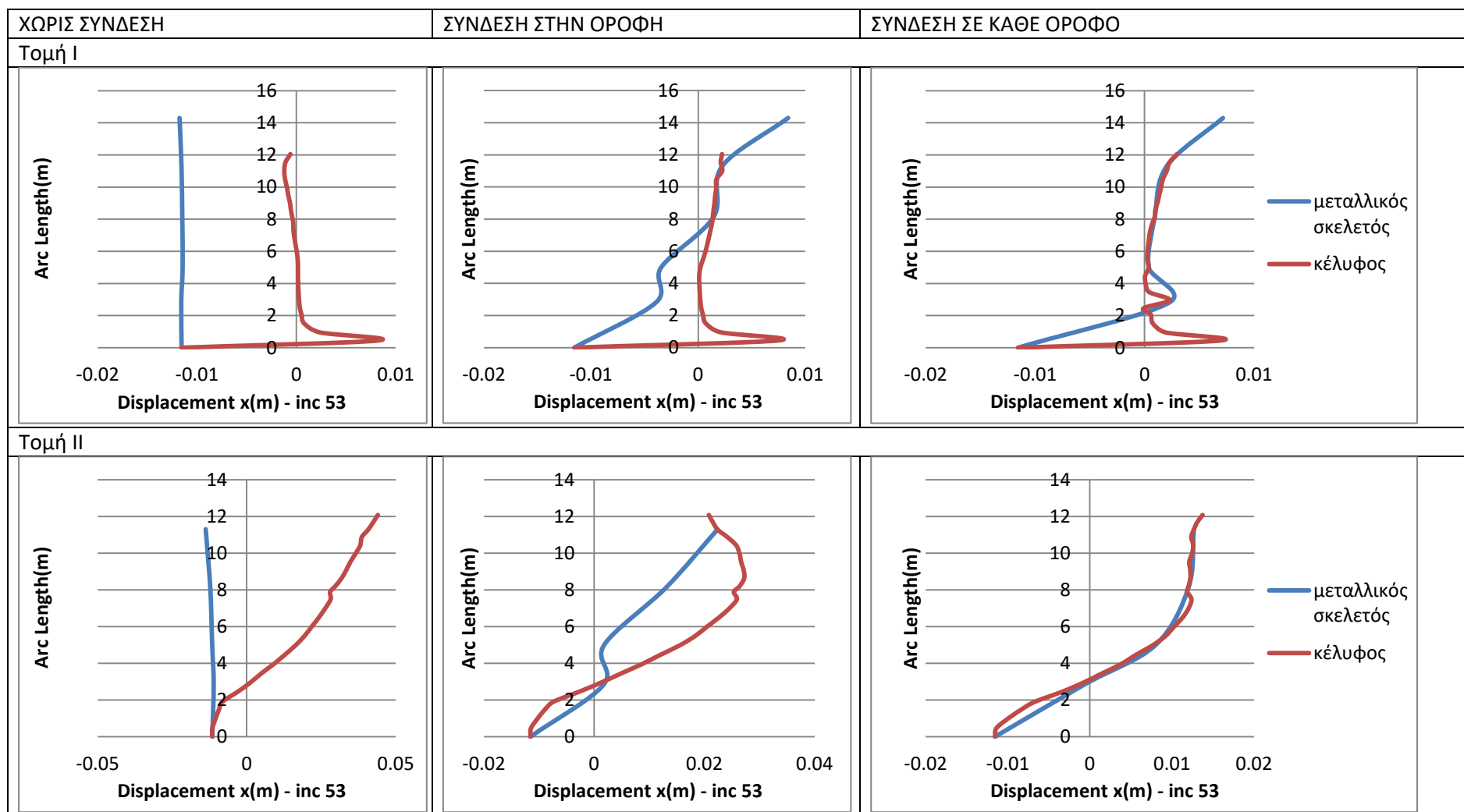


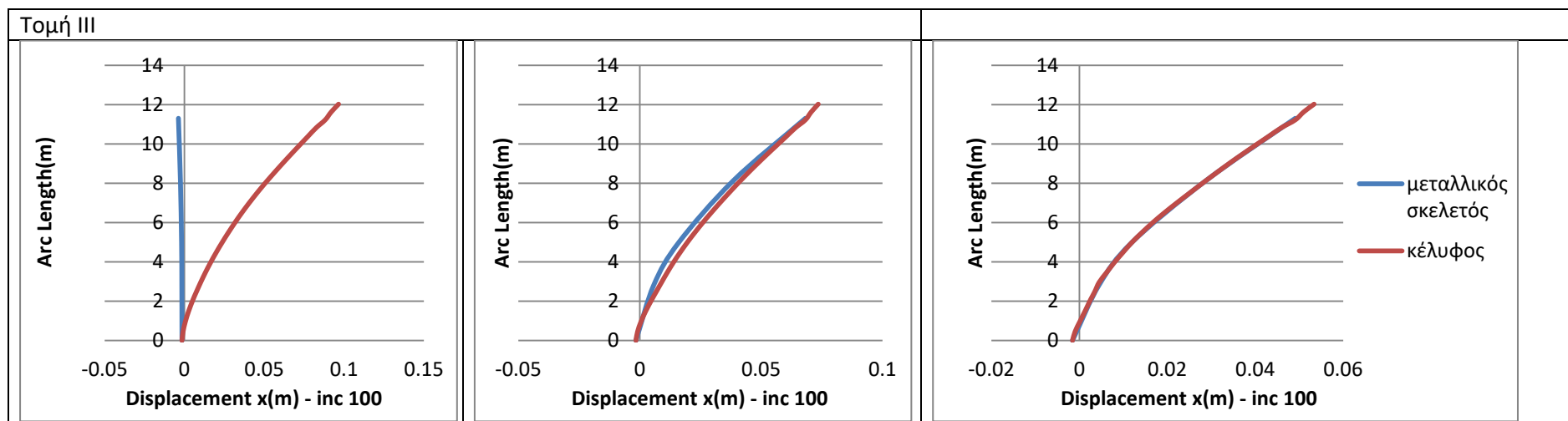


Πίνακας 15: Μέγιστες μετατοπίσεις κατά τους τρεις κύριους άξονες για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης

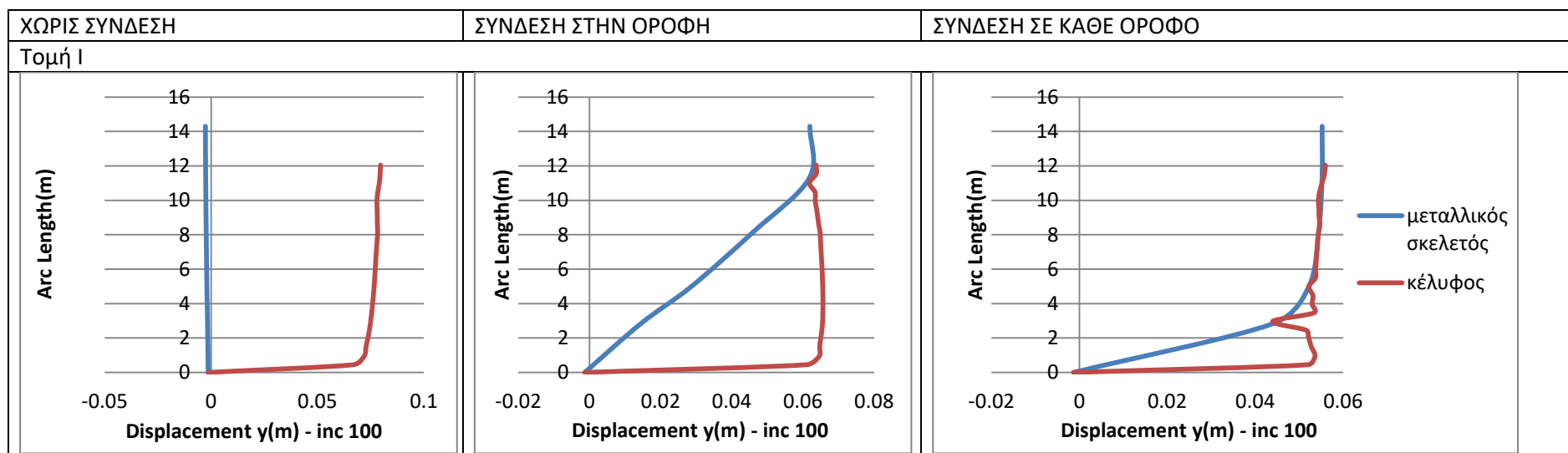
		X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Χωρίς σύνδεση	Κέλυφος	9.823	8.219	6.727
	Μεταλλικός σκελετός	1.396	0.904	3.25
Σύνδεση στην οροφή	Κέλυφος	7.894	6.681	3.611
	Μεταλλικός σκελετός	7.478	6.556	3.028
Σύνδεση σε κάθε όροφο	Κέλυφος	5.94	5.798	2.593
	Μεταλλικός σκελετός	5.596	5.887	2.095

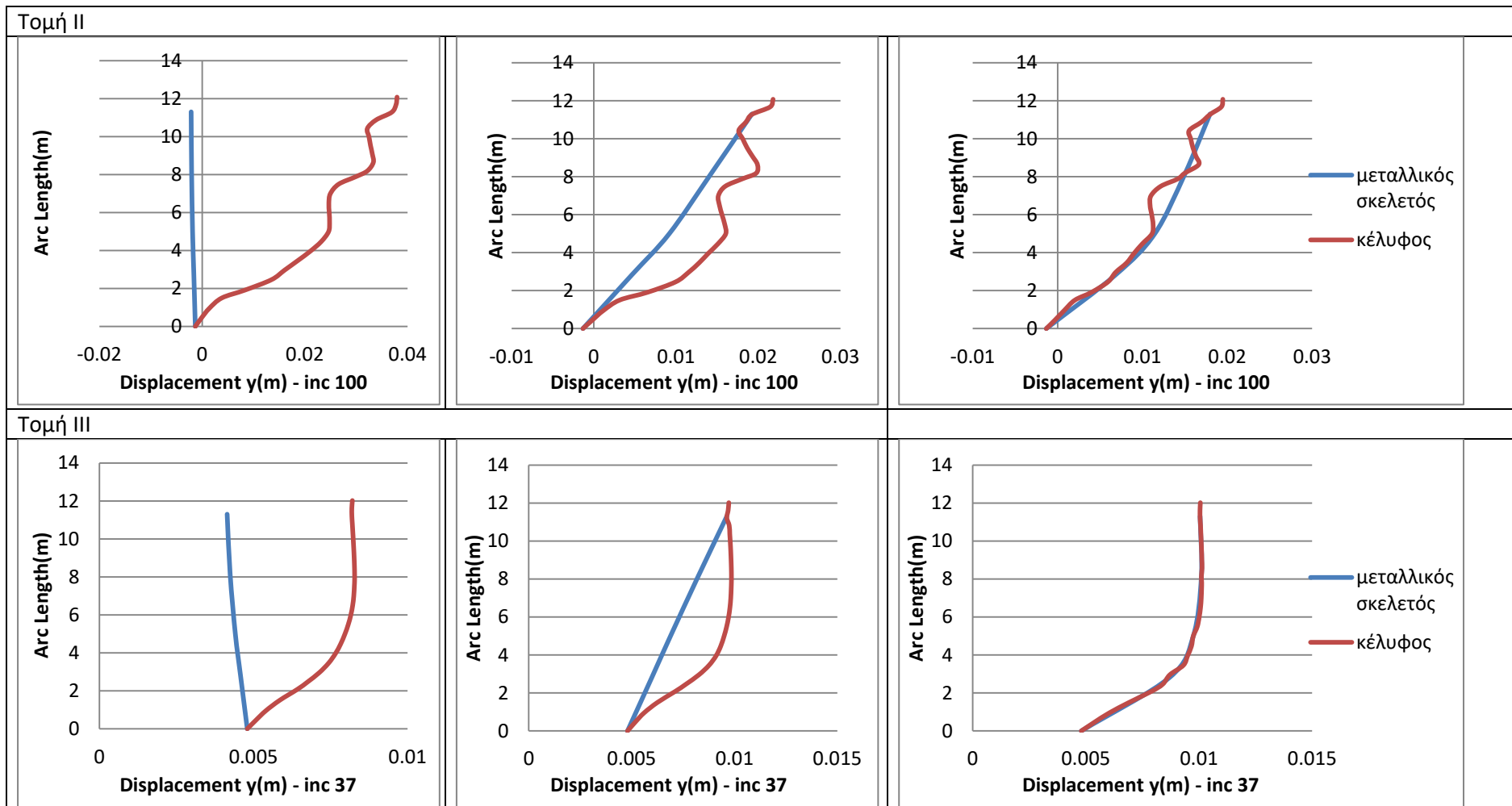
Πίνακας 16: Διαγράμματα μετατοπίσεων στον άξονα Χ για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές



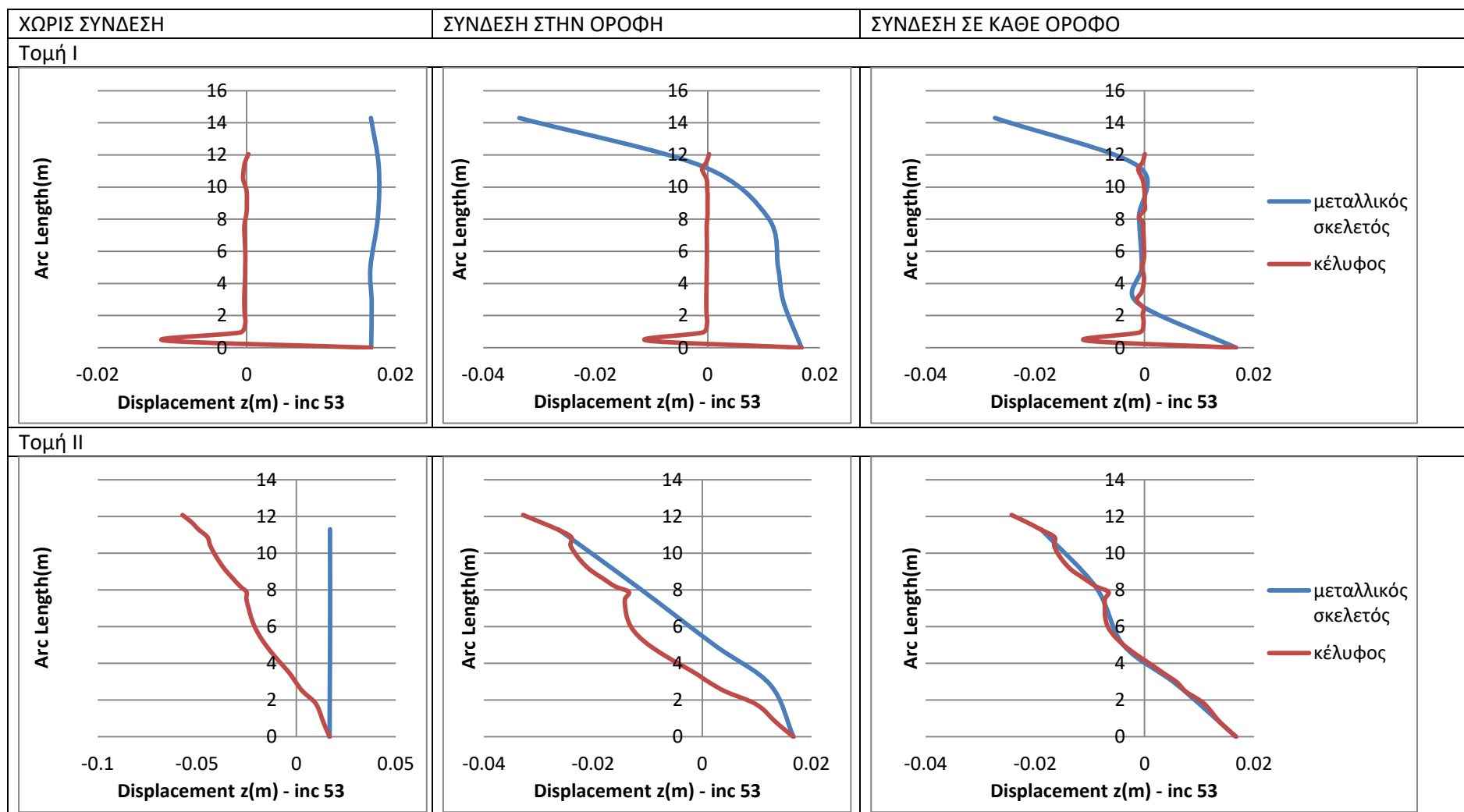


Πίνακας 17: Διαγράμματα μετατοπίσεων στον άξονα Y για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές

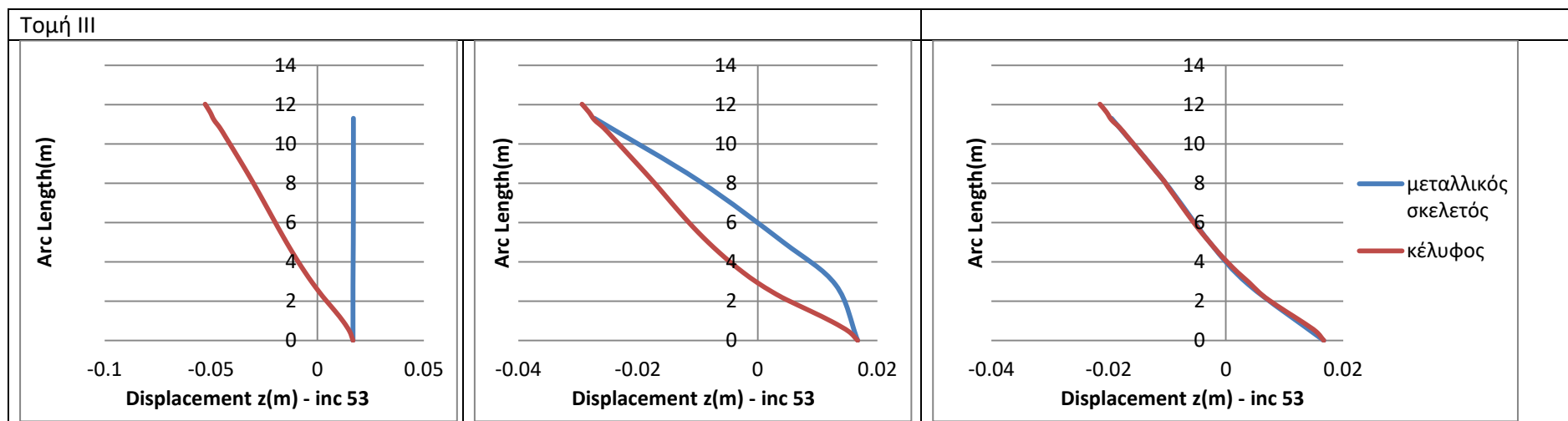




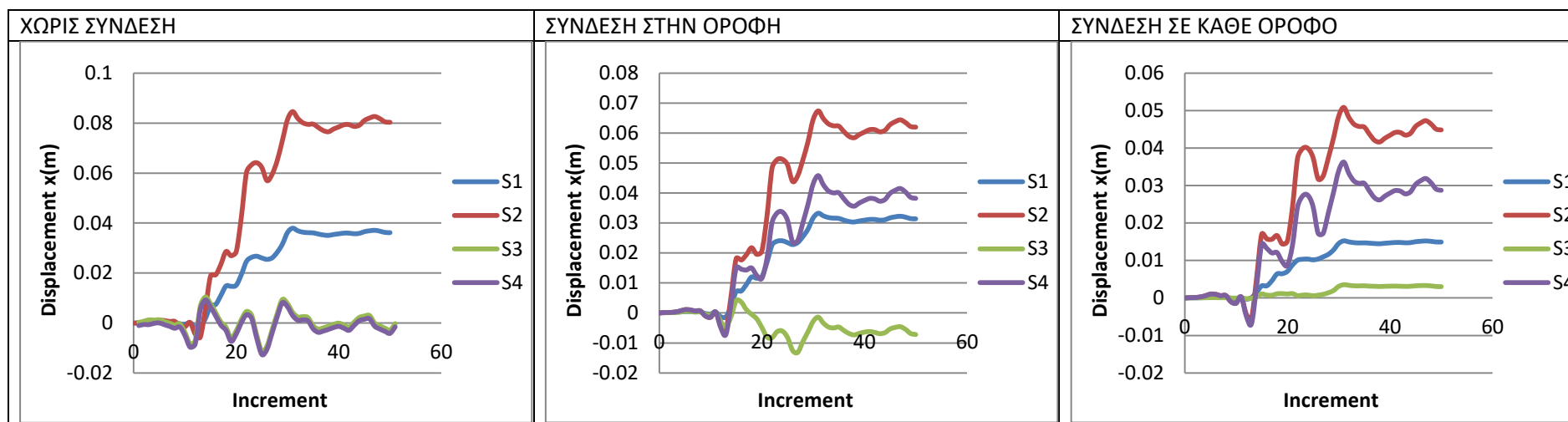
Πίνακας 18: Διαγράμματα μετατοπίσεων στον άξονα Z για τις τρεις προεπιλεγμένες τομές

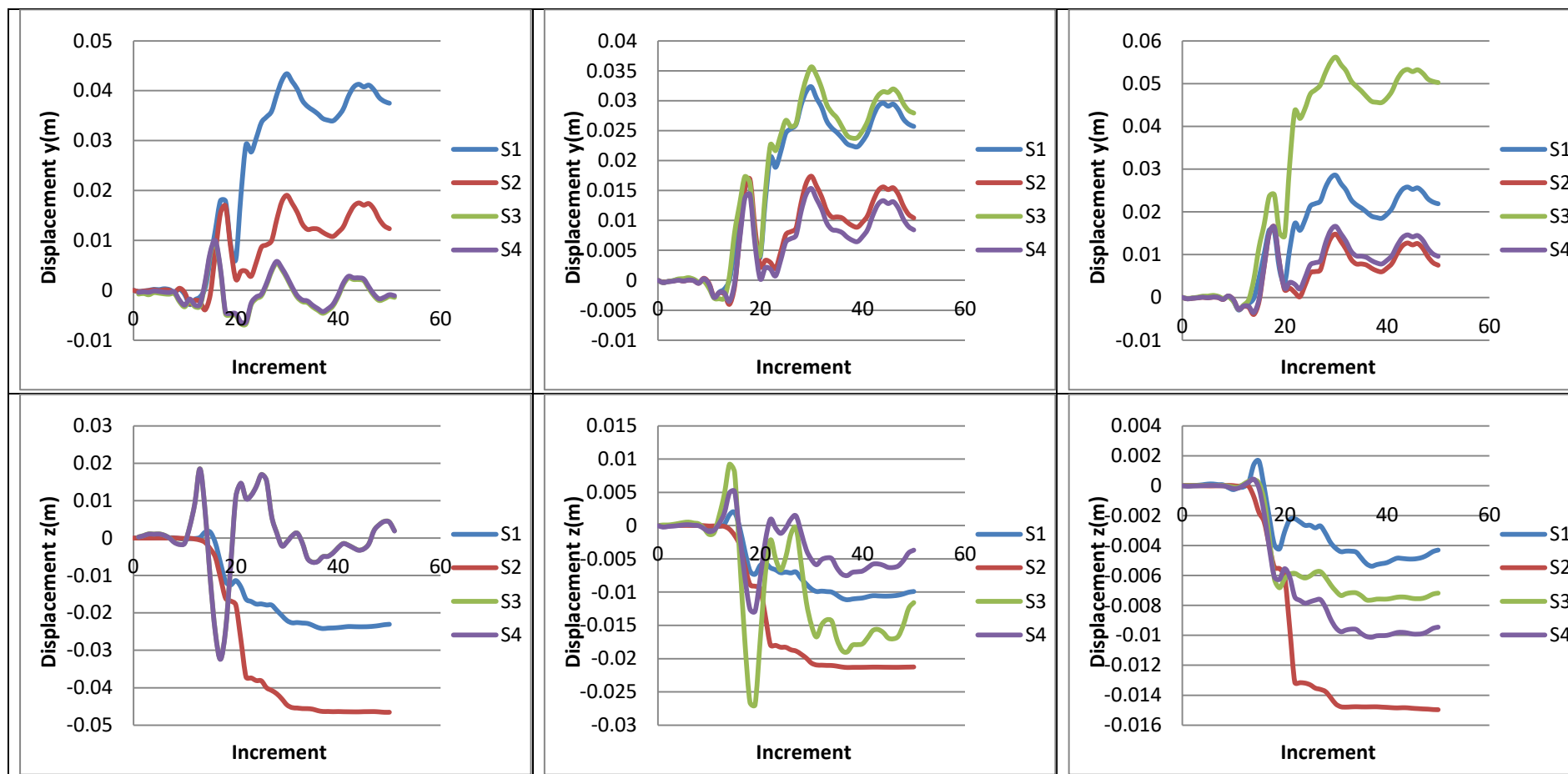




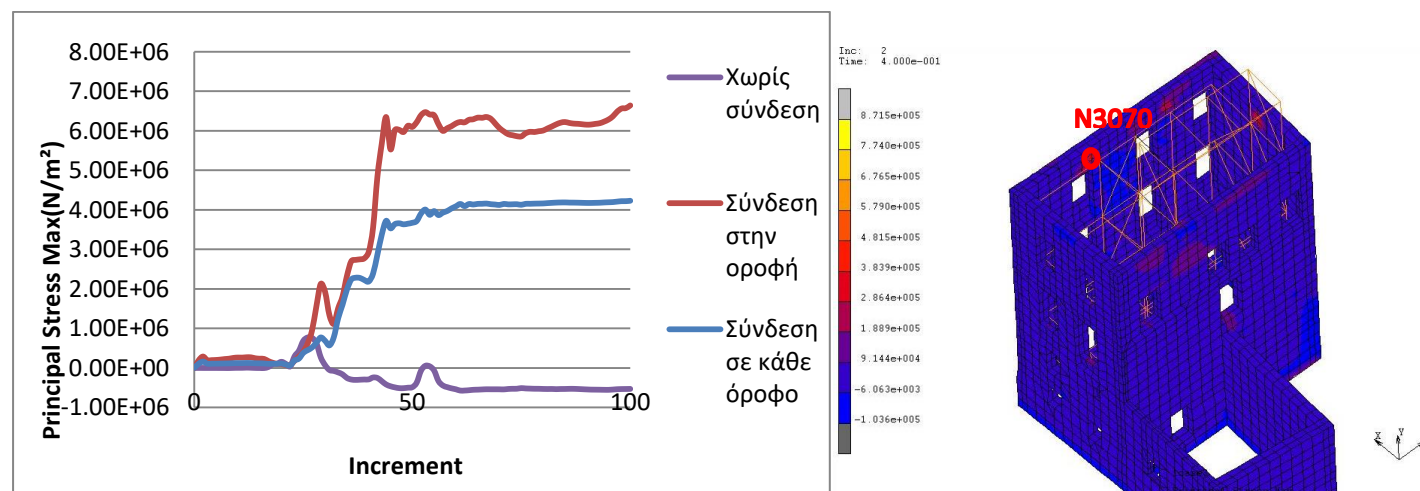
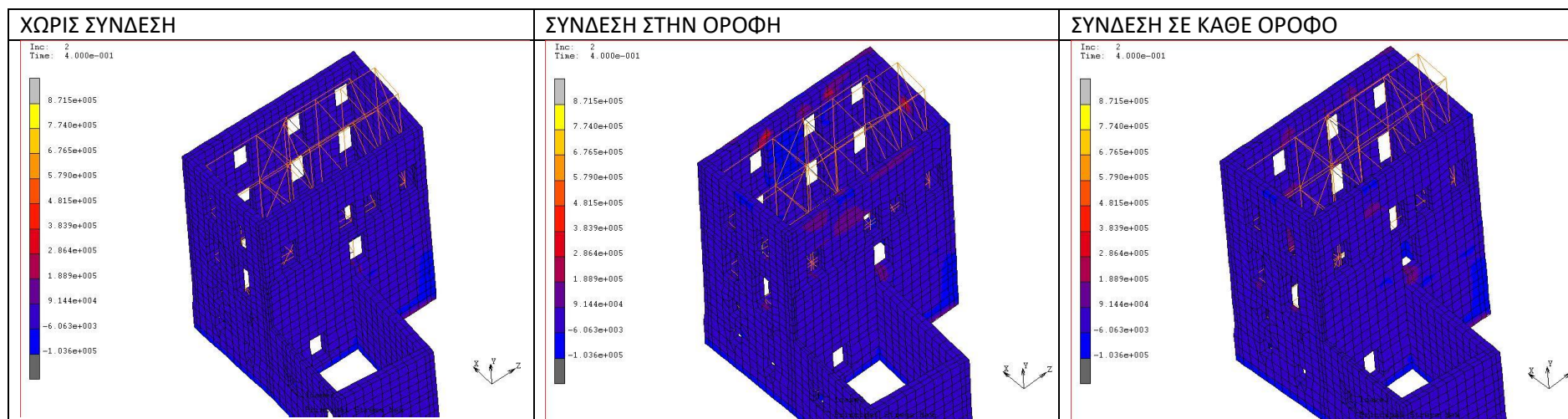


Πίνακας 19: Χρονοϊστορία μετατόπισης των κόμβων S1:9439, S2:12539 (κέλυφος) και S3:145, S4:97 (μεταλλικός σκελετός) στους τρεις κύριους άξονες για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης





Πίνακας 20: Μέγιστες κύριες τάσεις για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες σύνδεσης



Εικόνα 61: Χρονοϊστορία μέγιστων κύριων τάσεων του κόμβου 3070 για τις τρεις συνθήκες σύνδεσης

Από την παρατήρηση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι:

Με τη σύνδεση των δύο φορέων, ο μεταλλικός σκελετός, που παρουσίαζε την μικρότερη διέγερση, παρασύρεται από το κέλυφος, με αποτέλεσμα την αύξηση των μετατοπίσεων για τον μεταλλικό σκελετό και τη μείωση τους για το κέλυφος (Πίνακες 14,15,16,17,18).

Η μείωση των μετατοπίσεων για το κέλυφος κυμαίνεται στα 2-3cm για σύνδεση μόνο στην οροφή και σε 3-4cm για σύνδεση σε κάθε όροφο. Αντίστοιχα η αύξηση των μετατοπίσεων για τον μεταλλικό σκελετό κυμαίνεται από 0-6cm για σύνδεση μόνο στην οροφή και από 1-4cm για σύνδεση σε κάθε όροφο (Πίνακας 15).

Τόσο από τα χρωματικά διαγράμματα (Πίνακας 14) όσο και από τα διαγράμματα των τομών (Πίνακες 16,17,18), προκύπτει ότι η κίνηση των δύο φορέων στους τρεις κύριους άξονες παρουσιάζει την ίδια μορφή και για τις δύο περιπτώσεις σύνδεσης, που προσομοιάζει τη διέγερση του ασύνδετου κελύφους, με εύρος μετατοπίσεων που μειώνεται για το κέλυφος και αυξάνεται για τον μεταλλικό σκελετό. Ο μεταλλικός σκελετός λοιπόν συγκρατεί την τοιχοποιία μειώνοντας τις εκτός επιπέδου μετατοπίσεις. Αυτό αποτελεί προτέρημα της μεταλλικής κατασκευής – ελαφριάς κατασκευής, σε σύγκριση με έναν φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα ο οποίος πιθανότατα θα αύξανε τις εκτός επιπέδου μετατοπίσεις.

Από την παρατήρηση των ιστορικών μετατόπισης των τεσσάρων κόμβων (Πίνακας 19) (S1,S2 κόμβοι κελύφους και S3,S4 κόμβοι μεταλλικού σκελετού), προκύπτει επίσης ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές στη μορφή των ιστορικών συντελούνται για τους δύο κόμβους που ανήκουν στον μεταλλικό σκελετό, οι οποίοι ενώ για την περίπτωση της μη σύνδεσης παρουσίαζαν ιστορίες που συνέπιπταν, για τις άλλες δύο συνθήκες σύνδεσης, διαχωρίζονται και αυξάνουν το εύρος μετατόπισής τους.

Στο διάγραμμα κύριων τάσεων που εμφανίζεται παραπάνω παρουσιάζεται η ιστορία των μέγιστων κύριων τάσεων για τον κόμβο 3070 που ανήκει στο κέλυφος και αποτελεί κόμβο σύνδεσης της τοιχοποιίας με τον μεταλλικό σκελετό στην οροφή του κτιρίου (Πίνακας 20, Εικόνα 61). Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις ανέρχονται σε  $770 \text{ kN/m}^2$  για το ασύνδετο κέλυφος  $6641 \text{ kN/m}^2$  για σύνδεση των δύο φορέων στην οροφή και  $4229 \text{ kN/m}^2$  για σύνδεση των δύο φορέων σε κάθε όροφο. Οι τάσεις που εμφανίζονται για σύνδεση των δύο φορέων τοπικά, είναι πολύ αυξημένες γεγονός που καθιστά τη συνθήκη σύνδεση των δύο φορέων με τοπικούς συνδέσμους (rigid links) επίφοβη για την ακεραιότητα της τοιχοποιίας, μια σύνδεση με πλαίσιο θα πετύχαινε μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων και αποτελεί αντικείμενο για μελλοντική έρευνα.

## 8. Ενεργειακή αναβάθμιση παραδοσιακού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία

Η ενεργειακή αναβάθμιση ενός παραδοσιακού κτιρίου αποτελεί μια πρόκληση για την ομάδα επιστημόνων που θα την αναλάβει αλλά και μια σύγχρονη ανάγκη για μείωση των ενεργειακών αναγκών του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος στα αστικά κέντρα με ταυτόχρονη διατήρηση και ανάδειξη της ιστορικής κληρονομιάς κάθε τόπου. Όταν εκδόθηκε ο πρώτος Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive 2002/91/EC) υπήρχε ο φόβος ότι μια τέτοια επέμβαση θα αλλοίωνε τον χαρακτήρα των ιστορικών κτιρίων ή ακόμη θα τα κατέστρεφε. Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων δεν εξαιρεί τα ιστορικά κτίρια δίνει όμως τη δυνατότητα στα κράτη μέλη να εξαιρέσουν τα καταγεγραμμένα διατηρητέα κτίρια από κάποιες προδιαγραφές. Αυτό δεν πρέπει να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα ιστορικά κτίρια δεν επιδέχονται επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας.

Η συντήρηση και επανάχρηση των ιστορικών κτιρίων είναι ο πιο σίγουρος τρόπος διαφύλαξής τους και η ενεργειακή τους αναβάθμιση συμβάλλει στην προστασία των δομικών τους μελών, προσφέρει συνθήκες άνεσης για τους χρήστες και μειώνει τα λειτουργικά έξοδα του κτιρίου. Σήμερα η επιθυμία για αποκατάσταση και συντήρηση των ιστορικών κτιρίων συνδυάζεται με την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Δεν υπάρχουν ενδεδειγμένες λύσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση ενός ιστορικού κτιρίου, αλλά με τη σωστή προσέγγιση μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη λύση που θα ταιριάζει στις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε κτιρίου.

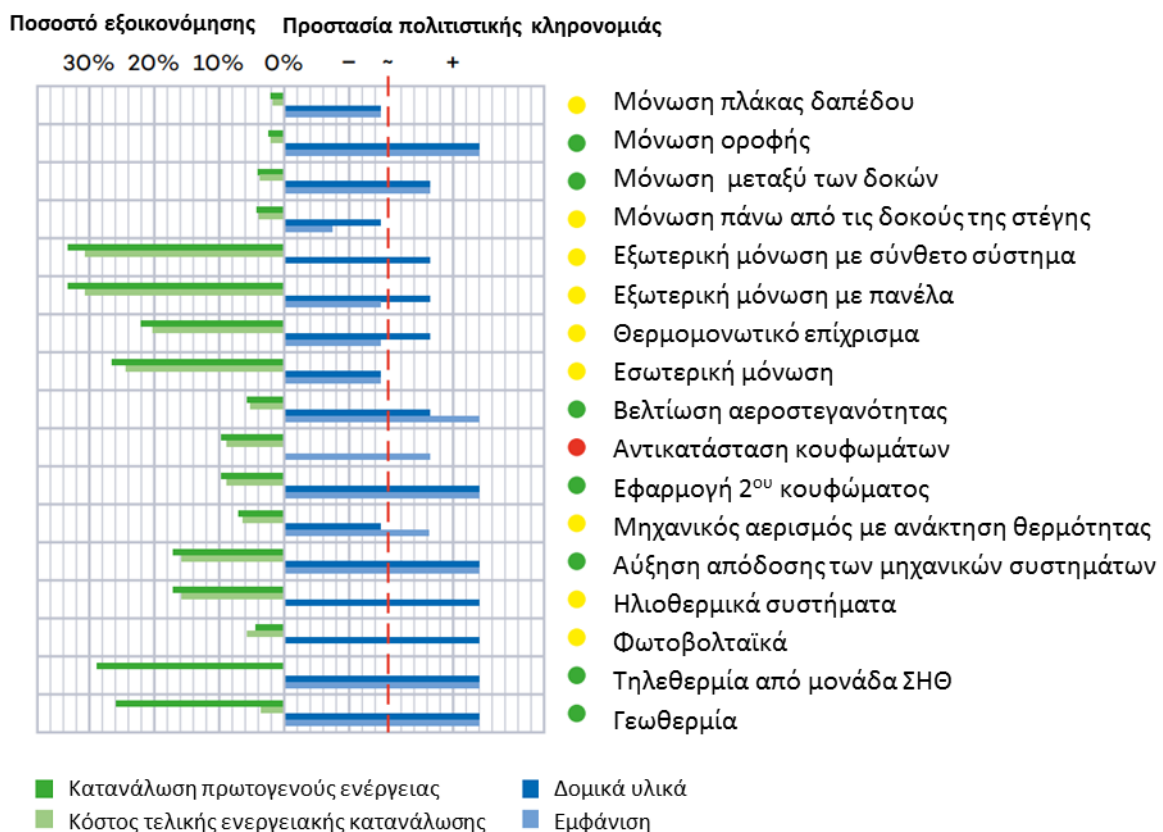
Τα περισσότερα ιστορικά κτίρια διαθέτουν τμήματα με μικρή ή και μηδενική αξία προστασίας, για παράδειγμα κτίρια με διακοσμημένες προσόψεις και απλές πίσω όψεις. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης στην πρόσοψη και εξωτερικής θερμομόνωσης με αντικατάσταση κουφωμάτων στην πίσω όψη του κτιρίου (Εικόνα 62). Η συντήρηση και αποκατάσταση ιστορικών κτιρίων είναι από τη φύση της ενεργειακά και περιβαλλοντικά ωφέλιμη. Με την αποκατάσταση και επανάχρηση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος αποφεύγουμε την κατασκευή νέων κτιρίων άρα και την χρήση επιπλέον ενέργειας και πρώτων υλών. Επίσης τα ιστορικά κτίρια είναι στο σύνολο τους φτιαγμένα από υψηλής ποιότητας ανθεκτική πρώτη ύλη που στη σύγχρονη εποχή είναι δύσκολο και ακριβό να βρεθεί.





Εικόνα 62: Ενεργειακή αναβάθμιση ιστορικού κτιρίου με εσωτερική θερμομόνωση στην πρόσοψη και εξωτερική στην πίσω όψη. Η ανάγκη για θέρμανση μπορεί να μειωθεί έως και 80% χωρίς να αλλοιωθούν τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του κτιρίου[39]

Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζονται οι δυνατότητες επέμβασης για την ενεργειακή αναβάθμιση ενός ιστορικού κτιρίου και η συμβατότητά τους με τις αρχές αποκατάστασης και προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς (Εικόνα 63)[39].



Εικόνα 63: Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και συμβατότητα με τις αρχές προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς[39]

## 8.1 Εσωτερική θερμομόνωση

Η εφαρμογή συστήματος θερμομόνωσης σε μια τοιχοποιία, είτε αυτή γίνει εξωτερικά είτε εσωτερικά, προσφέρει μια σειρά θετικών αποτελεσμάτων όπως εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>, πρόληψη ανάπτυξης μούχλας από συμπύκνωση υδρατμών σε κρύες επιφάνειες, βελτίωση της θερμικής άνεσης και αύξηση της αξίας της ιδιοκτησίας. Παρά το γεγονός ότι η εξωτερική θερμομόνωση είναι συνήθως η προτεινόμενη λύση, υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες η εσωτερική θερμομόνωση είναι δικαιολογημένη και ενδεδειγμένη, όπως:

- Ιστορικά κτίρια όπου η πρόσοψη είναι διατηρητέα ή αντίστοιχα όταν τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης πρέπει να διατηρηθούν (εμφανής οπτοπλινθοδομή, ξύλινος φέρων σκελετός, ξύλινη πρόσοψη)
- Περιορισμένα όρια εξαιτίας των γειτονικών κτιρίων ή άλλων πολεοδομικών περιορισμών
- Η κρέμαση της στέγης δεν επαρκεί για την εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης
- Πολυκατοικίες με πολλούς ιδιοκτήτες όπου δεν συμφωνούν όλοι για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου
- Χώροι που χρησιμοποιούνται εποχιακά

## 8.2 Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών

Ένας τρόπος ταξινόμησης των μονωτικών υλικών είναι με βάση τη χημική σύνθεση των συστατικών τους. Επομένως, διακρίνονται τέσσερις βασικές κατηγορίες θερμομονωτικών υλικών τα οργανικά, τα ανόργανα, τα σύνθετα, που περιέχουν τόσο οργανικές όσο και ανόργανες ενώσεις, και τα υλικά νέας τεχνολογίας.

Λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη ύλη των χρησιμοποιούμενων υλικών για την παραγωγή μονωτικών υλικών τα θερμομονωτικά υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες:

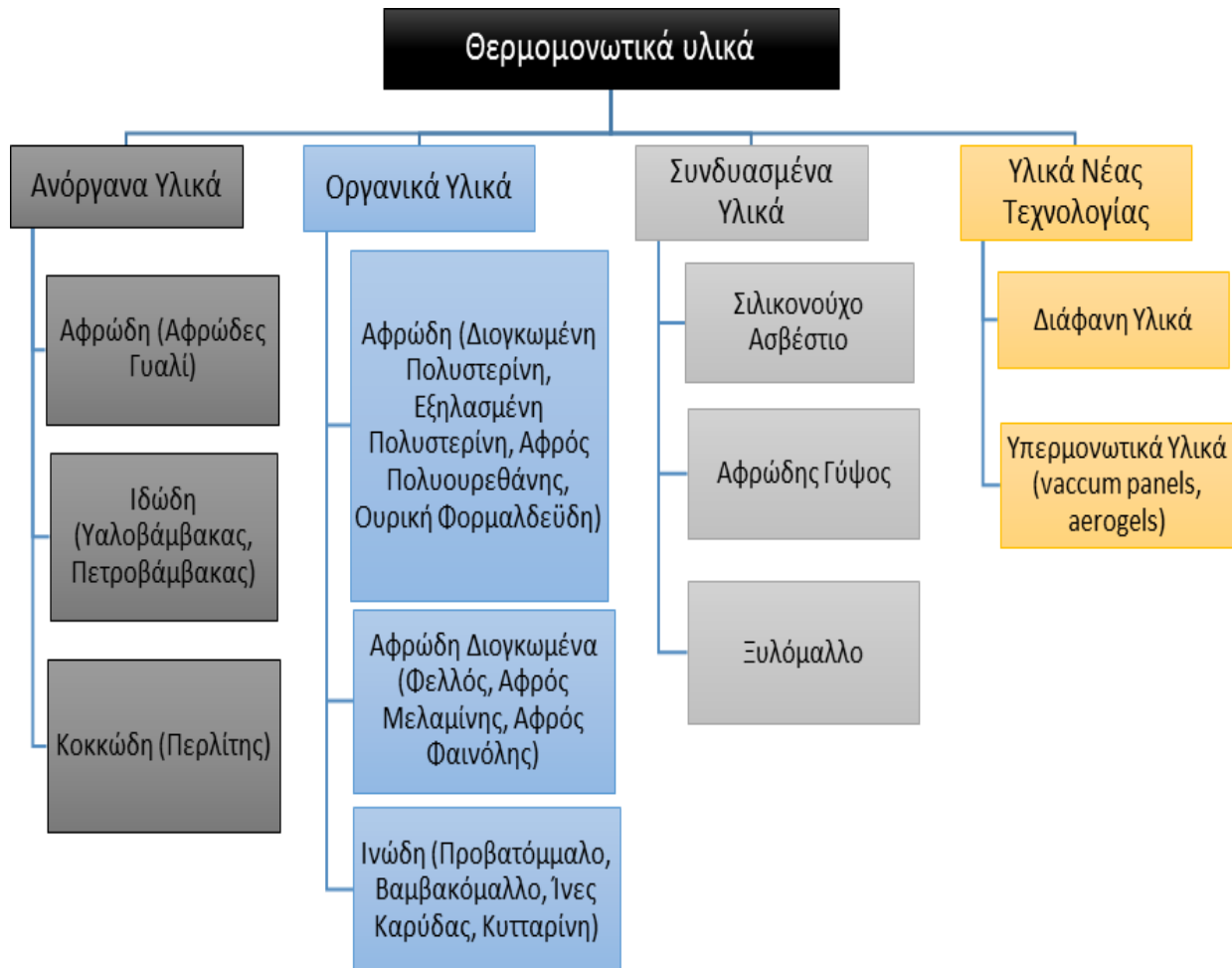
1. Ορυκτά υλικά, όπως η άμμος, ο βασάλτης, ο βωξίτης, ο δολομίτης και το γυαλί (καινούριο ή ανακυκλωμένο).
2. Πετροχημικές πρώτες ύλες όπως το στυρόλιο, η ουρεθάνη και η φορμαλδεΐδη.
3. Οργανικά φυσικά υλικά, όπως ο φελλός, το ξύλο, οι φυτικές ίνες, η κυτταρίνη, το μαλλί.

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης μπορεί να γίνει με βάση τη δομή των υλικών. Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται δυο κατηγορίες:

- τα αφρώδη, στα οποία ο αέρας υπάρχει μέσα τους με μορφή φυσαλίδων και
- τα ινώδη, στα οποία ο αέρας περιέχεται ανάμεσα στις ίνες τους, όπως ακριβώς συμβαίνει σε ένα μάλλινο ύφασμα.

Στην Εικόνα 64 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των γνωστότερων θερμομονωτικών υλικών.

Τέλος, αναφορικά με την παραγωγή των θερμομονωτικών υλικών, πέραν των πρώτων υλών, χρησιμοποιείται και μία σειρά από βοηθητικές ύλες, ως συνδετικά και ενισχυτικά μέσα για τη δημιουργία των κυψελωτών δομών, αλλά και την επίτευξη των υπολοίπων, πέραν της θερμομόνωσης, επιθυμητών ιδιοτήτων.



Εικόνα 64: Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών[40]

Πίνακας 21: Υλικά θερμομόνωσης[41]

Αφρώδες γυαλί		Ίνες καρύδας	
Πετροβάμβακας		Κυτταρίνη	
Υαλοβάμβακας		Ξυλόμαλλο	
Διογκωμένος περλίτης		Αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη	
Διογκωμένος φελλός		Διογκωμένη πολυστερίνη	
Μαλλί προβάτου		Άκαμπτος αφρός πολυουρεθάνης	
Βαμβακόμαλλο		Vacuum panel	

### 8.3 Ιδιότητες Θερμομονωτικών Υλικών

Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των θερμομονωτικών υλικών καθώς και τον καθορισμό των πρακτικών που πρέπει να εφαρμόζονται με στόχο την πλήρη απόδοση τους, απαραίτητη είναι η κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Οι ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

- τις φυσικές, που περιγράφουν τη συμπεριφορά του υλικού υπό ορισμένες συνθήκες και
- τις περιβαλλοντικές, που περιγράφουν τον οικολογικό χαρακτήρα του υλικού.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού καταδεικνύουν τη συμπεριφορά του υλικού ως προς τους τρόπους μετάδοσης της θερμότητας και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού. Ακολουθεί παρουσίαση των πιο σημαντικών φυσικών ιδιοτήτων:

1. **Πυκνότητα:** Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής και τις απαιτήσεις τελικής χρήσης, κάθε υλικό παράγεται για ένα εύρος πυκνοτήτων. Η πυκνότητα του υλικού επηρεάζει την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ .
2. **Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ :** Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  ορίζει την ποσότητα της ροής θερμότητας, που διέρχεται από τη μονάδα επιφάνειας ενός υλικού, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο απέναντι επιφανειών του είναι ίση με τη μονάδα. Η τιμή  $\lambda$  που χαρακτηρίζει το θερμομονωτικό υλικό υπολογίζεται με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο παραγωγής του (π.χ. Εξηλασμένη Πολυστερίνη EN13164. Πετροβάμβακας EN 13162, Διογκωμένη Πολυστερίνη EN 13163 κλπ.).

Επιπλέον, στον Πίνακα 2 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2 περί «θερμοφυσικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών και έλεγχο της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων» που συνοδεύει τον Κ.Εν.Α.Κ. δίδονται οι τιμές των περισσότερων και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών. Αυτές οι τιμές είναι ενδεικτικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αυτές είτε εκείνες που αναγράφονται σε προϊόντα με πιστοποίηση κατά CE.

3. **Αντοχή στην επίδραση της υγρασίας:** Η υγρασία αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζει άμεσα το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Υλικά που έχουν εμποτισθεί με υγρασία μειώνουν ή ακόμη και χάνουν τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες οδηγώντας παράλληλα στην αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας. Όταν ένα υλικό εμποτισθεί από υγρασία τότε το νερό που εισέρχεται, εκτοπίζει τον αέρα των ινών ή των πόρων και καταλαμβάνει τη θέση του. Δεδομένου δε ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού ( $\lambda = 0,60 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ), είναι περίπου 24 φορές μεγαλύτερος αυτού του αέρα (ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα στους  $20^\circ\text{C}$  είναι ίσος με  $\lambda = 0,025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ), αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα του εμποτισμένου υλικού.

Η αντοχή στην επίδραση της υγρασίας εκφράζεται με δύο μεγέθη, τον συντελεστή αντίστασης στη διάχυση υδρατμών και την ποσότητα υγρασίας εξομείωσης.

- ✓ **Συντελεστής αντίστασης στη διάχυση υδρατμών ( $\mu$ ):** Ο συντελεστής αυτός δηλώνει πόσο μεγαλύτερη αντίσταση στη διάχυση υδρατμών παρουσιάζει το υλικό από ένα στρώμα αέρα ίδιου πάχους και στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Η φυσική σημασία του συντελεστή, ο οποίος πρακτικά θεωρείται ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία και την πίεση, είναι η δυσκολία με την οποία οι διαχεόμενοι υδρατμοί διαπερνούν το θερμομονωτικό υλικό. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο



δυσκολότερα οι υδρατμοί διέρχονται μέσω της μάζας του. Ο συντελεστής αντίστασης διάχυσης υδρατμών υπολογίζεται βάσει του προτύπου EN 12086.

- **Ποσότητα υγρασίας εξομοίωσης:** Τα θερμομονωτικά υλικά μπορούν να απορροφήσουν νερό είτε σε υγρή μορφή είτε σε μορφή υδρατμών. Η ποσότητα της απορροφούμενης υγρασίας, που εξαρτάται από το πορώδες του υλικού, την υδρατμοστεγανότητα και την κατανομή των τριχοειδών αγγείων στη μάζα του, προκαλεί αισθητή αλλαγή στις ιδιότητες του υλικού και κυρίως του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ. Για την περιγραφή των ανωτέρω, ορίζεται η τιμή της ποσότητας υγρασίας εξομοίωσης, η οποία εκφράζει το ποσό της υγρασίας που απορροφήθηκε στο υλικό υπό ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και σχετικής υγρασίας. Υπάρχουν 2 μέθοδοι υπολογισμού της ποσότητας υγρασίας εξομοίωσης. Η πρώτη περιγράφεται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 12087 (αναφέρεται στην απορρόφηση ύδατος) και EN 1609 (αναφέρεται στην απορρόφηση ύδατος-μερική βύθιση) και υπολογίζει την ποσότητα υγρασίας με οριζόντια εμβάπτιση υλικού, ενώ η δεύτερη περιγράφεται στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12088, όπου υπολογίζεται η ποσότητα υγρασίας με διάχυση[42].

### **Το φαινόμενο της διάχυσης των υδρατμών**

Το φαινόμενο της διάχυσης των υδρατμών εμφανίζεται στην περίπτωση που εκατέρωθεν ενός υδρατμοπερατού δομικού στοιχείου εμφανιστούν διαφορετικές συγκεντρώσεις μορίων υδρατμού. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται μια τάση εξίσωσης με ροή μορίων υδρατμού προς την πλευρά της μικρότερης συγκέντρωσης. Σε χώρους με την ίδια θερμοκρασία η ροή των υδρατμών κατευθύνεται προς την περιοχή της χαμηλής πίεσης υδρατμών, ενώ σε χώρους με την ίδια σχετική υγρασία, η ροή των υδρατμών κατευθύνεται προς την ψυχρότερη περιοχή. Η ροή οφείλεται στις διαφορές πίεσης των υδρατμών και τείνει να τις εξισορροπήσει. Το φαινόμενο της διάχυσης των υδρατμών και η ροή θερμοκρασίας λόγω πτώσης θερμότητας εμφανίζουν διαφορές, καθώς οι υδρατμοί κινούνται με πολύ μικρές ταχύτητες σε σχέση με τη ροή θερμότητας.

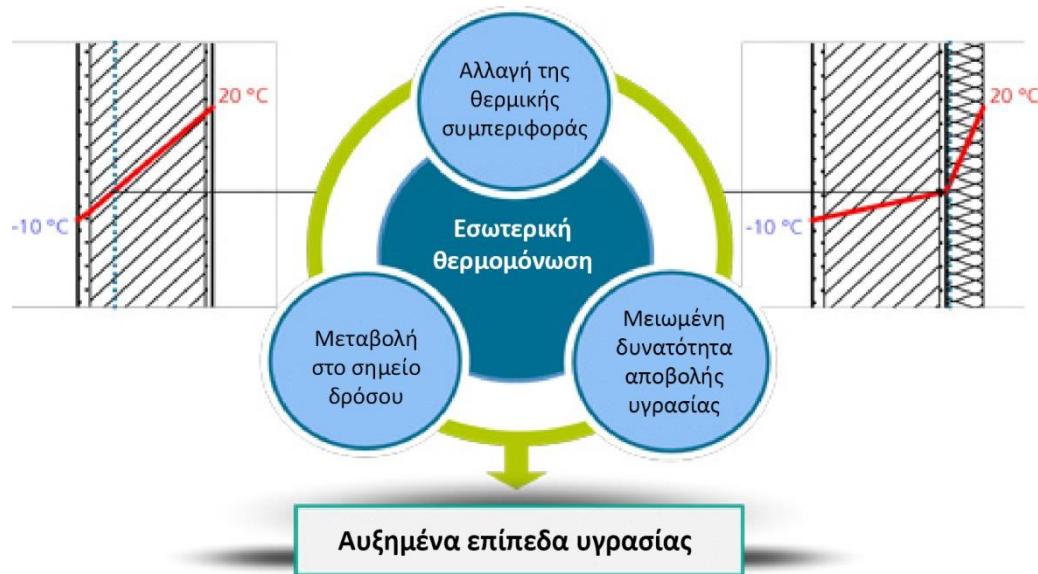
Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της διάχυσης των υδρατμών και με την πτωτική πορεία της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου, όταν η μερική πίεση φτάσει το σημείο κορεσμού τότε ένα μέρος των υδρατμών συμπυκνώνεται, σχηματίζοντας την υγρασία εσωτερικής συμπύκνωσης. Όταν παρεμποδιστεί η διαδικασία απομάκρυνσης των συμπυκνωμένων υδρατμών, η υγρασία συσσωρεύεται στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου, προσβάλλει τα υλικά και καταστρέφει την κατασκευή.

### **Σχηματισμός δρόσου**

Το φαινόμενο της εσωτερική συμπύκνωσης δεν πρέπει να συγχέεται με το σχηματισμό δρόσου, την επιφανειακή συμπύκνωση. Η εσωτερική συμπύκνωση οφείλεται στην υγροποίηση των διαχεόμενων υδρατμών στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, όταν η θερμοκρασία πέφτει στο σημείο κορεσμού. Η επιφανειακή συμπύκνωση οφείλεται στον κορεσμό των υδρατμών της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου, όταν η επιφανειακή θερμοκρασία του δομικού στοιχείου είναι μικρότερη της οριακής θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (θερμοκρασία δρόσου)[43].

## 8.4 Επίδραση της υγρασίας στην εσωτερική θερμομόνωση

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η εσωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας ως η εναλλακτική λύση που μπορεί να προσφέρει αύξηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου με παράλληλη διατήρηση της εξωτερικής πρωταρχικής του όψης. Τα συστήματα εσωτερικής θερμομόνωσης απαιτούν την ενσωμάτωση συστήματος διαχείρισης της υγρασίας από τη φάση σχεδιασμού και προσεκτικό σχεδιασμό λεπτομερειών όπως σύνδεση με ανοίγματα και εσωτερικούς τοίχους (Εικόνα 65).



Εικόνα 65: Επίδραση της εσωτερικής θερμομόνωσης στην συγκέντρωση υγρασίας στην τοιχοποιία[44]

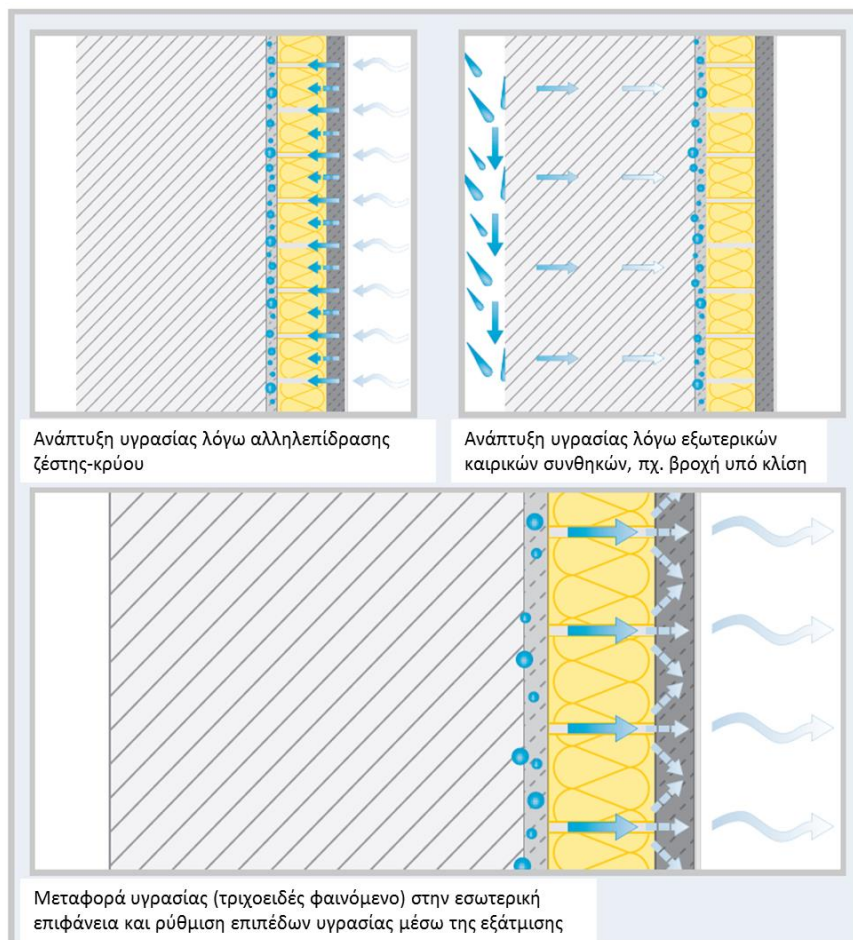
Με την εφαρμογή της εσωτερικής θερμομόνωσης η υφιστάμενη τοιχοποιία θα γίνει πιο κρύα με αποτέλεσμα μείωση της δυνατότητας της να αποβάλλει υγρασία και κίνδυνο συμπύκνωσης υδρατμών ειδικά στην εσωτερική πλευρά του τοίχου. Για το λόγο αυτό η ρύθμιση της υγρασίας αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα στην εφαρμογή συστημάτων εσωτερικής θερμομόνωσης. Υπάρχουν δύο τρόποι διαχείρισης της υγρασίας και αποφυγής της συμπύκνωσης υδρατμών στη διατομή του τοίχου:

- Συστήματα μη διαπερατά σε υδρατμούς με τοποθέτηση φράγματος υδρατμών και
- Συστήματα υδρατμοπερατά με ενεργή τριχοειδή δομή για ευρύτερη διάχυση των υδρατμών και γρηγορότερο στέγνωμα.

Τα συστήματα μη διαπερατά από υδρατμούς εμποδίζουν την είσοδο των υδρατμών από το εσωτερικό του κτιρίου στην τοιχοποιία με χρήση μεμβράνης επιβράδυνσης διάχυσης υδρατμών, φράγματος υδρατμών ή πυκνό εσωτερικό σοβά. Με αυτό τον τρόπο η τοιχοποιία προστατεύεται από την εσωτερική υγρασία αλλά ταυτόχρονα δεν μπορεί να αποδώσει υγρασία στο εσωτερικό του κτιρίου. Οπότε αν η τοιχοποιία εγκλωβίσει υγρασία από εξωγενείς παράγοντες, όπως η βροχή υπό κλίση, αυτή δεν μπορεί να διοχετευτεί στο εσωτερικό του κτιρίου. Επίσης υπάρχει πρακτική δυσκολία να επιτευχθεί σχεδιαστικά και κατασκευαστικά η απαραίτητη ποιότητα συνδέσεων για τη δημιουργία μη διαπερατού στρώματος.

Τα συστήματα επιβράδυνσης της διάχυσης των υδρατμών παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Μειώνουν το ρυθμό διάχυσης των υδρατμών από το εσωτερικό στο εξωτερικό περιβάλλον, αλλά ταυτόχρονα επιτρέπουν σε κάποιο βαθμό την εκτόνωση της υγρασίας και το στέγνωμα της τοιχοποιίας προς το εσωτερικό του κτιρίου.

Τα διαπερατά συστήματα με τριχοειδή δομή επιτρέπουν τη διάχυση των υδρατμών στην τοιχοποιία, ρυθμίζουν την απορρέουσα υγρασία και την αποβάλλουν πάλι μέσα στο χώρο (Εικόνα 66). Η τριχοειδής δομή επιτρέπει τη γρήγορη και πλατιά διασπορά της υγρασίας στη στρώση της μόνωσης επιταχύνοντας τη διαδικασία ξήρανσης και ενισχύοντας τη μονωτική δράση. Κρίσιμος παράγοντας για τη σωστή λειτουργία και την απόδοση της εσωτερικής θερμομόνωσης είναι η ρύθμιση της υγρασίας και η μεταφορά της σε υγρή και αέρια μορφή.



Εικόνα 66: Σύστημα εσωτερικής θερμομόνωσης διαπερατό σε υδρατμούς[45]

Τα διαπερατά συστήματα μόνωσης προσφέρουν βελτιωμένη θερμομονωτική αξία, ρύθμιση των επιπέδων υγρασίας, ενσωμάτωση πυροπροστασίας, ιδιότητες ηχομόνωσης και ευκολία στην εφαρμογή. Αντίθετα τα μη διαπερατά σε υδρατμούς συστήματα παρουσιάζουν μειωμένη ανθεκτικότητα[44].

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος εσωτερικής θερμομόνωσης ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αποφυγή θερμογεφυρών. Τα συνήθη σημεία εμφάνισης θερμογεφυρών είναι στη σύνδεση της τοιχοποιίας με τα ανοίγματα, όπου η μόνωση πρέπει να συνεχίζεται μέχρι να συναντήσει το κούφωμα και σε σημεία αλλαγής της γεωμετρίας, όπως γωνίες, εσωτερικά

χωρίσματα και οροφές, όπου μπορεί να εφαρμοστεί μόνωση σφηνοειδούς μορφής, κονίαμα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας ή μεταλλικά φύλλα ώστε να λυθεί το πρόβλημα της απότομης πτώσης της επιφανειακής θερμοκρασίας[39].

## 8.5 Σενάρια εσωτερικής θερμομόνωσης

Για την ενεργειακή αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιρίου προτείνεται η εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης προκειμένου ο συντελεστής θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας να ικανοποιεί τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές που δίνονται από τον ΚΕΝΑΚ για την κλιματική ζώνη Α στην οποία ανήκει το υπό μελέτη κτίριο (Πίνακας 22). Ο συντελεστής θερμοπερατότητας (U) προσδιορίζει τις θερμικές απώλειες μέσω ενός δομικού στοιχείου, δίνει δηλαδή την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου σε σταθερό θερμοκρασιακό πεδίο μέσω της μοναδιαίας επιφάνειας ενός δομικού στοιχείου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στις δύο όψεις του δομικού στοιχείου ισούται με τη μονάδα[46].

**Πίνακας 22: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα[47]**

Δομικό στοιχείο	Σύμβολο	Συντελεστής θερμοπερατότητας [W/(m <sup>2</sup> K)]			
		Κλιματική ζώνη			
		Α	Β	Γ	Δ
Εξωτερική οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφές)	U <sub>V,D</sub>	0.50	0.45	0.40	0.35
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	U <sub>V,W</sub>	0.60	0.50	0.45	0.40
Δάπεδα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (πυλότη)	U <sub>V,DL</sub>	0.50	0.45	0.40	0.35
Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος ή με κλειστούς μη θερμαινόμενους χώρους	U <sub>V,G</sub>	1.20	0.90	0.75	0.70
Τοίχοι σε επαφή με το έδαφος ή με μη θερμαινόμενους χώρους	U <sub>V,WE</sub>	1.50	1.00	0.80	0.70
Ανοίγματα (παράθυρα, μπαλκονόπορτες κ.α.)	U <sub>V,F</sub>	3.20	3.00	2.80	2.60
Γυάλινες προσόψεις κτιρίων μη ανοιγόμενες και μερικώς ανοιγόμενες	U <sub>V,GF</sub>	2.20	2.00	1.80	1.80

Εκτός από τις θερμικές ιδιότητες του προτεινόμενου συστήματος εσωτερικής θερμομόνωσης σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του αποτελεί η συμβατότητα του με το υφιστάμενο υπόστρωμα καθώς και η υγραυροθερμική του συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό ακολουθεί μια αναφορά σε υλικά και διατάξεις που έχουν χρησιμοποιηθεί και καταγραφεί από την υπάρχουσα βιβλιογραφία καθώς επίσης και χρήσιμα συμπεράσματα αυτών των μελετών.

Ανεξάρτητα από τα υλικά μόνωσης που θα χρησιμοποιηθούν, η εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης θα επηρεάσει την υγραυροθερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας, οδηγώντας σε υψηλότερα ποσοστά υγρασίας, καθώς το στέγνωμα της τοιχοποιίας εμποδίζεται από την εσωτερική

θερμομόνωση. Σε αντίθεση με την επιβολή εξωτερικής θερμομόνωσης, η εσωτερική θερμομόνωση δεν προστατεύει την τοιχοποιία από τη βροχή. Οπότε δεν είναι μόνο η υγρασία από το εσωτερικό περιβάλλον που επιβαρύνει την εσωτερική θερμομόνωση αλλά και η βροχή υπό γωνία που απορροφάται από την τοιχοποιία μέσω της τριχοειδούς αναρρόφησης.

Μια συμβατική λύση για την εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης είναι η εφαρμογή ορυκτοβάμβακα και φράγματος υδρατμών (πχ φιλμ πολυαιθυλενίου) μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης, ώστε η υφιστάμενη τοιχοποιία και η θερμομόνωση να προστατεύονται από τους υδρατμούς του εσωτερικού περιβάλλοντος. Ο κίνδυνος αυτής της λύσης είναι ότι δεν θα επιτευχθεί καλή συναρμογή μεταξύ του φράγματος υδρατμών, της τοιχοποιίας και του στρώματος μόνωσης ή πως η συναρμογή θα καταστραφεί στην πορεία από μηχανικά αίτια. Ένας επιπλέον κίνδυνος αυτής της λύσης είναι ότι η υγρασία που θα απορροφηθεί από το εξωτερικό περιβάλλον θα συσσωρευθεί στην υφιστάμενη τοιχοποιία πίσω από το φράγμα υδρατμών χωρίς δυνατότητα εκτόνωσης προς το εσωτερικό της τοιχοποιίας.

Στη μελέτη των SP Bjarlov et al. εξετάστηκε η εφαρμογή τριών εναλλακτικών συστημάτων μόνωσης:

- πλάκα πυριτικού ασβεστίου ( $\lambda=0.057\text{W/mK}$ ),
- πορομπετόν ( $\lambda=0.04\text{W/mK}$ ) και
- σύστημα εσωτερικής θερμομόνωσης πολυουρεθάνης με ενεργή τριχοειδή δομή πυριτικού ασβεστίου (IQ-Therm- $\lambda=0.031\text{W/mK}$ ).

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν ελέχθηκαν σε μονοδιάστατη αριθμητική προσομοίωση με το πρόγραμμα WUFI. Το σύστημα εσωτερικής θερμομόνωσης εφαρμόστηκε σε ιστορικό κτίριο της Κοπεγχάγης του 1825, σε τοιχοποιία από συμπαγές τούβλο πάχους 228mm με εσωτερικό επίχρισμα από ασβεστοκονίαμα και ανεπίχριστη εξωτερική όψη. Οι μεταβολές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στον εξωτερικό τοίχο παρατηρήθηκαν για μεταβολή του πάχους μόνωσης (30-100mm) και με ή χωρίς προστασία ενάντια στην βροχή υπό γωνία με εμποτισμό της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας με σιλοξάνη.

Τα συστήματα εσωτερικής θερμομόνωσης εφαρμόστηκαν στην τοιχοποιία με ειδική κόλλα που προσφέρει πλήρη επαφή μεταξύ τοιχοποιίας και μόνωσης για την λειτουργία του τριχοειδούς φαινομένου μεταφοράς της υγρασίας.

Ο κίνδυνος για την ανάπτυξη μούχλας εμφανίζεται για σχετική υγρασία μεγαλύτερη του 80% και θερμοκρασία μεγαλύτερη από 0°C. Όταν η σχετική υγρασία υπερβαίνει το 95% υπάρχει επίσης κίνδυνος αποσάθρωσης, συμπύκνωσης υδρατμών και ανάπτυξης άλγεων. Κριτήρια για την επιλογή των υλικών μόνωσης αποτελούν η ελαχιστοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας, η μεγιστοποίηση της επιφανειακής θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας καθώς και η ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας και του συντελεστή θερμοπερατότητας U-value. Από τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν αυτά που δεν παρουσίασαν κίνδυνο δημιουργίας μούχλας στην διεπιφάνεια τοιχοποιίας – μόνωσης είναι η μόνωση πλάκας πυριτικού ασβεστίου και η μόνωση με σύστημα IQ-Therm και στις δύο περιπτώσεις υπό την προϋπόθεση εμποτισμού της εξωτερικής επιφάνειας για προστασία από τη βροχή υπό γωνία. Η προσθήκη της εσωτερικής θερμομόνωσης προσέφερε αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας από 9.2°C σε 18.7°C για το σενάριο της βέλτιστης θερμομόνωσης IQ-Therm - 50mm. Για το βέλτιστο σενάριο επίσης η σχετική υγρασία μειώθηκε από το 100% σε 62%. Επιπρόσθετα, η



εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης οδήγησε σε σημαντική μείωση των απωλειών θερμότητας της τάξης του 45-85.5%. Συγκρίνοντας την μόνωση 50mm πλάκας πυριτικού ασβεστίου με την αντίστοιχη ισοπαχή μόνωση IQ-Therm εντοπίστηκαν πολύ μικρές διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα η IQ-Therm προσέφερε 6% λιγότερες θερμικές απώλειες και υψηλότερη επιφανειακή θερμοκρασία κατά 0.7°C με τα ίδια επίπεδα σχετικής υγρασίας[48].

Στη μελέτη των Paul Wegerer et al. εξετάστηκε η υγραυτική συμπεριφορά 4 διατομών κατασκευασμένων με πλάκες από ίνες ξύλου (Pavadentro-60mm) και κολλημένων στην τοιχοποιία είτε με κονίαμα αργίλου (Claytec-12mm) είτε με τη χρήση εύκαμπτης στρώσης από ίνες ξύλου (Pavaflex-30mm) (Εικόνα 67). Ως τελικό επίχρισμα χρησιμοποιήθηκε πλάκα ξυλόμαλλου (Heraklith M-8mm), γυψοσανίδα (Farmacell Greenline-12.5mm) ή κονίαμα αργίλου (Claytec-3mm).

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζουν υψηλή θερμική μάζα για να αντισταθμίσουν την αποσύνδεση της θερμικής μάζας της τοιχοποιίας από το εσωτερικό του κτιρίου με την εφαρμογή της εσωτερικής θερμομόνωσης.



Εικόνα 67: Εφαρμογή του συστήματος εσωτερικής θερμομόνωσης με χρήση εύκαμπτης στρώσης από ίνες ξύλου, ώστε να αποφευχθεί - εν ξηρώ - η ύπαρξη κενών μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης χωρίς να χρειάζεται εξομάλυνση της επιφάνειας εφαρμογής[49]

Από τα αποτελέσματα της μελέτης προκύπτει ότι τα επίπεδα σχετικής υγρασίας πίσω από την εσωτερική θερμομόνωση, όπου είχε τοποθετηθεί κονίαμα αργίλου, σταθεροποιήθηκαν εντός επτά μηνών μετά την εφαρμογή, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η σχετική υγρασία στο δωμάτιο ήταν διαρκώς κάτω από 40%. Η μακρά διάρκεια στεγνώματος του αργιλικού κονιάματος αυξάνει τον κίνδυνο προσωρινής ανάπτυξης μούχλας. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας του στεγνώματος ο κίνδυνος ανάπτυξης μούχλας είναι πολύ χαμηλός καθώς το αργιλικό κονίαμα παρουσιάζει χαμηλά επίπεδα ποσότητας υγρασίας εξομίωσης. Τα 4 συστήματα εσωτερικής θερμομόνωσης που ελέχθηκαν δεν παρουσίασαν φθορές στην υφιστάμενη τοιχοποιία. Λόγω της υψηλής ικανότητας διάχυσης υδρατμών των συστημάτων θερμομόνωσης και της χαμηλής σχετικής

υγρασίας των δωματίων που επιλέχθηκαν, η υγρασία που απορροφούνταν από την τοιχοποιία μπορούσε να στεγνώσει ανεμπόδιστα[49].

Με βάση τα παραπάνω, στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 23) παρουσιάζονται τέσσερα σενάρια προσθήκης εσωτερικής θερμομόνωσης για την παρούσα μελέτη.

Πίνακας 23: Προτεινόμενα σενάρια εσωτερικής θερμομόνωσης

A/A	Επιλογή υλικών από έξω προς τα μέσα	Πάχος [m]	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ [W/mK]	Πυκνότητα [kg/m <sup>3</sup> ]	Πορώδες [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	Συνολικό πάχος [m]	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m <sup>2</sup> K]
Σενάριο 1	Ορυκτός σοβάς	0.01	0.8	1900	0.24	850	0.603	0.401
	Τοιχοποιία	0.5	1.7	1980	0.23	850		
	Ορυκτοβάμβακας	0.08	0.04	60	0.95	850		
	Φράγμα υδρατμών	0.001	2.3	130	0.001	2300		
	Άνθυγρη γυψοσανίδα	0.0125	0.32	1153	0.52	1200		
Σενάριο 2	Ορυκτός σοβάς	0.01	0.8	1900	0.24	850	0.655	0.516
	Τοιχοποιία	0.5	1.7	1980	0.23	850		
	Συνδετικό κονίαμα (διάχυση υδρατμών, ενεργή τριχοειδή δομή, υδραυλικές ιδιότητες)	0.005	0.87	1330	0.5	850		
	Πλάκα πυριτικού ασβεστίου	0.1	0.0623	270	0.9	1162		
	Ασβεστοκονίαμα	0.04	0.7	1600	0.3	850		
Σενάριο 3	Ορυκτός σοβάς	0.01	0.8	1900	0.24	850	0.577	0.484
	Τοιχοποιία	0.5	1.7	1980	0.23	850		
	Remmers iQ-Fix (συνδετικό κονίαμα, διάχυση υδρατμών, ενεργή τριχοειδή δομή, χωρίς ορυκτές ίνες)	0.007	0.497	1313	0.5	863		
	Remmers iQ-Therm (σύστημα μόνωσης πολυουρεθάνης με ενεργή τριχοειδή δομή πυριτικού ασβεστίου)	0.05	0.031	44.5	0.98	1400		
	Remmers iQ-Top (σοβάς υψηλής απορρόφησης και απόδοσης υγρασίας, διάχυση υδρατμών, ενεργή τριχοειδή δομή, θερμομόνωση)	0.01	0.106	465.5	0.81	1173		
Σενάριο 4	Ορυκτός σοβάς	0.01	0.8	1900	0.24	850	0.613	0.386
	Τοιχοποιία	0.5	1.7	1980	0.23	850		
	Pavaflex (εύκαμπτη στρώση από ίνες ξύλου)	0.03	0.039	53	0.96	2100		
	Pavatex Pavadentro (πλάκα από ίνες ξύλου)	0.06	0.043	166	0.96	2100		
	Fermacell Gypsum – Fibreboard (γυψοσανίδα)	0.0125	0.32	1153	0.52	1200		

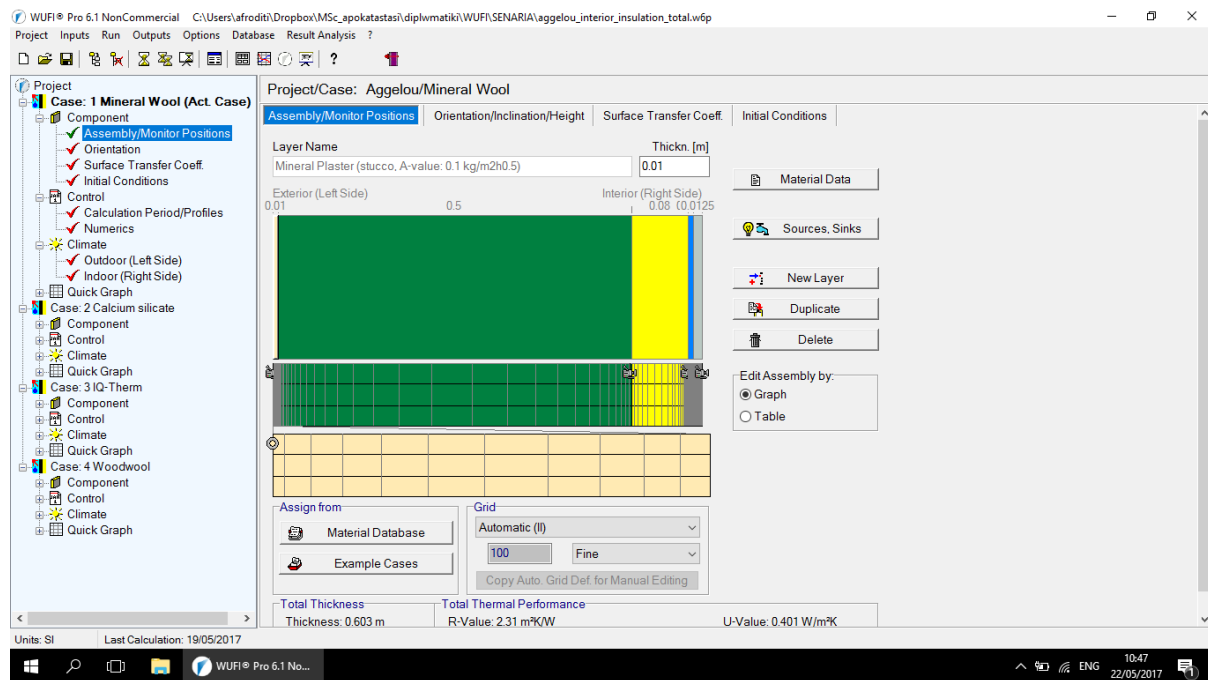
## 9. Υγροθερμική ανάλυση της τοιχοποιίας - Το πρόγραμμα υγροθερμικής προσομοίωσης WUFI Pro

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υγροθερμικής ανάλυσης ενός δομικού μέλους:

- η μέθοδος προσδιορισμού των ελάχιστων απαιτήσεων θερμικής προστασίας σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4108-2
- η μέθοδος Glaser σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4108-3
- η μέθοδος μηνιαίου ισοζυγίου σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN ISO 13788, που βασίζεται ουσιαστικά στη μέθοδο Glaser
- η μέθοδος COND που αναπτύχθηκε από το Πολυτεχνείο της Δρέσδης.

Πολλές μέθοδοι υγροθερμικής προσομοίωσης είναι διαθέσιμες σε λογισμικά όπως το WUFI (Ινστιτούτο Φυσικής Κτιρίων Fraunhofer) και το DELPHIN (Πολυτεχνείο της Δρέσδης)[39].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε για την υγροθερμική ανάλυση της τοιχοποιίας - με επιβολή εσωτερικής θερμομόνωσης - η χρήση του λογισμικού WUFI Pro (Εικόνα 68). Το WUFI Pro είναι ένα πρότυπο πρόγραμμα αξιολόγησης των συνθηκών υγρασίας σε κτιριακά κελύφη. Το WUFI Pro εκτελεί μονοδιάστατους υγροθερμικούς υπολογισμούς σε διατομές δομικών μελών, λαμβάνοντας υπόψη, όπου χρειάζεται, την υφιστάμενη υγρασία, τη βροχή υπό γωνία, την ηλιακή ακτινοβολία, την ακτινοβολία μεγάλου μήκους, τριχοειδή φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας και φαινόμενα συμπύκνωσης υδρατμών τους θερινούς μήνες. Το WUFI Pro καθορίζει την υγροθερμική συμπεριφορά των δομικών μελών υπό πραγματικές κλιματολογικές συνθήκες. Αυτός ο τρόπος διεξοδικής υγροθερμικής ανάλυσης απαιτείται όπου υπάρχουν απαιτήσεις για ακριβή σχεδιασμό, όπως στην περίπτωση παραδοσιακών/ διατηρητέων κτιρίων, και συντάσσεται με το διεθνές πρότυπο EN 15026[50].



Εικόνα 68: Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος WUFI Pro

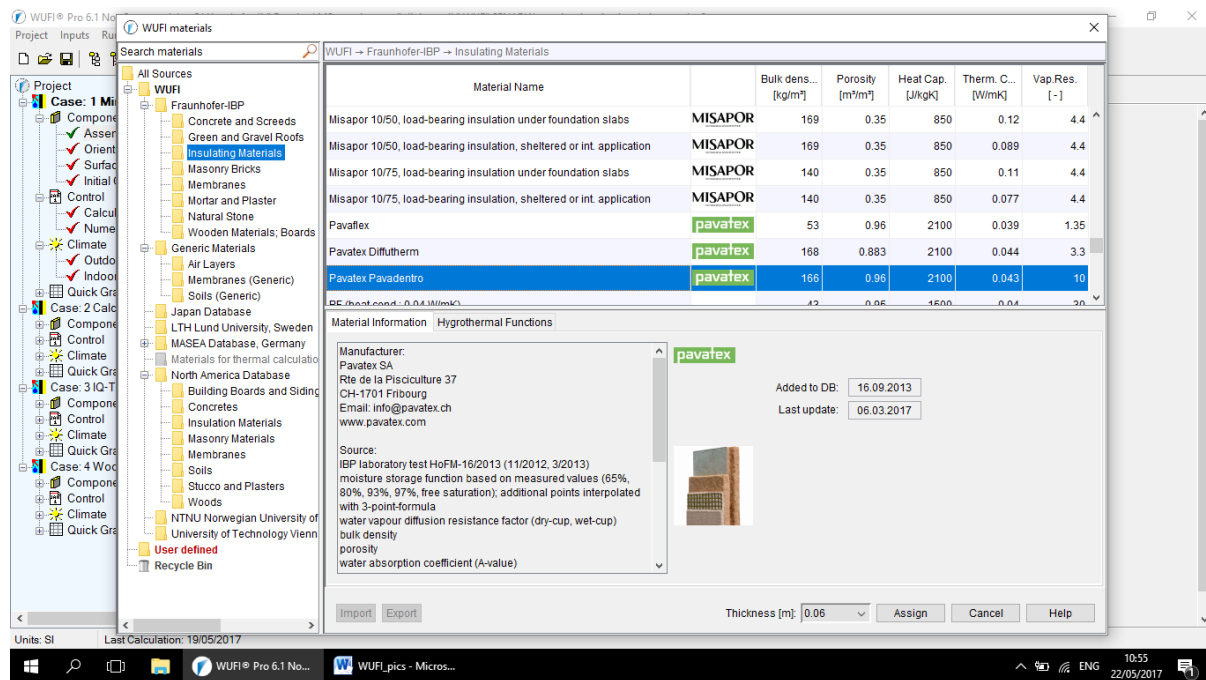
## 9.1 Εισαγωγή δεδομένων

Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφονται τα βήματα διεξαγωγής της υγραυθερμικής ανάλυσης για τα τέσσερα επιλεγμένα σενάρια. Για το κάθε σενάριο πρέπει να συμπληρωθούν τα εξής πεδία:

### 1. Δομικό στοιχείο (Component)

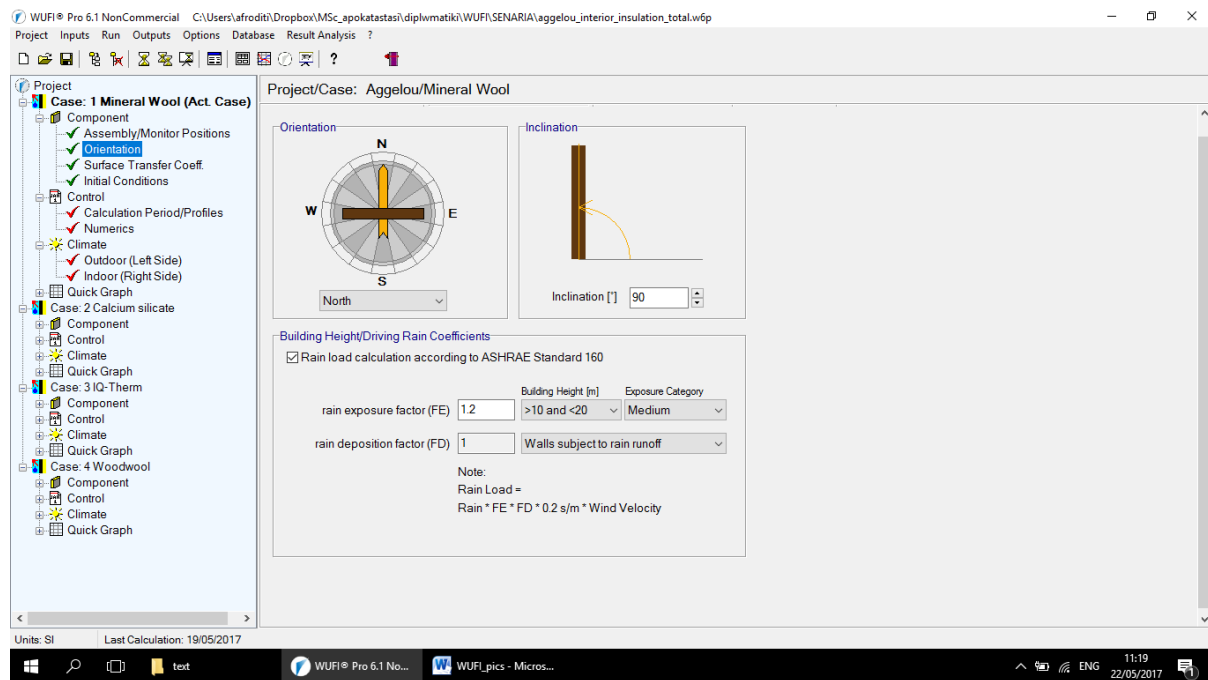
- ✓ Δομή/ Θέσεις παρακολούθησης (Assembly/ Monitoring Positions). Αρχικά εισάγεται η γεωμετρία της τομής για το κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια και ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν είτε από τη βάση δεδομένων του προγράμματος είτε χειροκίνητα (Εικόνα 69). Το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα τον αριθμητικό κানাβο που χρειάζεται για τους υπολογισμούς, ο οποίος μπορεί να τροποποιηθεί από τον χρήστη. Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα ορίζει δύο θέσεις παρακολούθησης της μεταφοράς θερμοκρασίας και υγρασίας. Υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης επιπλέον σημείων παρακολούθησης από τον χρήστη. Στην παρούσα εργασία το σημείο ενδιαφέροντος είναι η επιφάνεια συναρμογής τοιχοποιίας και εσωτερικής θερμομόνωσης, όπου προστέθηκε επιπλέον θέση παρακολούθησης για κάθε σενάριο.





Εικόνα 69: Βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος Wufi Pro

- ✓ Προσανατολισμός (Orientation). Σε αυτό το πεδίο επιλέγεται ο προσανατολισμός και η κλίση του δομικού στοιχείου καθώς και το ύψος του κτιρίου για τον υπολογισμό της έκθεσης του στη βροχή. Η δυσμενέστερη πλευρά του κτιρίου από πλευράς επικρατέστερων ανέμων και έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας – δηλαδή η βόρεια όψη του κτιρίου – επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς. Η κλίση του δομικού στοιχείου μετριέται από την οριζόντια επιφάνεια, οπότε συμπληρώθηκε στις 90° (Εικόνα 70). Ως συντελεστής έκθεσης στη βροχή επιλέχθηκε ο συντελεστής που αντιστοιχεί σε ύψος κτιρίου μεταξύ 10-20m για μέτρια κατηγορίας έκθεση. Ο υπολογισμός της έκθεσης του κτιρίου στη βροχή γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE Standard 160.



Εικόνα 70: Προσανατολισμός, κλίση και έκθεση δομικού στοιχείου στη βροχή

- ✓ Συντελεστές αλληλεπίδρασης των εξωτερικών επιφανειών με το περιβάλλον (Surface Transfer Coefficients). Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται σε ποιο βαθμό οι περιβαλλοντικές συνθήκες από το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζουν το δομικό στοιχείο. Στην εξωτερική επιφάνεια ορίζεται η θερμική αντίσταση, πιθανές επικαλύψεις της εξωτερικής επιφάνειας, η απορρόφηση και η εκπομπή ακτινοβολίας όπως και η απορρόφηση της βροχής. Στην εσωτερική επιφάνεια ορίζεται η θερμική αντίσταση και πιθανά στοιχεία επικάλυψης. Στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκε για όλα τα σενάρια μια ανοιχτόχρωμη εξωτερική επιφάνεια και συντελεστής απορρόφησης της βροχής 70%.
- ✓ Αρχικές συνθήκες (Initial Conditions). Σε αυτό το πεδίο ορίζονται η αρχική θερμοκρασία και τα επίπεδα υγρασίας των στοιχείων που απαρτίζουν το δομικό στοιχείο. Στην παρούσα ανάλυση ο ορισμός μιας σταθερής αρχικής θερμοκρασίας, στους 20°C, είναι επαρκής, καθώς η κατανομή της θερμοκρασίας θα προσαρμοστεί στις συνθήκες περιβάλλοντος εντός μερικών ωρών. Στην περίπτωση των αρχικών επιπέδων υγρασίας μπορούν να διακριθούν τρεις βασικές κατηγορίες.
  - Υλικά που ήταν εκτεθειμένα στο εξωτερικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια αποθήκευσης τους οπότε έχουν αποκτήσει υγρασία ισορροπίας, εξισορροπημένη με την υγρασία του περιβάλλοντος. Η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία ορίζεται γι'αυτά τα υλικά στο περιεχόμενο υγρασίας των υλικών σε συνθήκες ισορροπίας για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 80%.
  - Υλικά και κατασκευές που περιέχουν ενσωματωμένη υγρασία, όπως κονιάματα, σκυρόδεμα, τοιχοποιία με αρμό και όλα τα υλικά που δεν ήταν αποθηκευμένα σε στεγασμένο χώρο και βράχθηκαν κατά την διάρκεια της κατασκευής. Για δομικά υλικά που χρειάζονται νερό για την παραγωγή τους (όπως σοβάς και σκυρόδεμα), η αρχική περιεκτικότητα σε νερό είναι κοντά στα επίπεδα κορεσμού. Για κάποια υλικά παρέχονται τυπικές τιμές αρχικής περιεκτικότητας σε υγρασία από τη βάση δεδομένων του προγράμματος.

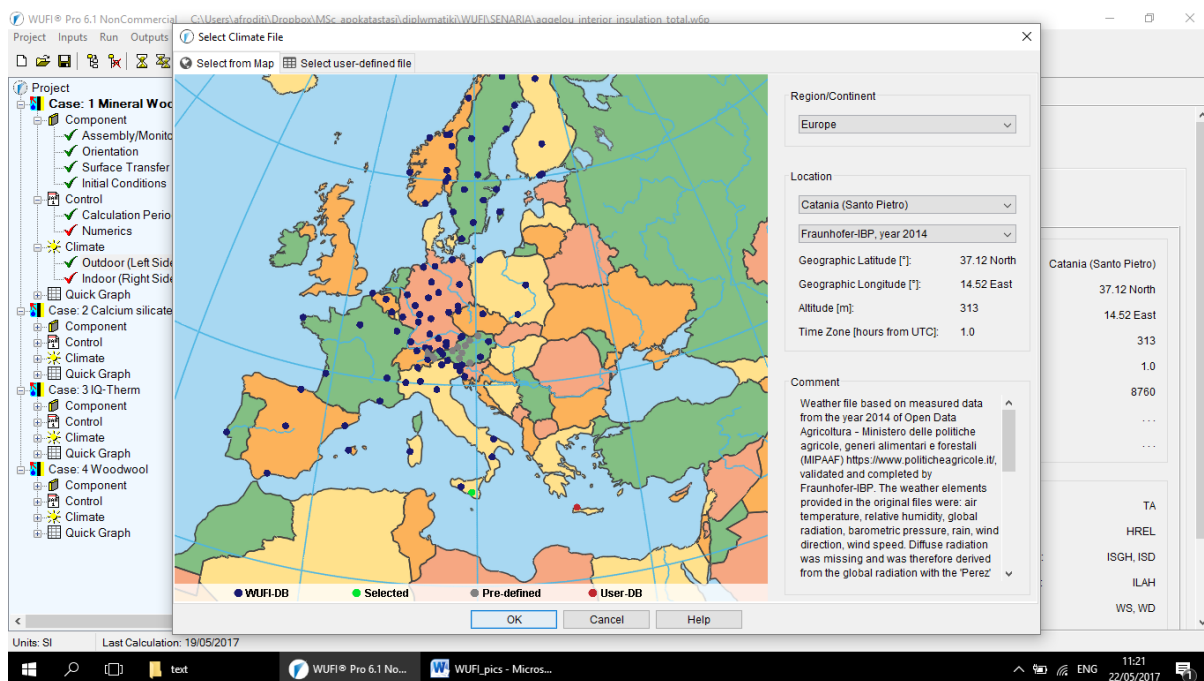
- Τα υφιστάμενα υλικά της κατασκευής που έχουν φτάσει τις συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, δηλαδή σε αυτά επαναλαμβάνονται παρόμοιες υγροθερμικές συνθήκες κάθε χρόνο.

## 2. Έλεγχος (Control)

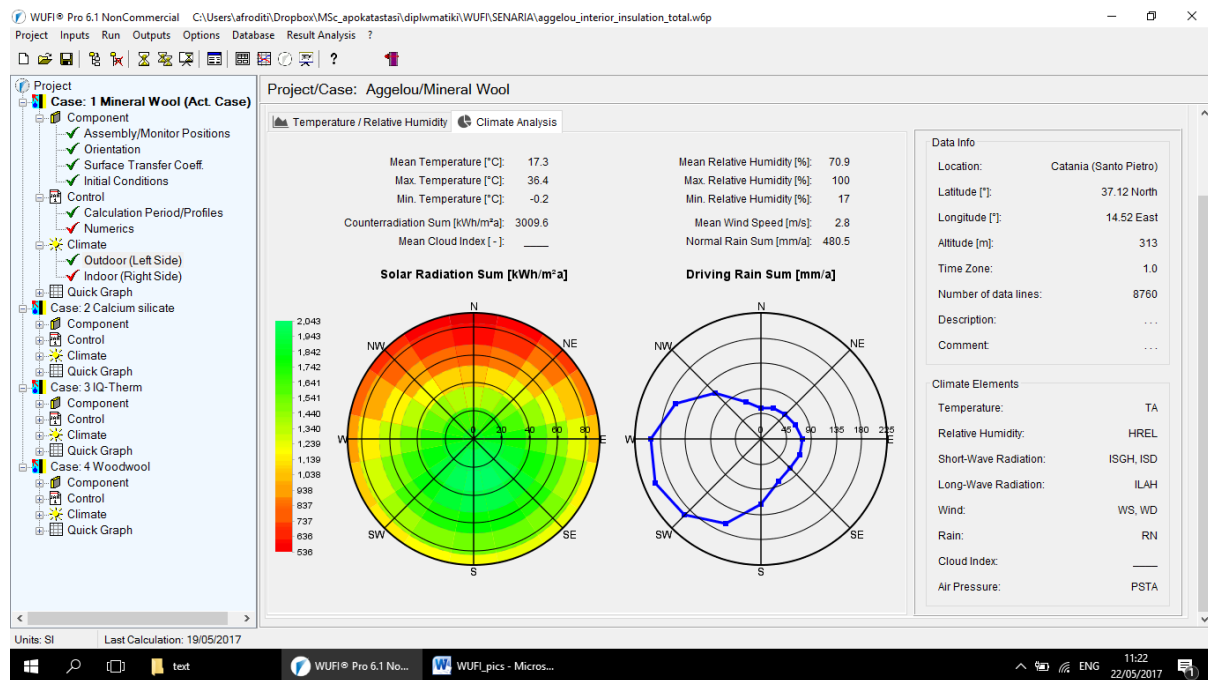
- ✓ Περίοδος υπολογισμών (Calculation Period/ Profiles) - Στην παρούσα ανάλυση η περίοδος για την οποία γίνονται οι υπολογισμοί είναι 10 έτη ξεκινώντας από την 1 Οκτώβρη του 2017 μέχρι την 1 Οκτώβρη του 2027 με χρονικό βήμα 1h. Σκοπός είναι η περίοδος των υπολογισμών να είναι επαρκής ώστε στην κατασκευή να έχει επέλθει δυναμική ισορροπία και τα επίπεδα υγρασίας να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα από τη μια χρονιά στην άλλη.
- ✓ Ρυθμίσεις υπολογισμών (Numerics)

## 3. Κλιματολογικές συνθήκες (Climate). Σε αυτό το πεδίο ορίζονται οι κλιματολογικές συνθήκες που επιδρούν στο δομικό στοιχείο. Από την αριστερή πλευρά του στοιχείου το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη την επίδραση της βροχής και της ηλιακής ακτινοβολίας οπότε εκεί ορίζεται η εξωτερική πλευρά του στοιχείου.

- ✓ Εξωτερικό περιβάλλον [αριστερά] (Outdoor [Left Side]). Το πρόγραμμα διαθέτει βάση δεδομένων με κλιματολογικά στοιχεία διαφόρων περιοχών όπου ο χρήστης μπορεί να τα επιλέξει με βάση την τοποθεσία τους στο χάρτη (Εικόνες 71,72). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής αρχείου από άλλη πηγή.

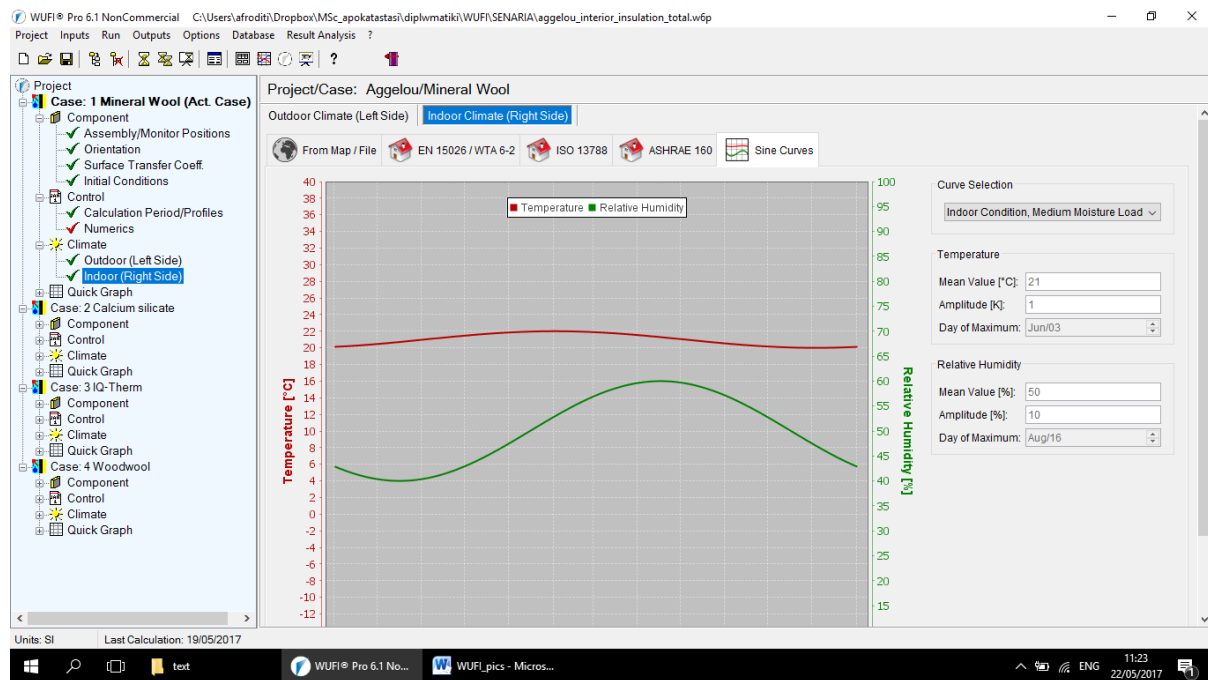


Εικόνα 71: Χάρτης κλιματολογικών δεδομένων



Εικόνα 72: Ανάλυση κλιματολογικών δεδομένων

- ✓ Εσωτερικό περιβάλλον [δεξιά] (Indoor [Right Side]). Το πρόγραμμα προσφέρει τρεις εναλλακτικές για τον ορισμό του εσωτερικού περιβάλλοντος.
  - Ημιτονοειδής καμπύλες με περίοδο ενός έτους για θερμοκρασία και σχετική υγρασία με μέγιστες τιμές για τους καλοκαιρινούς μήνες και ελάχιστες για τους χειμερινούς. Για τις περισσότερες περιπτώσεις οι προκαθορισμένες τιμές από το πρόγραμμα (μέσα φορτία υγρασίας, θερμοκρασία 21°, πλάτος 1°) είναι κατάλληλες, οπότε χρησιμοποιούνται και στην παρούσα ανάλυση (Εικόνα 73).
  - Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13788
  - Ευρωπαϊκό προσωρινό πρότυπο prEN 15026[51]



Εικόνα 73: Υγροθερμικά δεδομένα για τον εσωτερικό χώρο

## 9.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε σε δύο στάδια, στο πρώτο στάδιο διερευνήθηκαν τα επίπεδα υγρασίας και ο κίνδυνος εμφάνισης μούχλας. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε έλεγχος των θερμικών απωλειών και των ελάχιστων επιφανειακών θερμοκρασιών στην εσωτερική και εξωτερική παρειά της τοιχοποιίας.

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης βασίστηκε στις ακόλουθες ερωτήσεις:

- Η σχετική υγρασία μεταξύ τοιχοποιίας και μόνωσης είναι  $>80\%$  (σε περίοδο 10ετίας);
- Η σχετική υγρασία στην εσωτερική επιφάνεια είναι  $>80\%$  (σε περίοδο 10ετίας);
- Υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης μούχλας (δείκτης ανάπτυξης μούχλας – Mould Index  $>1$ ) μεταξύ τοιχοποιίας και μόνωσης;
- Υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης μούχλας (δείκτης ανάπτυξης μούχλας – Mould Index  $>1$ ) στην εσωτερική επιφάνεια;

Το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης βασίστηκε στις ακόλουθες ερωτήσεις:

- Ποια είναι η επιφανειακή θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας σε περίοδο 10ετίας
- Ποιες είναι οι θερμικές απώλειες μέσω της εσωτερικής επιφάνειας;

Υπάρχουν αρκετές βιολογικές διεργασίες που προκαλούν γήρανση και φθορά στα δομικά στοιχεία. Αυτό οφείλεται εν μέρη στη φυσική γήρανση των υλικών και εν μέρη προκαλείται από την ύπαρξη πλεονάζουσας υγρασίας. Οι απαιτήσεις για αντοχή, ενεργειακή εξοικονόμηση και υγιεινό

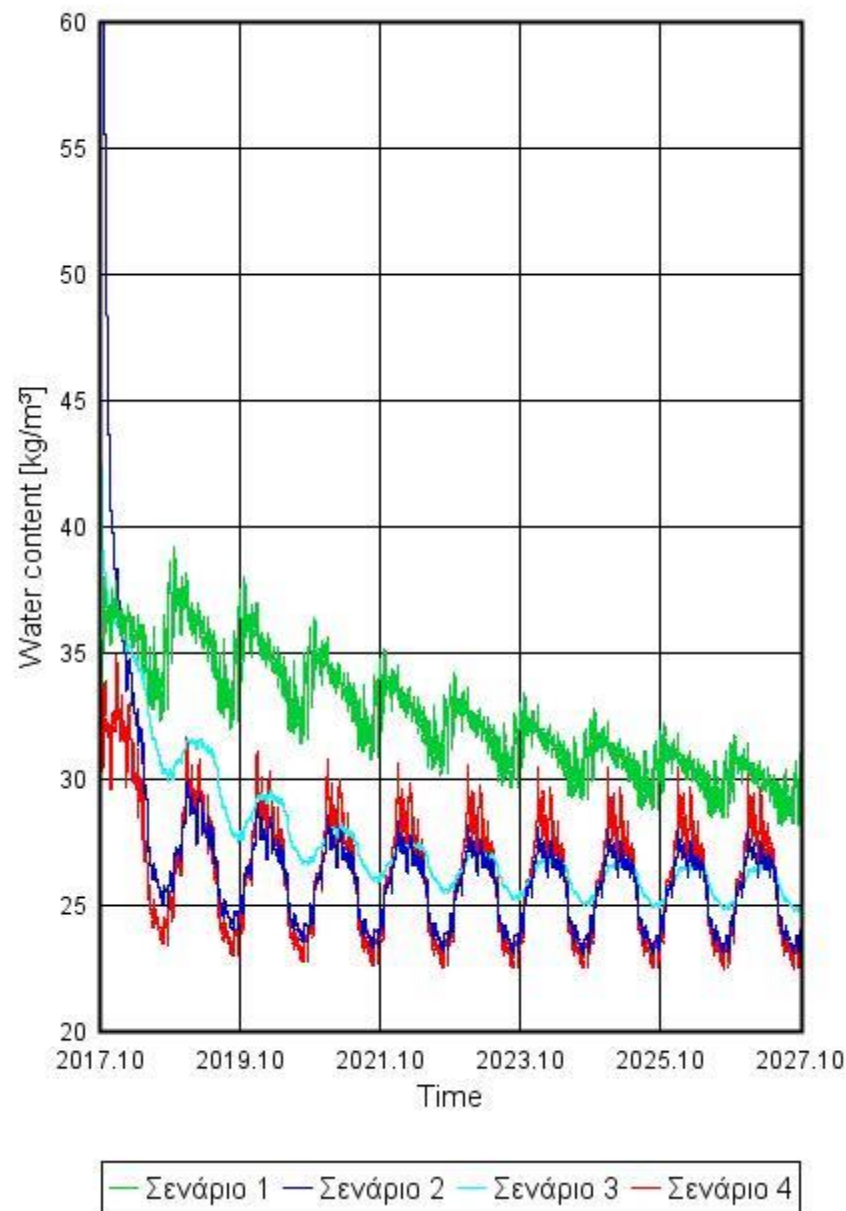


περιβάλλον διαβίωσης στο εσωτερικό των κτιρίων αυξάνονται συνεχώς. Για την ανάπτυξη μούχλας, οι ελάχιστες απαιτήσεις (κρίσιμη τιμή) υγρασίας περιβάλλοντος κυμαίνονται μεταξύ 80-95% γεγονός που εξαρτάται από άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο χρόνος έκθεσης και η κατάσταση του δομικού υλικού. Για την ανάπτυξη συνθηκών αποσύνθεσης (σαπίσματος) η κρίσιμη τιμή σχετικής υγρασίας είναι 95%. Η μούχλα επηρεάζει την ποιότητα του εσωτερικού αέρα με την αποδέσμευση πτητικών ενώσεων και σπόρων. Η ανάπτυξη συνθηκών αποσύνθεσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα αποδυνάμωσης των στατικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών και εξαρτάται από τα ποσοστά υγρασίας, το είδος του υλικού, τη θερμοκρασία και το χρόνο έκθεσης[52].

#### **Διεπιφάνεια τοιχοποιίας - θερμομόνωσης**

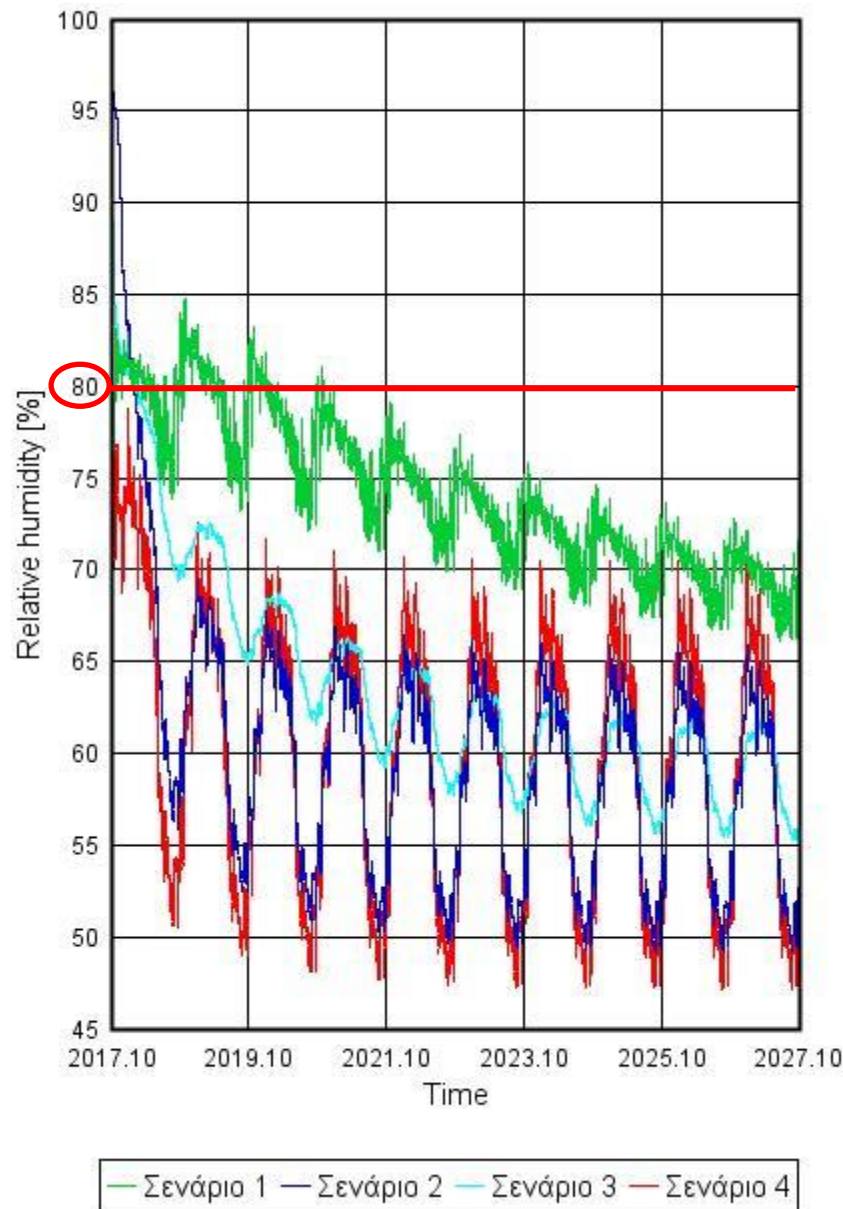
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται το περιεχόμενο σε υγρασία [ $WC:kg/m^3$ ] και η σχετική υγρασία [ $RH:\%$ ] στη διεπιφάνεια μεταξύ τοιχοποιίας και μόνωσης (Εικόνες 74,75). Υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και σχετική υγρασία συναντάται στο Σενάριο 1 (θερμομόνωση ορυκτοβάμβακα),  $WC=28-33\text{ kg/m}^3$  και  $RH=66-72\%$  σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, ενώ οι χαμηλότερες τιμές συναντούνται για το Σενάριο 4 (θερμομόνωση με ίνες ξύλου),  $WC=22-30kg/m^3$  και  $RH=47-70\%$  αντίστοιχα. Το Σενάριο 2 (θερμομόνωση πυριτικού ασβεστίου) παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με το Σενάριο 4, ενώ το Σενάριο 3 (θερμομόνωση με iQ-Therm) παρά το γεγονός ότι δεν παρουσιάζει τόσο χαμηλές τιμές περιεχόμενης και σχετικής υγρασίας,  $WC=25-27kg/m^3$ ,  $RH=55-62\%$  προσφέρει το προτέρημα μικρότερων ετήσιων διακυμάνσεων, άρα και μικρότερης επιβάρυνσης των υλικών. Μη αποδεκτά ποσοστά σχετικής υγρασίας ( $>80\%$ ) εμφανίζονται μόνο στο Σενάριο 1 για τα τρία πρώτα χρόνια μετά την επέμβαση.

## Water Content



Εικόνα 74: Περιεχόμενη υγρασία στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας - μόνωσης – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων

## Relative Humidity

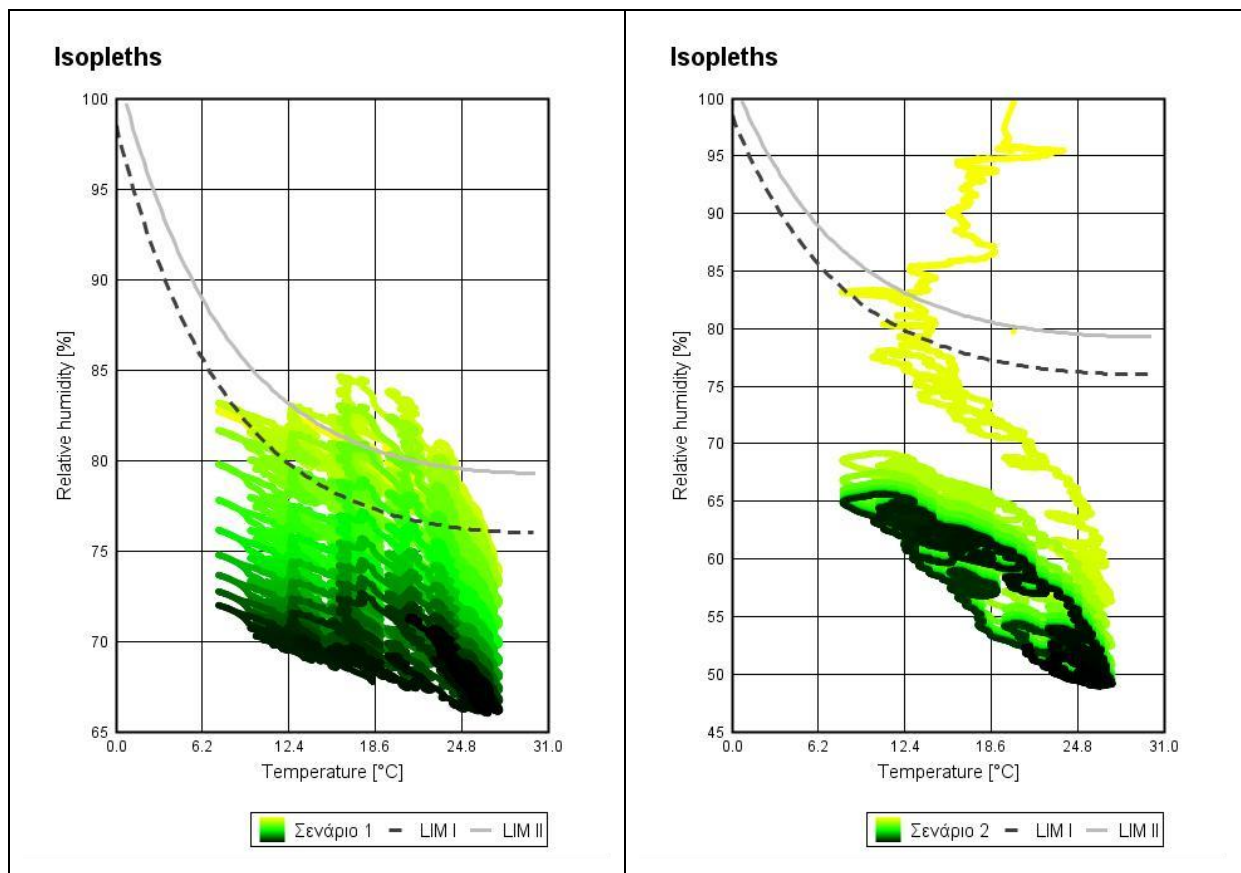


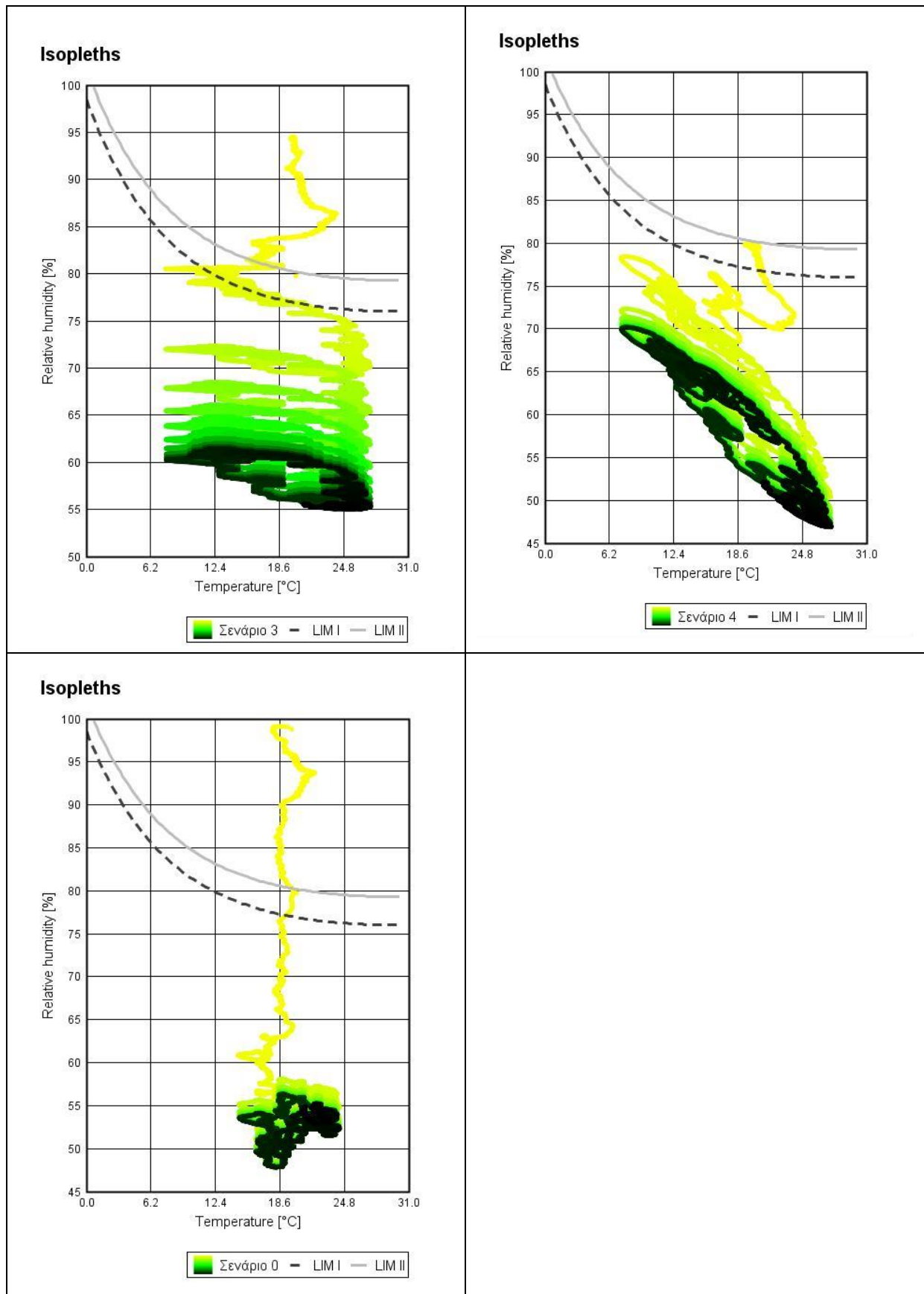
Εικόνα 75: Σχετική υγρασία στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας – μόνωσης – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος εμφάνισης μούχλας, το διάγραμμα 'isopleths' αποτελεί ένα επιπλέον εργαλείο ανάλυσης. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται ζεύγη τιμών θερμοκρασίας – σχετικής υγρασίας για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η αρχή, με πράσινο η μέση και με μαύρο χρώμα το τέλος της περιόδου. Στο ίδιο διάγραμμα εμφανίζονται και 2 καμπύλες που χωρίζουν το διάγραμμα σε 2 περιοχές. Πάνω και δεξιά είναι η κρίσιμη περιοχή για την ανάπτυξη μούχλας ενώ κάτω και αριστερά ο κίνδυνος ανάπτυξης μούχλας είναι πρακτικά μηδενικός. Στα επόμενα διαγράμματα εμφανίζονται οι καμπύλες 'isopleths' για τα τέσσερα υπό μελέτη σεναρία και για τη διεπιφάνεια μεταξύ τοιχοποιίας και μόνωσης (Εικόνα 76). Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η περιεχόμενη υγρασία στα δομικά υλικά κατά την κατασκευή του συστήματος θερμομόνωσης είναι αυτή που μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης μούχλας κατά την αρχική περίοδο μετά την επέμβαση στο δομικό στοιχείο. Για το λόγο αυτό οι εργασίες

αυτές είναι καλό να προγραμματίζονται στο τέλος της καλοκαιρινής περιόδου. Πιο συγκεκριμένα από τα πέντε σενάρια που μελετήθηκαν, σύμφωνα με αυτό το εργαλείο, τα σενάρια 0 (απουσία θερμομόνωσης), 1, 2 και 3 παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό των ζευγών θερμοκρασίας – σχετικής υγρασίας στην κρίσιμη περιοχή του διαγράμματος. Το σενάριο 1 (θερμομόνωση ορυκτοβάμβακα) παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει κρίσιμη συμπεριφορά για περισσότερο χρονικό διάστημα, η σχετική υγρασία στην διεπιφάνεια τοιχοποιίας και μόνωσης δεν ξεπερνά το 85%.

Αντίθετα για το σενάριο 2 (μόνωση πυριτικού ασβεστίου) τα ζεύγη θερμοκρασίας – σχετικής υγρασίας ξεκινούν από επίπεδα σχετικής υγρασίας σχεδόν 100%. Οι αντίστοιχες τιμές για το σενάριο 3 (Σύστημα θέρμανσης iQ-Therm) ξεκινούν από 95%, ενώ για το σενάριο 4 (θερμομόνωση με ίνες ξύλου) μόλις από 80%.





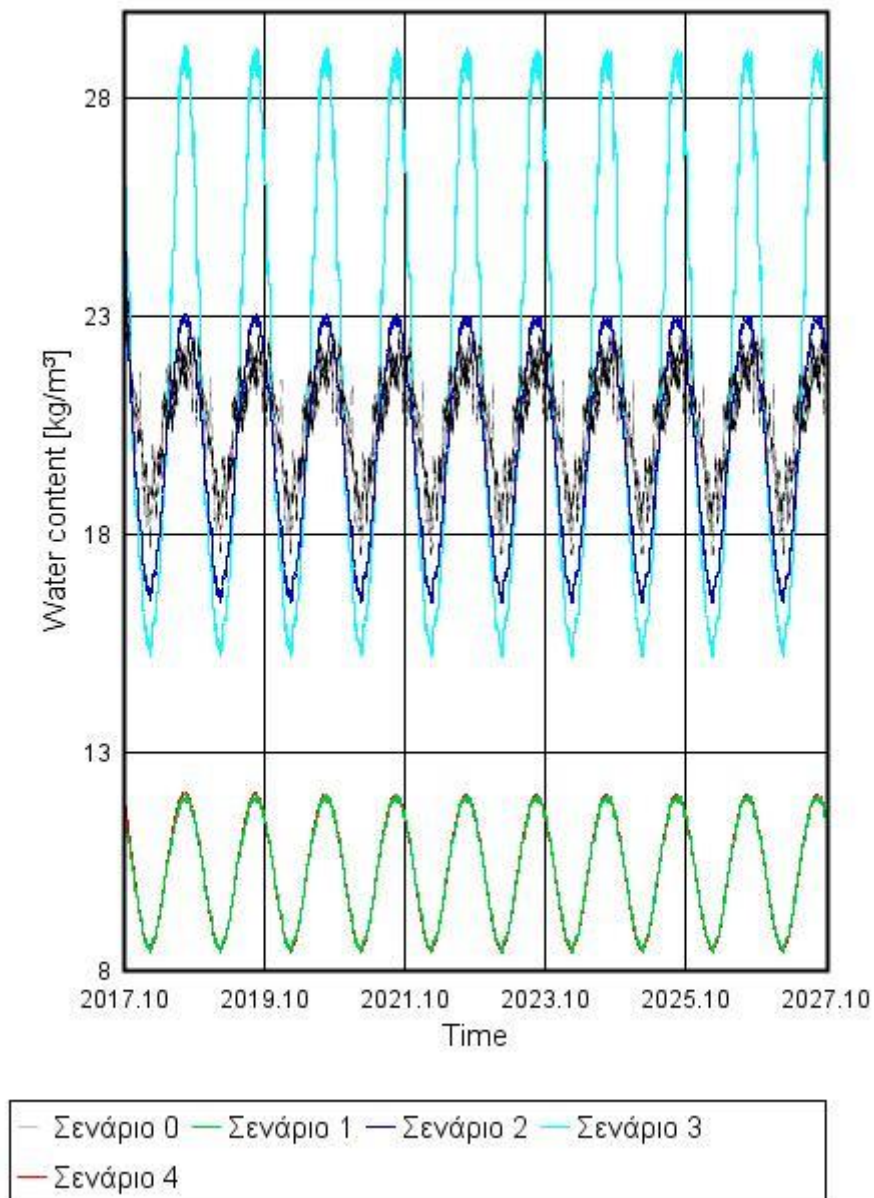
Εικόνα 76: Διαγράμματα 'Isopleths' για τα πέντε σενάρια μελέτης – διεπιφάνεια τοιχοποιίας – θερμομόνωσης



**Εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας**

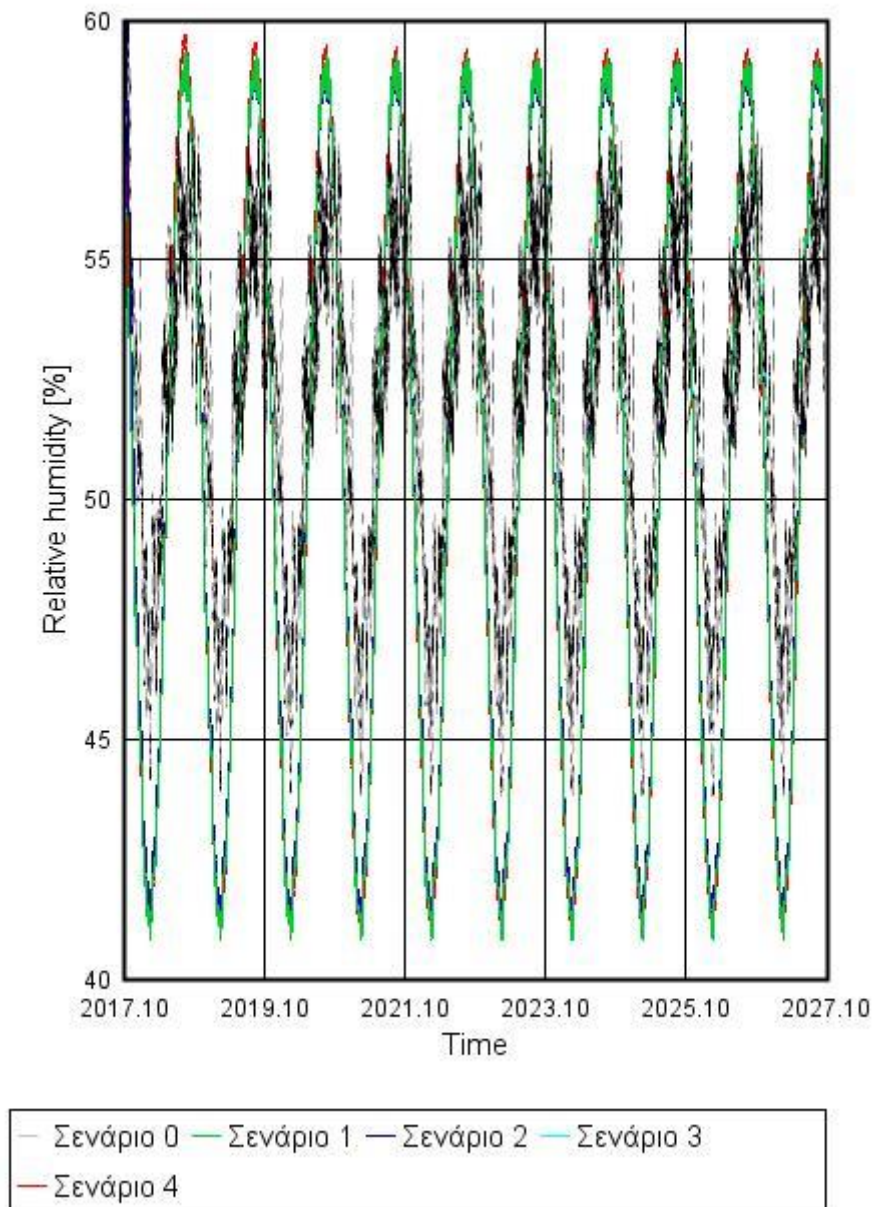
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται το περιεχόμενο σε υγρασία [ $WC:kg/m^3$ ] και η σχετική υγρασία [ $RH:\%$ ] στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας (Εικόνες 77,78). Υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία συναντάται στο Σενάριο 3 (θερμομόνωση με iQ-Therm),  $WC=15-29 kg/m^3$  σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, ενώ οι χαμηλότερες τιμές συναντούνται για τα Σενάρια 1 και 4 (θερμομόνωση ορυκτοβάμβακα και θερμομόνωση με ίνες ξύλου),  $WC=8.5-12kg/m^3$ . Το Σενάριο 2 (θερμομόνωση πυριτικού ασβεστίου) παρουσιάζει μέση συμπεριφορά με περιεχόμενο υγρασίας  $WC=16-23 kg/m^3$ . Το σενάριο 0 (απουσία θερμομόνωσης) παρουσιάζει περιεκτικότητα σε υγρασία  $WC=17.5-22 kg/m^3$ . Η σχετική υγρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα και για τα τέσσερα σενάρια  $RH=40-60\%$ , ενώ για το σενάριο 0 (σενάριο χωρίς θερμομόνωση) η διακύμανση της σχετικής υγρασίας είναι  $RH=44-57\%$ .

## Water Content



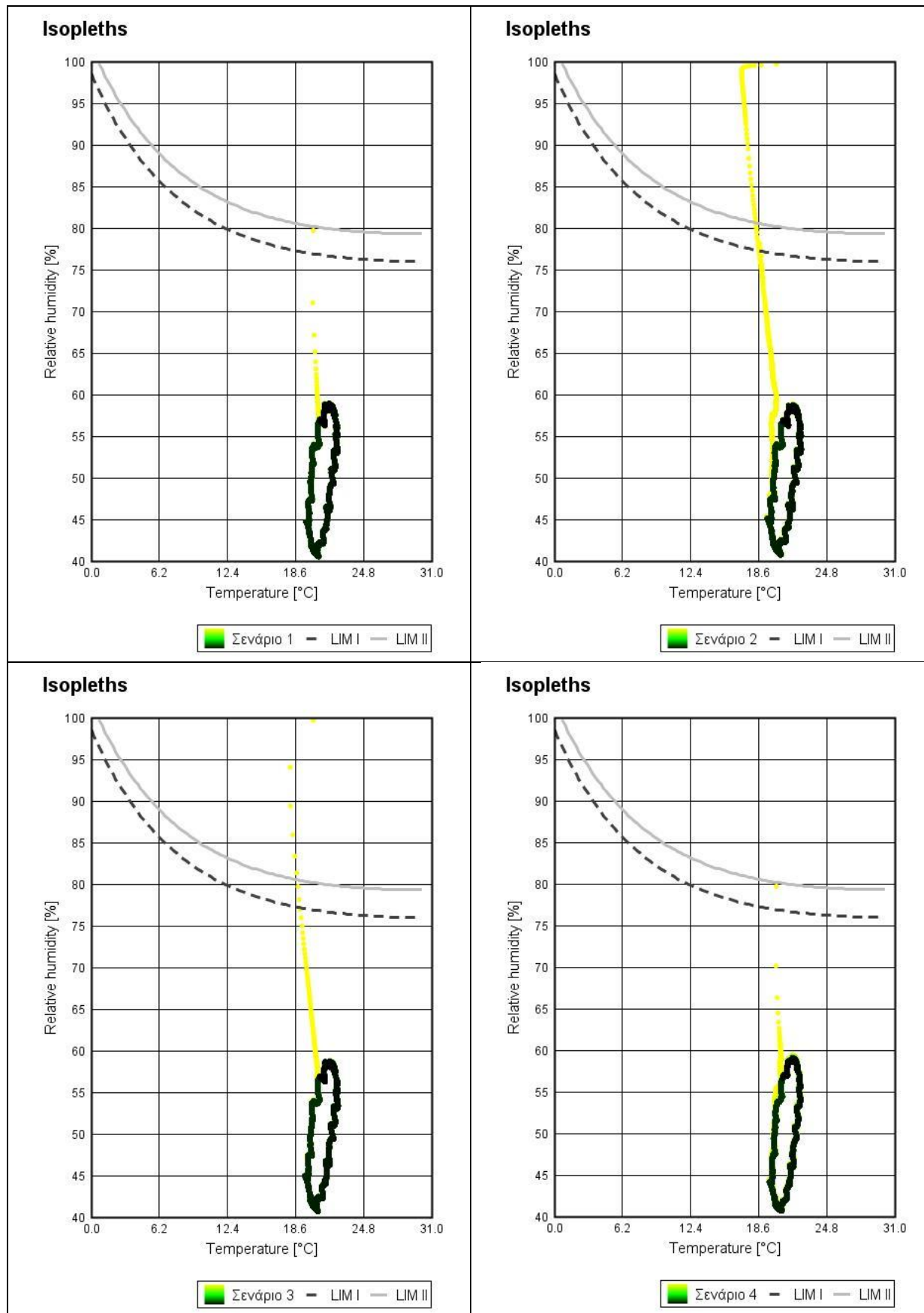
Εικόνα 77: Περιεχόμενη υγρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων και του σεναρίου 0 (απουσία θερμομόνωσης)

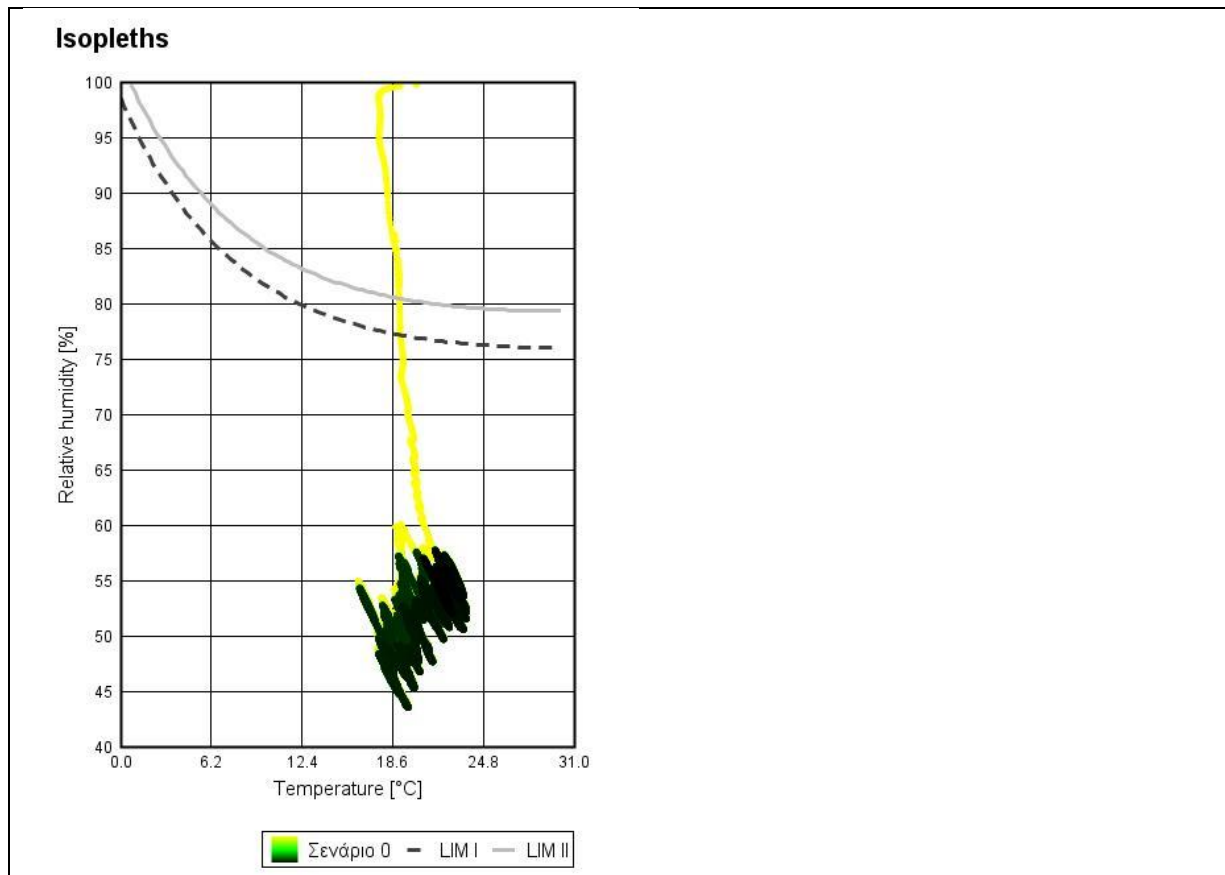
## Relative Humidity



Εικόνα 78: Σχετική υγρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων και του σεναρίου 0 (απουσία θερμομόνωσης)

Στα επόμενα διαγράμματα εμφανίζονται οι καμπύλες 'isopleths' για τα τέσσερα υπό μελέτη σεσάρια και το σεσάριο 0 (απουσία θερμομόνωσης) για την εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας (Εικόνα 79). Από τα πέντε σεσάρια τα σεσάρια 0, 2 και 3 παρουσιάζουν ζεύγη θερμοκρασίας – σχετικής υγρασίας στην κρίσιμη περιοχή του διαγράμματος.





Εικόνα 79: Διαγράμματα 'Isopleths' για τα πέντε σενάρια μελέτης – εσωτερική επιφάνεια τοιχοποιίας

Στη συνέχεια για τα τέσσερα υπό μελέτη σενάρια υπολογίστηκε ο δείκτης 'Mould Index'. Ο δείκτης αυτός είναι βασισμένος σε οπτικά ευρήματα ανάπτυξης μούχλας, με χρήση μικροσκοπίου ή γυμνού οφθαλμού, που κατατάσσονται σε μία κλίμακα από 0-6. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 24) παρουσιάζεται η περιγραφή του ρυθμού ανάπτυξης μούχλας για όλες τις βαθμίδες της κλίμακας[53]. Ο δείκτης ανάπτυξης μούχλας δεν πρέπει να παίρνει τιμές >1.

Πίνακας 24: Περιγραφή του ρυθμού ανάπτυξης μούχλας με χρήση της κλίμακας 'Mould Index'

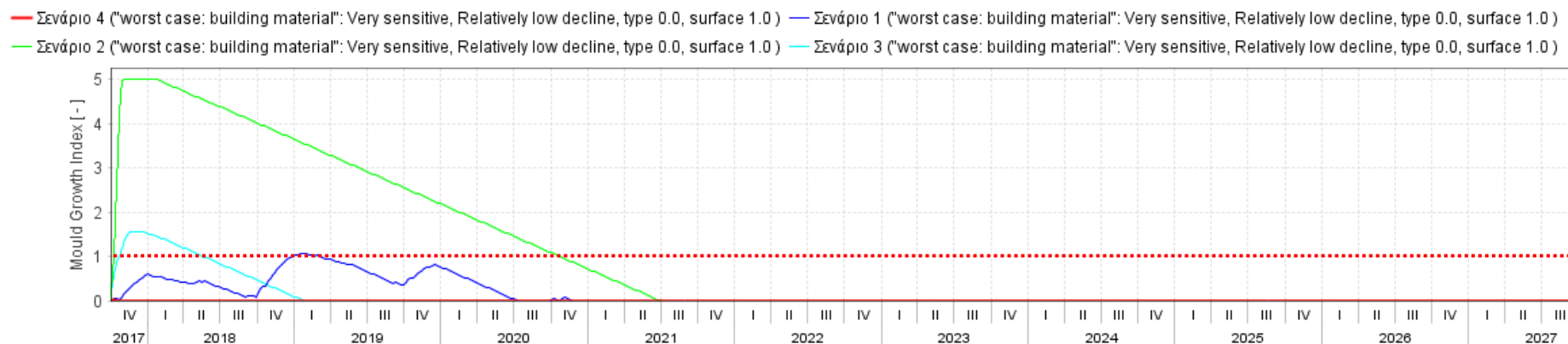
Mould Index	Περιγραφή του ρυθμού ανάπτυξης
0	Καθόλου ανάπτυξη
1	Μικρές ποσότητες μούχλας στην επιφάνεια (μικροσκόπιο), αρχικά στάδια τοπικής ανάπτυξης
2	Ανάπτυξη τοπικά αρκετών αποικιών στην επιφάνεια (μικροσκόπιο)
3	Οπτικά ευρήματα μούχλας στην επιφάνεια, <10% κάλυψη, ή, <50% κάλυψη ορατή με το μικροσκόπιο
4	Ευρήματα ορατά με γυμνό οφθαλμό, 10-50% κάλυψη, ή >50% κάλυψη ορατή με το μικροσκόπιο
5	Αρκετή ανάπτυξη μούχλας στην επιφάνεια, >50% κάλυψη ορατή με γυμνό οφθαλμό
6	Πυκνή ανάπτυξη μούχλας, κάλυψη σχεδόν 100%

Από το συνολικό διάγραμμα του δείκτη ανάπτυξης μούχλας μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης (Εικόνα 80) προκύπτει ότι τα Σενάρια 2 και 3 παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας. Συγκεκριμένα για το σενάριο 2 ο κίνδυνος αυτός παρουσιάζεται κατά τα πρώτα τέσσερα χρόνια

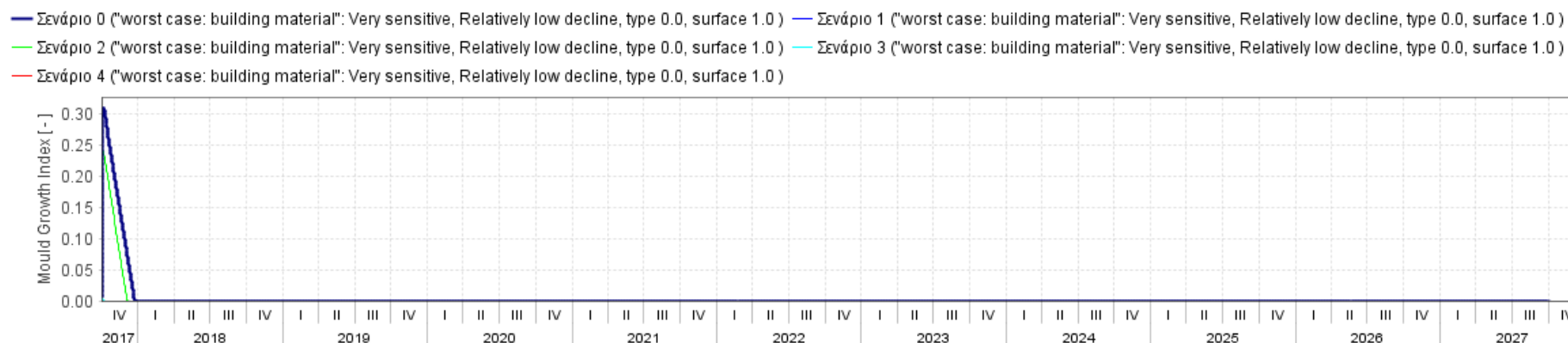


μετά την εφαρμογή της μόνωσης, ενώ για το σενάριο 3 μόλις τους έξι πρώτους μήνες μετά την εφαρμογή.

Από το συνολικό διάγραμμα του δείκτη ανάπτυξης μούχλας για την εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας (Εικόνα 81) προκύπτει ότι δεν υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια καθώς ο δείκτης εμφανίζεται  $<1$  για όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν.



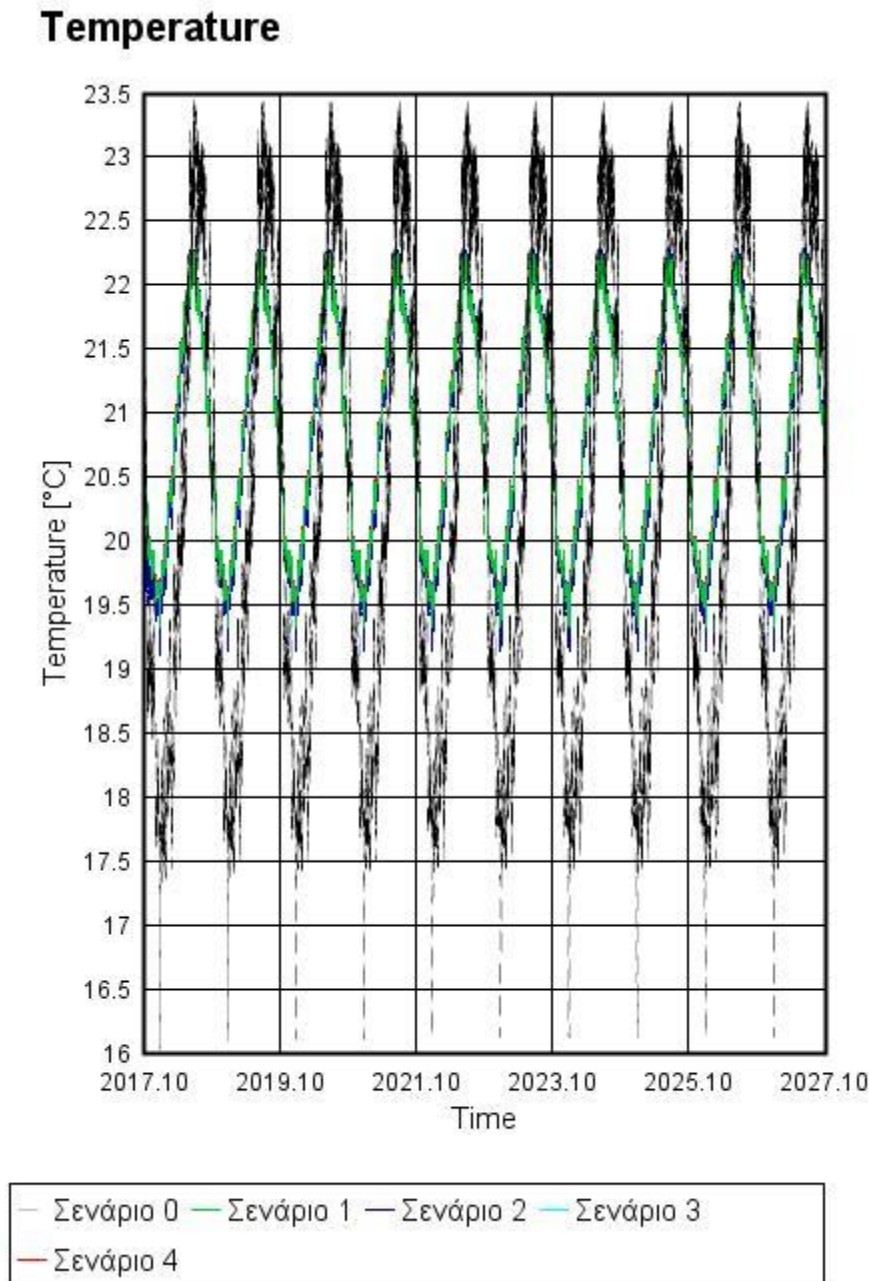
Εικόνα 80: Ο δείκτης ανάπτυξης μούχλας για τα τέσσερα σενάρια μελέτης μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης



Εικόνα 81: Ο δείκτης ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας για τα τέσσερα σενάρια και το σενάριο 0 (απουσία θερμομόνωσης)

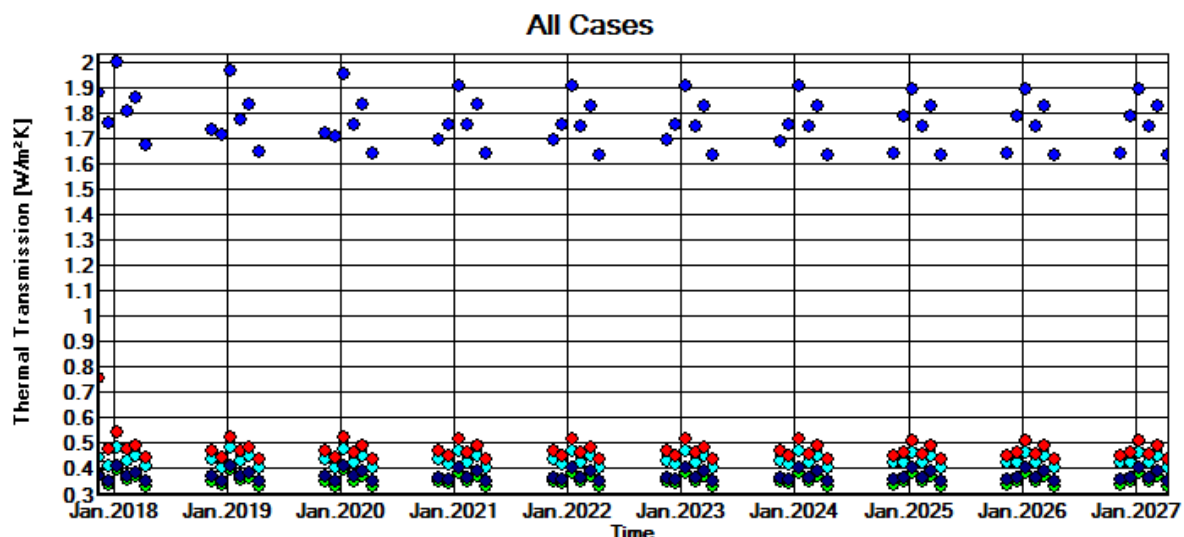
### Επιφανειακή θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 82) απεικονίζεται η επιφανειακή θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου για όλα τα σενάρια καθώς και για το Σενάριο 0, που αποτελεί το σενάριο με εσωτερικό και εξωτερικό επίχρισμα, κοινό με τα υπόλοιπα σενάρια, και απουσία εσωτερικής θερμομόνωσης. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για τα τέσσερα σενάρια η θερμοκρασία κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με εποχιακή διακύμανση από 19.3-22.3°C, αντίθετα για το Σενάριο 0 η θερμοκρασία κυμαίνεται από 16-23.5°C. Τα σενάρια αυτά διαμορφώνονται με δεδομένο ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου είναι 21° με εποχιακή διακύμανση 1°C. Η επιβολή της εσωτερικής θερμομόνωσης οδήγησε σε αύξηση της ελάχιστης επιφανειακής θερμοκρασίας (κατά τους χειμερινούς μήνες) από 16°C σε 19.3° και σε μείωση της μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας (κατά τους καλοκαιρινούς μήνες) από 23.5°C σε 22.3°C με τις αντίστοιχες επιπτώσεις στις ανάγκες για ψύξη και θέρμανση στο εσωτερικό του κτιρίου.



Εικόνα 82: Επιφανειακή θερμοκρασία στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας – σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων και του σεναρίου 0 (χωρίς θερμομόνωση)

Στα επόμενα διαγράμματα (Εικόνα 83) απεικονίζεται η θερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο – Απρίλιο). Στο πρώτο διάγραμμα εμφανίζονται οι τιμές θερμοπερατότητας για όλα τα σενάρια. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται, όπως ήταν αναμενόμενο για το σενάριο 4 (θερμομόνωση από ίνες ξύλου), ενώ οι υψηλότερες τιμές για το σενάριο 0 (απουσία μόνωσης).



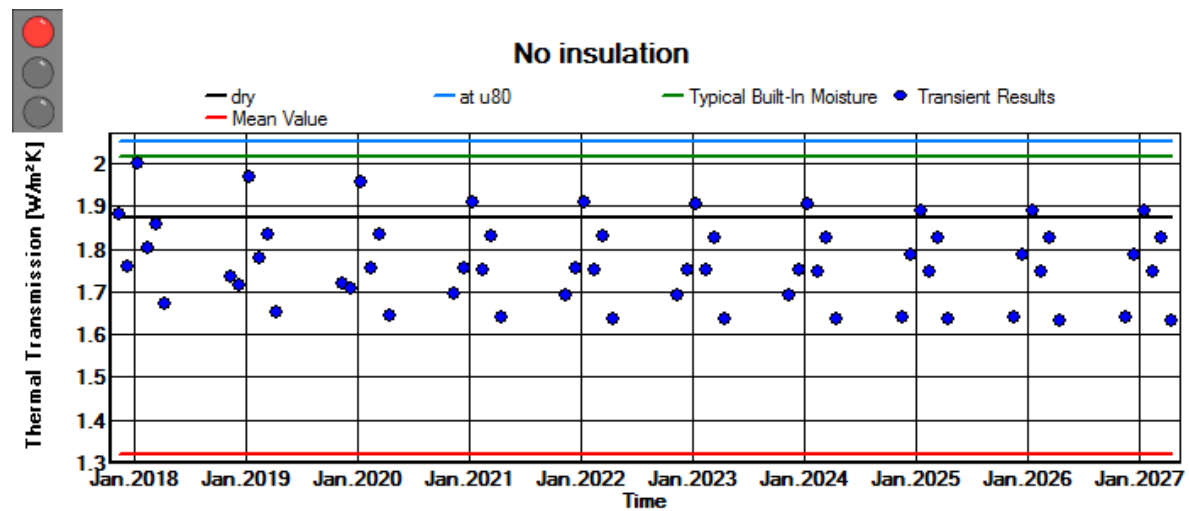
Εικόνα 83: Τιμές θερμοπερατότητας – συγκεντρωτικός πίνακας

Το σενάριο 0 παρουσιάζει μη αποδεκτή θερμική συμπεριφορά καθώς εμφανίζει πολύ υψηλές τιμές θερμοπερατότητας. Τα σενάρια 1, 3 και 4 παρουσιάζουν αποδεκτή θερμική συμπεριφορά με τιμές θερμοπερατότητας να κυμαίνονται από 0.33-0.482W/m<sup>2</sup>K. Η μεγαλύτερη ετήσια διακύμανση στη θερμοπερατότητα εμφανίζεται για το σενάριο 3 (Σύστημα θέρμανσης iQ-Therm), το οποίο παρουσίαζε τη μικρότερη διακύμανση περιεχόμενης και σχετικής υγρασίας στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας και μόνωσης. Το σενάριο 2 (μόνωση πυριτικού ασβεστίου) παρουσιάζει μη αποδεκτή τιμή θερμοπερατότητας (0.753W/m<sup>2</sup>K) κατά το μήνα Νοέμβριο 2017, που είναι ο πρώτος μήνας μετά την εφαρμογή της μόνωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεχόμενη υγρασία των υλικών η οποία όμως εξισορροπείται στην κατάσταση δυναμικής ισορροπίας του δομικού στοιχείου, οπότε και μπορεί να παραβλεφτεί. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοπερατότητας για κάθε σενάριο καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου παρουσιάζονται στον πίνακα 25. Ακολουθούν τα διαγράμματα των εποχιακών τιμών θερμοπερατότητας για κάθε σενάριο ξεχωριστά (Εικόνες 84,85,86,87,88).

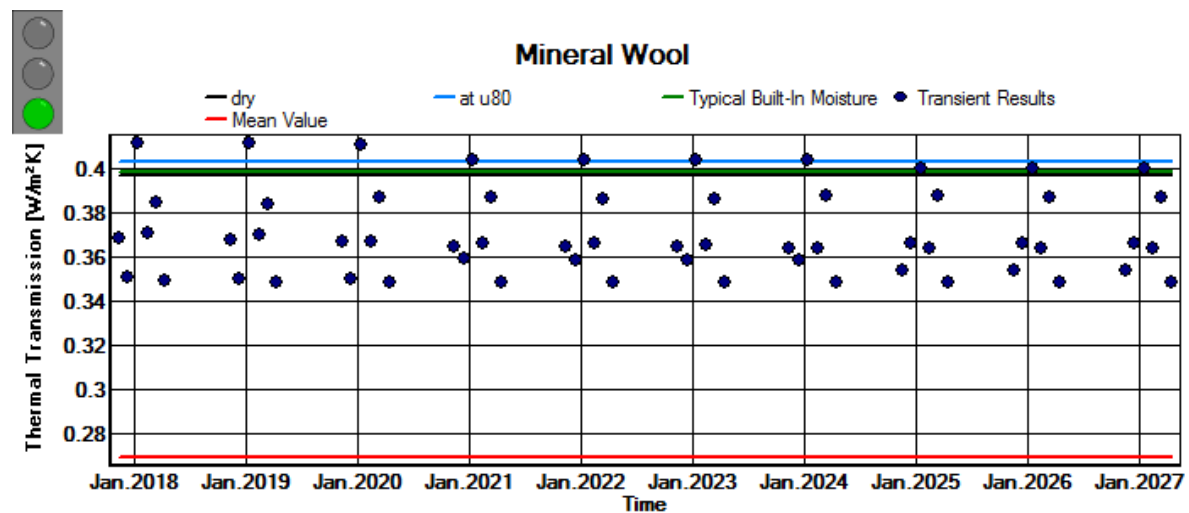
Πίνακας 25: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοπερατότητας σύγκριση με τον συντελεστή θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου

Θερμοπερατότητα (W/m <sup>2</sup> K)	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 0
U value	0.401	0.516	0.484	0.386	1.996
min	0.348	0.433	0.404	0.330	1.756
max	0.412	0.753	0.482	0.397	2.033

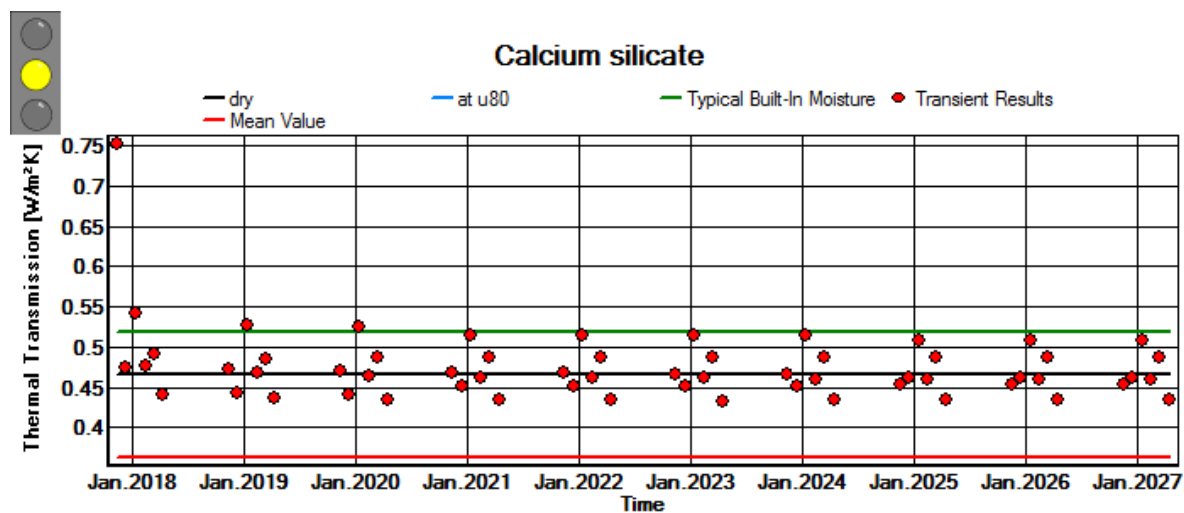




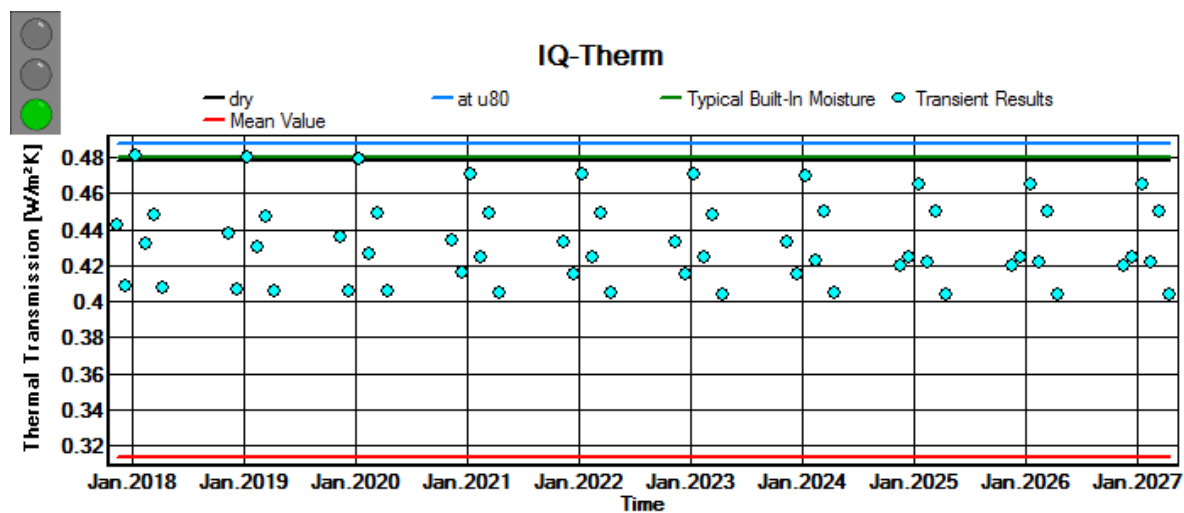
Εικόνα 84: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 0 – Χωρίς θερμομόνωση



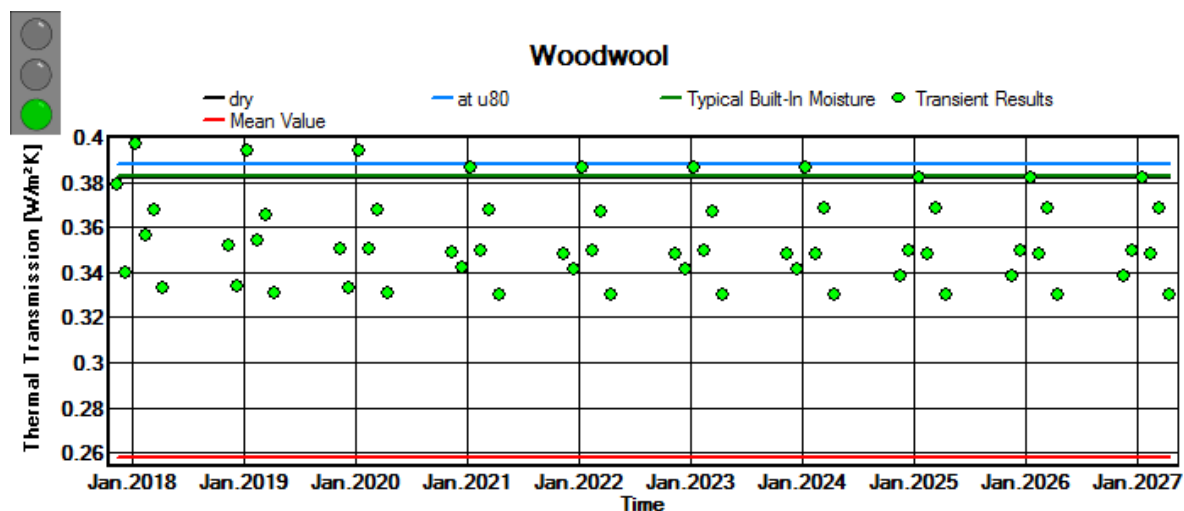
Εικόνα 85: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 1 – Ορυκτοβάμβακας



Εικόνα 86: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 2 – Μόνωση πυριτικού ασβεστίου



Εικόνα 87: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 3 – Σύστημα μόνωσης iQ-Therm



Εικόνα 88: Τιμές θερμοπερατότητας – Σενάριο 4 – Μόνωση από ίνες ξύλου

### 9.3 Συμπεράσματα υγραυθερμικής ανάλυσης

Από τα τέσσερα σενάρια που εξετάστηκαν το μικρότερο πάχος μόνωσης προσφέρεται από το σενάριο 3 (iQ-Therm), ενώ ο χαμηλότερος συντελεστής θερμοπερατότητας από το σενάριο 4 (πλάκα από ίνες ξύλου).

**Στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας – θερμομόνωσης** η υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και σχετική υγρασία συναντούνται στο σενάριο 1 (ορυκτοβάμβακας), ενώ οι χαμηλότερες τιμές στο σενάριο 4 (πλάκα από ίνες ξύλου). Για το σενάριο 1 η σχετική υγρασία έχει μη αποδεκτή τιμή για τα πρώτα τρία έτη μετά την επέμβαση.

Το σενάριο 1 (ορυκτοβάμβακας) παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει κρίσιμη συμπεριφορά για την εμφάνιση μούχλας μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα, η σχετική υγρασία στη διεπιφάνεια δεν ξεπερνά το 85%. Αντίθετα τα σενάρια 2 (πλάκα πυριτικού ασβεστίου) και 3 (iQ-Therm) παρουσιάζουν σχετική υγρασία που ξεκινά από το 100% και το 95% αντίστοιχα.

**Στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας** η υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία συναντάται στο σενάριο 3 (iQ-Therm) ενώ οι χαμηλότερες στα σενάρια 1 (ορυκτοβάμβακας) και 4 (πλάκα από ίνες ξύλου), ενώ η σχετική υγρασία κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα RH:40-60% για όλα τα σενάρια. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται αν λάβουμε υπόψη ότι το σύστημα iQ-Therm έχει την ιδιότητα μέσω τριχοειδών φαινομένων να διαχέει την περιεχόμενη υγρασία προς την εσωτερική επιφάνεια για γρηγορότερο στέγνωμα της και επίσης ότι το σενάριο 1 μόνωσης με ορυκτοβάμβακα περιλαμβάνει φράγμα υδρατμών που εμποδίζει την υγρασία από το εξωτερικό περιβάλλον να εισχωρήσει στο εσωτερικό του κτιρίου. Οπότε στην περίπτωση του σεναρίου 1 τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που εμφανίζονται στην διεπιφάνεια τοιχοποιίας – θερμομόνωσης δεν μπορούν να εκτονωθούν προς το εσωτερικό του κτιρίου αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο εμφάνισης μούχλας.

Από το συνολικό διάγραμμα του δείκτη ανάπτυξης μούχλας μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης προκύπτει ότι τα Σενάρια 2 και 3 παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας. Συγκεκριμένα για το σενάριο 2 ο κίνδυνος αυτός παρουσιάζεται κατά τα πρώτα τέσσερα χρόνια μετά την εφαρμογή της μόνωσης, ενώ για το σενάριο 3 μόλις τους έξι πρώτους μήνες μετά την εφαρμογή.

Η θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για όλα τα σενάρια θερμομόνωσης με εποχιακή διακύμανση από 19.3-22.3°C, αντίθετα για το Σενάριο 0 – απουσία θερμομόνωσης - η θερμοκρασία κυμαίνεται από 16-23.5°C. Οι διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία με την ύπαρξη ή όχι θερμομόνωσης είναι ενδεικτικές της εξοικονόμησης ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών σε ψύξη και θέρμανση του κτιρίου.

Από τον συνοπτικό πίνακα που παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 26), η επιλογή του βέλτιστου σεναρίου θερμομόνωσης είναι το σενάριο 4.

Πίνακας 26: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων υγραυθερμικής ανάλυσης για τα τέσσερα υπό μελέτη σενάρια

	πάχος συστήματος θερμομόνωσης (m)	Uvalue (W/m <sup>2</sup> K)	WC&RH τοιχοποιία - θερμομόνωση	WC εσωτερική επιφάνεια	Mould index
Σενάριο 1 (ορυκτοβάμβακας)	0.093	0.401	●	●	
Σενάριο 2 (πλάκα πυριτικού ασβεστίου)	0.145	0.516			●
Σενάριο 3 (iQ- Therm)	0.067	0.484		●	●
Σενάριο 4 (πλάκα από ίνες ξύλου)	0.103	0.386	●	●	

## 10. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια παράλληλης προσέγγισης των διεπιστημονικών αντικειμένων της αποκατάστασης - συντήρησης και της βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς με εφαρμογή σε παραδοσιακό κτίριο από φέρουσα τοιχοποιία. Το αντικείμενο εμπλέκει πολλούς επιστημονικούς τομείς (στατική – δυναμική ανάλυση, τεχνολογία υλικών, εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα) και έχει επιπλέον την ιδιαιτερότητα ότι κάθε κτίριο παρουσιάζει ξεχωριστά χαρακτηριστικά, οπότε δεν υπάρχουν ενδεδειγμένες λύσεις που να μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά κρίνεται σκόπιμη η παράλληλη αντιμετώπιση ζητημάτων που αφορούν την αποκατάσταση - συντήρηση και επανάχρηση ενός κτιρίου και την ενεργειακή του αναβάθμιση από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού ενός έργου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η διαφύλαξη του υφιστάμενου ιστορικού κτιριακού αποθέματος, η προστασία των δομικών μελών των ιστορικών κτιρίων, η δημιουργία συνθηκών άνεσης για τους χρήστες και η μείωση των λειτουργικών εξόδων του κτιρίου.

### Συμπεράσματα από τη δυναμική ανάλυση της κατασκευής

Οι δύο φορείς που μελετήθηκαν, το κέλυφος και ο μεταλλικός σκελετός, παρουσιάζουν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά και ως εκ τούτου διεγείρονται από διαφορετικής συχνότητας σεισμικά γεγονότα. Το κέλυφος – φέρουσα τοιχοποιία – στέκεται ασκεπές από το 1985. Μια αλλαγή στον στατικό φορέα του (π.χ. προσθήκη οροφής από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος) θα σήμαινε και αλλαγή της συμπεριφοράς του σε ενδεχόμενο σεισμό.

Από την ανάλυση των **τριών σεισμικών γεγονότων** που επιβλήθηκαν στο υφιστάμενο κέλυφος και τον μεταλλικό σκελετό προκύπτει ότι ο σεισμός στην Ιρπίνια προκαλεί τις μέγιστες μετατοπίσεις για το κέλυφος, ενώ ο μεταλλικός σκελετός παρουσιάζει μέγιστες μετατοπίσεις τόσο από τη σεισμική διέγερση του σεισμού στην Ιρπίνια όσο και αυτή της Αθήνας.

Η **σύνδεση των δύο φορέων στην οροφή και σε κάθε όροφο** προκαλεί μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων του κελύφους και αύξηση των μετατοπίσεων του μεταλλικού σκελετού. Η μείωση των μετατοπίσεων για το κέλυφος κυμαίνεται στα 2-3cm για σύνδεση μόνο στην οροφή και σε 3-4cm για σύνδεση σε κάθε όροφο. Αντίστοιχα η αύξηση των μετατοπίσεων για τον μεταλλικό σκελετό κυμαίνεται από 0-6cm για σύνδεση μόνο στην οροφή και από 1-4cm για σύνδεση σε κάθε όροφο. Η κίνηση των δύο φορέων στους τρεις κύριους άξονες παρουσιάζει την ίδια μορφή και για τις τρεις περιπτώσεις σύνδεσης, που προσομοιάζει τη διέγερση του ασύνδετου κελύφους, με εύρος μετατοπίσεων που μειώνεται για το κέλυφος και αυξάνεται για τον μεταλλικό σκελετό. Ο μεταλλικός σκελετός λοιπόν συγκρατεί την τοιχοποιία μειώνοντας τις εκτός επιπέδου μετατοπίσεις. Αυτό αποτελεί προτέρημα της μεταλλικής κατασκευής – ελαφριάς κατασκευής, σε σύγκριση με έναν φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα ο οποίος πιθανότατα θα αύξανε τις εκτός επιπέδου μετατοπίσεις.

Η μείωση των μετατοπίσεων για το κέλυφος συνοδεύεται από αύξηση της καταπόνησης του τοπικά στα σημεία σύνδεσης. Οι μέγιστες εφελκυστικές κύριες τάσεις παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση, για την περίπτωση σύνδεσης μόνο στην οροφή, στην ζώνη σύνδεσης και ανέρχονται στα  $6641 \text{ kN/m}^2$ . Η σύνδεση των δύο φορέων με συνδέσμους (rigid links) μεταξύ ενός κόμβου του κελύφους και ενός

κόμβου του μεταλλικού σκελετού αυξάνει τοπικά τις τάσεις με κίνδυνο για την ακεραιότητα της τοιχοποιίας, μια σύνδεση μέσω πλαισίου θα έδινε μια πιο ομοιόμορφη κατανομή.

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 27) συνοψίζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, για τους δύο ασύνδετους φορείς, για τα τρία σεισμικά γεγονότα που μελετήθηκαν και για το σεισμό στην Ιρπίνια για σύνδεση στην οροφή και σε κάθε όροφο. Για την οριζόντια διεύθυνση X και για την κατακόρυφη Y, οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις καταγράφονται για το σεισμό της Ιρπίνια και σύνδεση στην οροφή και κυμαίνονται στα 15cm και 13cm αντίστοιχα, ισομοιρασμένες στους δύο φορείς. Για την οριζόντια διεύθυνση Z οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις καταγράφονται για το σεισμό της Ιρπίνια και ασύνδετους φορείς και προσεγγίζουν τα 10cm.

Η σύνδεση μόνο στην οροφή προκαλεί μεγάλη αύξηση των μέγιστων μετατοπίσεων του μεταλλικού σκελετού για τον οριζόντιο άξονα X και τον κατακόρυφο άξονα Z, με σύνδεση σε κάθε όροφο το φαινόμενο μετριάζεται και οι συνολικές μετατοπίσεις μειώνονται αλλά παραμένουν ισομοιρασμένες μεταξύ κελύφους και μεταλλικού σκελετού.

**Πίνακας 27: Μέγιστες μετατοπίσεις στους τρεις κύριους άξονες για τα τρία σεισμικά γεγονότα**

		X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Αθήνα	Κέλυφος	5.771	4.455	2.791
	Μεταλλικός σκελετός	1.912	2.626	1.878
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>7.683</b>	<b>7.081</b>	<b>4.669</b>
Χανιά	Κέλυφος	0.639	0.914	0.562
	Μεταλλικός σκελετός	0.583	1.334	0.613
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>1.222</b>	<b>2.248</b>	<b>1.175</b>
Ιρπίνια χωρίς σύνδεση	Κέλυφος	9.823	8.219	6.727
	Μεταλλικός σκελετός	1.396	0.904	3.25
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>11.219</b>	<b>9.123</b>	<b>9.977</b>
Σύνδεση στην οροφή	Κέλυφος	7.894	6.681	3.611
	Μεταλλικός σκελετός	7.478	6.556	3.028
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>15.372</b>	<b>13.237</b>	<b>6.639</b>
Σύνδεση σε κάθε όροφο	Κέλυφος	5.94	5.798	2.593
	Μεταλλικός σκελετός	5.596	5.887	2.095
<b>Συνολική μετατόπιση</b>		<b>11.536</b>	<b>11.685</b>	<b>4.688</b>

### Συμπεράσματα από την υγροθερμική ανάλυση της κατασκευής

Από τα τέσσερα σενάρια συστημάτων εσωτερικής θερμομόνωσης που εξετάστηκαν το μικρότερο πάχος μόνωσης προσφέρεται από το σενάριο 3 (iQ-Therm) – 6.7cm, ενώ ο χαμηλότερος συντελεστής θερμοπερατότητας από το σενάριο 4 (πλάκα από ίνες ξύλου)  $U=0.386W/m^2K$ .



**Στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας – θερμομόνωσης** η υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και σχετική υγρασία συναντώνται στο σενάριο 1 (ορυκτοβάμβακας), ενώ οι χαμηλότερες τιμές στο σενάριο 4 (πλάκα από ίνες ξύλου). Για το σενάριο 1 η σχετική υγρασία έχει μη αποδεκτή τιμή για τα πρώτα τρία έτη μετά την επέμβαση.

Στο σενάριο 1 (ορυκτοβάμβακας) παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει κρίσιμη συμπεριφορά για την εμφάνιση μούχλας μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την εφαρμογή, η σχετική υγρασία στη διεπιφάνεια δεν ξεπερνά το 85%. Αντίθετα τα σενάρια 2 (πλάκα πυριτικού ασβεστίου) και 3 (iQ-Therm) παρουσιάζουν σχετική υγρασία που ξεκινά από το 100% και το 95% αντίστοιχα.

**Στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας** η υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία συναντάται στο σενάριο 3 (iQ-Therm) ενώ οι χαμηλότερες στα σενάρια 1 (ορυκτοβάμβακας) και 4 (πλάκα από ίνες ξύλου), ενώ η σχετική υγρασία κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα RH:40-60% για όλα τα σενάρια. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται αν λάβουμε υπόψη ότι το σύστημα iQ-Therm έχει την ιδιότητα μέσω τριχοειδών φαινομένων να διαχέει την περιεχόμενη υγρασία προς την εσωτερική επιφάνεια για γρηγορότερο στέγνωμα της και επίσης ότι το σενάριο 1 (μόνωση με ορυκτοβάμβακα) περιλαμβάνει φράγμα υδρατμών που εμποδίζει την υγρασία από το εξωτερικό περιβάλλον να εισχωρήσει στο εσωτερικό του κτιρίου. Οπότε στην περίπτωση του σεναρίου 1 τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που εμφανίζονται στην διεπιφάνεια τοιχοποιίας – θερμομόνωσης δεν μπορούν να εκτονωθούν προς το εσωτερικό του κτιρίου αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο εμφάνισης μούχλας.

Από το συνολικό διάγραμμα του δείκτη ανάπτυξης μούχλας μεταξύ τοιχοποιίας και θερμομόνωσης προκύπτει ότι τα Σενάρια 2 και 3 παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας. Συγκεκριμένα για το σενάριο 2 ο κίνδυνος αυτός παρουσιάζεται κατά τα πρώτα τέσσερα χρόνια μετά την εφαρμογή της μόνωσης, ενώ για το σενάριο 3 μόλις τους έξι πρώτους μήνες μετά την εφαρμογή.

Η θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για όλα τα σενάρια θερμομόνωσης με εποχιακή διακύμανση από 19.3-22.3°C, αντίθετα για το Σενάριο 0 – απουσία θερμομόνωσης - η θερμοκρασία κυμαίνεται από 16-23.5°C. Οι διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία με την ύπαρξη ή όχι θερμομόνωσης είναι ενδεικτικές της εξοικονόμησης ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών σε ψύξη και θέρμανση του κτιρίου.

Από τον συνοπτικό πίνακα (Πίνακας 26), η επιλογή του βέλτιστου σεναρίου θερμομόνωσης είναι το σενάριο 4, ενώ το σενάριο 3 αποτελεί επίσης αποδεκτό σενάριο εσωτερικής θερμομόνωσης για το υπό μελέτη κτίριο και προσφέρει μικρότερο πάχος μόνωσης, άρα αύξηση της ωφέλιμης εσωτερικής επιφάνειας.

### Τελικά συμπεράσματα

Το υπό μελέτη κτίριο είναι τετραώροφο με ενιαίο όγκο και ύψος και στην αρχική του κατάσταση ήταν καλυμμένο με δώμα. Σύμφωνα με την πρόταση επανάχρησης, ο μεταλλικός σκελετός αναλαμβάνει τη διαμόρφωση δύο ορόφων και δώματος. Στην αρχική του μορφή ο κάθε όροφος καταλάμβανε ωφέλιμη επιφάνεια 41.28m<sup>2</sup>, ενώ για την πρόταση επανάχρησης με την τοποθέτηση του μεταλλικού σκελετού σε απόσταση τουλάχιστον 22cm από το υφιστάμενο κέλυφος η ωφέλιμη

επιφάνεια μειώνεται στα  $35.6\text{m}^2$ . Σε αντιστάθμισμα αυτού έχουμε όμως βελτίωση των συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου με αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας κατά  $3.3^\circ\text{C}$  τους χειμερινούς μήνες και μείωση κατά  $1.2^\circ\text{C}$  κατά τους θερινούς μήνες και αντίστοιχη επακόλουθη μείωση των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου για ψύξη και θέρμανση, χωρίς να κινδυνεύει η υφιστάμενη τοιχοποιία από φαινόμενα σχηματισμού μούχλας ή αποσάθρωση. Στην περίπτωση ασύνδετων φορέων η αυτονομία του μεταλλικού σκελετού προσφέρει το πλεονέκτημα ευκολότερης εφαρμογής της εσωτερικής θερμομόνωσης με δημιουργία λιγότερων κατασκευαστικών θερμογεφυρών άρα και λιγότερων τρωτών σημείων στην κατασκευή. Από στατικής άποψης και δεδομένου του γεγονότος ότι το υφιστάμενο κέλυφος παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά, παρά το γεγονός ότι παραμένει ασκεπές και εκτεθειμένο στα καιρικά φαινόμενα από το 1985, ο διαχωρισμός των δύο φορέων και η ανεξάρτητη λειτουργία τους προστατεύει το υφιστάμενο κέλυφος από τον κίνδυνο εμβολισμού από τον εσωτερικό μεταλλικό σκελετό σε ενδεχόμενο σεισμό. Από την άλλη πλευρά η σύνδεση των δύο φορέων σε επίπεδο κάθε ορόφου συνεπάγεται μεγάλη μείωση των μετατοπίσεων του κελύφους για το συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός που μελετήθηκε. Μια τεchnοοικονομική μελέτη θα έδινε την απάντηση σχετικά με τη βέλτιστη λύση σύνδεσης και εφαρμογής θερμομόνωσης.

### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από την ολοκλήρωση της υφιστάμενης εργασίας προκύπτει ένα σύνολο προτάσεων για μελλοντική έρευνα και εμβάθυνση σε τομείς όπου δόθηκε λιγότερη βαρύτητα. Συγκεκριμένα οι προτάσεις αφορούν:

- Προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας (μέτρο ελαστικότητας, λόγος του Poisson) με μη καταστρεπτικούς ελέγχους στο πεδίο, όπως η μέθοδος υπερήχων, κρουσιμέτρηση, κρουστική μέθοδος με παλμογράφο και χρήση τους στην προσομοίωση του μοντέλου στο λογισμικό Marc-Mentat.
- Διεξαγωγή πειραμάτων στο εργαστήριο ή στο πεδίο για παράλληλο έλεγχο της υgroθερμικής συμπεριφοράς φέρουσας τοιχοποιίας μετά από την επιβολή των προτεινόμενων συστημάτων εσωτερικής θερμομόνωσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από το λογισμικό προσομοίωσης.
- Ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου και υπολογισμός των ενεργειακών του αναγκών μετά την εφαρμογή παθητικών και ενεργητικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας
- Μελέτη για ενσωμάτωση συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με κριτήρια οικονομικοτεχνικά και αισθητικά (ηλιοθερμικά, φωτοβολταϊκά συστήματα, επιφανειακή γεωθερμία)
- Προσομοίωση της συνοριακής συνθήκης της μεσοτοιχίας με το γειτονικό κτίριο ως ελαστικής στήριξης που εξαρτάται από τη δυσκαμψία του γειτονικού κτιρίου και όχι ως ακλόνητο όριο (μηδενική μετατόπιση στον άξονα κάθετο στην τοιχοποιία).
- Σύνδεση του κελύφους και του μεταλλικού σκελετού μέσω πλαισίου για ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων.
- Τεchnοοικονομική μελέτη για την εύρεση της βέλτιστης κατασκευαστικής λύσης για σύνδεση των δύο φορέων και μείωση των θερμικών απωλειών.

## 11. Βιβλιογραφία

- [1] A. Troi, 'Historic buildings and city centres – the potential impact of conservation compatible energy refurbishment on climate protection and living conditions', Energy Management in Cultural Heritage, Dubrovnik, Croatia, 2011
- [2] European Commission – Energy, from: [ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings_en.htm)
- [3] Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (αναδιατύπωση), άρθρο 4
- [4] International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964), ICOMOS – International Council on Monuments and Sites
- [5] J.A. Ivanovi]-Šekularac, J.Lj. Cikić Tovarovic, and N.D. Šekularac, 'Restoration and conversion to re-use of historic buildings incorporating increased energy efficiency. A Case Study – the Hayarn Complex, Hilandar Monastery, Mount Athos', Thermal Science, Vol.20, No.4, pp. 1363-1376, 2016
- [6] J.E. Hensley, A. Aguilar, 'Improving Energy Efficiency in Historic Buildings', Preservation Briefs 3, DC: Technical Preservation Services Division, National Park Service, US, Department of the Interior, Washington, 2011
- [7] Α.Σ. Καλλιγας, Α.Γ. Ρωμανός, 'Δήμος Χανίων - Μητρώο κτηρίων μεσαιωνικής πόλεως Χανίων', τεύχος 1, 1994
- [8] Περιφέρεια Κρήτης, υποπρόγραμμα «Εφαρμογή» ΠΕΠ Κρήτης 1994-1999. 'Μελέτη των συνεπειών ενός καταστροφικού σεισμού στην Παλιά πόλη Χανίων και μέτρα αντιμετώπισης των'. Φορέας εκτέλεσης: ΤΕΕ – τμήμα δυτικής Κρήτης, 1996
- [9] [iakonos-xania.blogspot.gr/2012/12/blog-post\\_30.html](http://iakonos-xania.blogspot.gr/2012/12/blog-post_30.html)
- [10] Επίσημο δίκτυο της ΕΜΥ για Μετεωρολογικό Σταθμό Σούδας
- [11] Α. Κλάδου – Μπλέτσα, 'Τα Χανιά έξω από τα τείχη', Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας – Τμήμα Δυτικής Κρήτης, Αθήνα, 1998
- [12] ΤΕΕ Δυτικής Κρήτης, 'Στρατηγικός σχεδιασμός αναβάθμισης και προστασίας της Μεσαιωνικής Πόλης Χανίων – Δυνατότητα ένταξης στον κατάλογο της Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της UNESCO', 7η Συνδιάσκεψη Περιφερειακών Νησιωτικών τμημάτων ΤΕΕ- Πολιτιστική Αρχιτεκτονική Κληρονομιά και Περιβάλλον, η Συμβολή τους στην Ανάπτυξη των Νησιών μας, 2009
- [13] Γ. Ανδρεάκη, Πολεοδομική μελέτη της πόλης των Χανίων, εργασία στα πλαίσια του προπτυχιακού μαθήματος 'Ιστορία πόλης και πολεοδομίας' διδάσκουσα Δ. Διμέλλη, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014
- [14] [www.chaniahistory.gr](http://www.chaniahistory.gr)
- [15] Α. Ανδρεάδης, Γ. Δασκαλάκης, 'Η Παλαιά Πόλη των Χανίων', εργασία στο μάθημα Πολεοδομικός Σχεδιασμός II, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015
- [16] [www.icomos.org/en/about-icomos/mission-and-vision/history](http://www.icomos.org/en/about-icomos/mission-and-vision/history)
- [17] Φ. Μαλλούχου – Tufano. Ιστορία – θεωρία – κριτική αποκατάστασης μνημείων. Σημειώσεις μαθήματος.

- [18] The ICOMOS Charter for the Interpretation and Presentation of Cultural Heritage Sites - Revised under the Auspices of the ICOMOS International Scientific Committee on Interpretation and Presentation , 2007
- [19] F. Bandarin, R. V. Oers, 'The Historic Urban Landscape: Managing Heritage in an Urban Century', Wiley-Blackwell, 2012
- [20] The Valletta Principles for the Safeguarding and Management of Historic Cities, Towns and Urban Areas. Final draft integrating comments received from the ICOMOS Advisory and Executive Committees, for distribution to the ICOMOS membership in view of submission to the 17th ICOMOS General Assembly. CIVVIH, 2010
- [21] Ε. Ταυλοπούλου, 'Μελέτη αποκατάστασης ενός παραδοσικού κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία στο Βάμο', Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2015
- [22] Θ. Τσιναράκης, 'Αποτίμηση φέροντος οργανισμού νότιου ενετικού νεωρίου Χανίων "Benedetto Moro" με ιδιομορφική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων', Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2011
- [23] B.P. Leftheris, M.E. Stavroulaki, A.C. Sapounaki, G.E. Stavroulakis, 'Computational Mechanics for Heritage Structures, WIT Press, 2006
- [24] V. G. Srisanthi, Lakshmi Keshav, P. Poorna Kumar, T. Jayakumar, 'Finite Element and Experimental Analysis of 3D Masonry Compressed Stabilised Earth Block and Brick Building Models against Earthquake Forces', Periodica Polytechnica, pp255-265, 2014
- [25] S. Rosenhaupt, Y. Sokal, "Masonry Walls on Continuous Beams", J. Structural Division, ASCE, Vol. 91, No ST1, 1965, pp. 155-171.
- [26] C.B. Saw, "Linear Elastic Finite Element Analysis of Masonry Walls on Beams", Building Science, Vol. 9, 1974, pp. 299-307.
- [27] M. Dhanasekar, A. W. Page, P. W. Kleeman, "A Finite Element Model for the In-Plane Behavior of Brick Masonry", Proc. 9th Australasian Conference on Mechanisms of Structures, 1984, pp. 262-267.
- [28] B.S. Smith, K. M. K. Rahman, "The Variation of Stress in Vertically Loaded Brickwork Walls", Proc. Inst. of Civil Engineers, Voi. 43, 1972, pp. 689-700.
- [29] Α. Τσιτωνάκη, 'Ιστορική, αρχιτεκτονική τεκμηρίωση και ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων του 'Κυκλικού (Γενοβέζικου) πύργου' στην Παλιά Πόλη Χανίων, ανάγκη διεπιστημονικής προσέγγισης, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015
- [30] S. Cattari, A. Karatzetzou, S. Degli Abbatì, K. Gkotsi, D. Pitilakis, C. Negulescu, 'Performance-based assessment of the arsenal de Milly of the medieval city of Rhodes', 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos, 2013
- [31] P. Pells, 'Substance and mass properties for the design of engineering structures in the Hawkesbury sandstone', Australian Geomechanics Vol 39, Sydney, 2004
- [32] M. Ludovico-Marques, C. Chastre, G. Vasconcelos, 'Modelling the compressive mechanical behaviour of granite and sandstone historical building stones' Vol 28, Construction and Building Materials, 2012
- [33] Γ.Ι. Τσαμασφύρος, Ε.Ε. Θεοτόκογλου, 'Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων Ι', Αθήνα 2000

- [34] Ε.Ι. Σαπουντζάκης, 'Δυναμική ανάλυση ραβδωτών φορέων – Πολυβάθμια συστήματα', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [35] S.P. Bjarlov, G.R. Finken, T. Odgaard, 'Retrofit with Interior Insulation on Solid Masonry Walls in Cool Temperate Climates – An Evaluation of the influence of Interior Insulation Materials on Moisture Condition in the Building Envelope', 6th International Building Physics Conference, 2015
- [36] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας – Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος, 'Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000', 2001
- [37] MSC Software - Marc 2015, 'User's Guide: Volume B: Element Library', 2015
- [38] Ε.Β. Λιαράκος, 'Αριθμητική διερεύνηση κριτηρίων αστοχίας και μεθόδων ενίσχυσης κατασκευών από τοιχοποιία', Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2008
- [39] A. Troi, EURAC research, Z. Bastian, Passive House Institute, 'Energy efficiency solutions for historic buildings – A Handbook', Birkhäuser, 2013
- [40] Ανάπτυξη Καινοτόμων Θερμομονωτικών Ψυχρών Υλικών με βάση την εξηλασμένη πολυστερίνη για την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων και νεόδμητων κτιρίων» (DICOM), 09ΣΥΝ-32-1174 Παραδοτέο: "Τεχνικές Προδιαγραφές Ιδιοτήτων Υλικών", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, 2015
- [41] We Qualify – "Εγχειρίδιο για εγκαταστάτες εξωτερικής και συμβατικής θερμομόνωσης", 2015
- [42] Α.Μ. Παπαδόπουλος, Καθηγητής Α.Π.Θ., 'Προδιαγραφές ιδιοτήτων θερμομονωτικών υλικών – Σχεδιασμός & Ανάπτυξη Καινοτόμων Προϊόντων Πετροβάμβακα για την Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων και Νεόδμητων Κτιρίων', Θεσσαλονίκη, 2004
- [43] Ν. Κ. Μπάρκας, 'Σημειώσεις του μαθήματος – Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική τεχνολογία II'
- [44] [wufi.de/de/2015/11/06/innendaemmung-im-test/](http://wufi.de/de/2015/11/06/innendaemmung-im-test/)
- [45] iQ-Therm – Die intelligenteste Innendaemmung. Remmers
- [46] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010, 'Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων', 2010
- [47] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, 'Αναλυτικές Εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης', 2012
- [48] S.P. Bjarlov, G.R. Finken, T. Odgaard, 'Retrofit with Interior Insulation on Solid Masonry Walls in Cool Temperate Climates – An Evaluation of the influence of Interior Insulation Materials on Moisture Condition in the Building Envelope', 6th International Building Physics Conference, 2015
- [49] P. Wegerer, J. N. Nackler, T. Bednar, 'Measuring the Hygrothermal Performance of an Interior Insulation made of Woodfibre Boards', 6th International Building Physics Conference, 2015
- [50] [wufi.de/en/software/wufi-pro/](http://wufi.de/en/software/wufi-pro/)
- [51] WUFI Pro 5 Manual

- [52] H. Viitanen, J. Vinha, K. Salminen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, L. Paajanen, K. Lähdesmäki, 'Moisture and biodeterioration risk of building materials and structures', *Journal of Building Physics*, Vol 33 Issue 3, 2009, pp. 201-224
- [53] H. A. Viitanen et al., "The critical conditions causing mould and decay problems in buildings", in *User-oriented and cost effective management, maintenance and modernization of building facilities*, CIBW70 Helsinki '96 Symposium, Helsinki, Sep. 2–4, 1996, H. Aikivuori and A. Aikivuori, Eds., Association of Finnish Civil Engineers RIL, 1996, pp. 435–438.