



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΠΜΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση θερμικών δεδομένων και μοντελοποίηση στο πλαίσιο του
θερμοϋγρικού προβλήματος του αποκατεστημένου Ιερού Κουβουκλίου
του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα»

ΑΓΑΠΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : Αντωνία Μοροπούλου
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2019

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)
- Καθ. Χ. Μαρούλης, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ
- Δρ. Μ. Καρόγλου, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Μ. Ασημακόπουλος, ΕΔΙΠ Σχ. ΠΜ ΕΜΠ

Επιτροπή Εξέτασης

- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Καθ. Χ. Μαρούλης, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ
- Δρ. Μ. Καρόγλου, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Μ. Ασημακόπουλος, ΕΔΙΠ Σχ. ΠΜ ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες, στην Καθηγήτρια ΕΜΠ Αντωνία Μοροπούλου για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω σε ένα τόσο μοναδικό και μεγαλειώδες έργο αυτό της αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου στα Ιεροσόλυμα καθώς και την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ την Διδάκτορα μέλος ΕΔΙΠ ΕΜΠ κυρία Μ. Καρόγλου για την επιστημονική υποστήριξη, την καθοδήγηση καθώς και για την ηθική ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη της καθ' όλο το διάστημα συνεργασίας μας.

Οφείλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της επιστημονικής ομάδας που δημιούργησαν ένα άριστο κλίμα συνεργασίας κατά την παραμονή μου στο έργο καθώς και τον Χ. Μουζάκη Επικ. Καθ. ΕΜΠ και τον Μ. Ασημακόπουλο ΕΔΙΠ ΕΜΠ για τις χρήσιμες συμβουλές και παροτρύνσεις τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που στέκονται πάντα δίπλα μου, με στηρίζουν και με βοηθούν να πραγματοποιήσω τα όνειρά μου.

Περίληψη

Η εργασία αυτή είναι μέρος του συνολικού σχεδίου διαχείρισης παρακολούθησης του Ιερού Μνημείου για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας του μέσω της τεκμηρίωσης των περιβαλλοντικών και μικροπεριβαλλοντικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα.

Η μέτρηση και αξιολόγηση των θερμοϋγρικών συνθηκών στην πάροδο του χρόνου, συλλέγοντας και αναλύοντας δεδομένα, συνεισφέρει στον προσδιορισμό της παθολογίας του μνημείου και εξασφαλίζει διορθωτικά μέτρα για την δομική ακεραιότητα του.

Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε μακροσκοπική παρατήρηση στο σύνολο του μνημείου για τον εντοπισμό και τη φωτογραφική αποτύπωση των χαρακτηριστικών σημείων και επιφανειών που παρουσίαζαν φαινόμενα ενδείξεων υγρασίας και συναφών αλλοιώσεων.

Για ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις τοποθετήθηκαν ατμοσφαιρικοί αλλά και εντοιχισμένοι ασύρματοι και ενσύρματοι αισθητήρες τελευταίας τεχνολογίας για τη μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας προκειμένου να καταγραφεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα πάνω στο Ιερό Μνημείο.

Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τα κλιματολογικά δεδομένα της πόλης των Ιεροσολύμων και με χρήση υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε μοντέλο απόκρισης του Ιερού Κουβουκλίου στις θερμοκρασιακές μεταβολές ανά εποχή στη διάρκεια ενός έτους.

Λόγω της έντασης των φαινομένων κρίθηκε αναγκαία η άμεση εγκατάσταση στο μνημείο κατάλληλου συστήματος αφύγρανσης και εξαερισμού για τη μελλοντική διασφάλιση των επιθυμητών συνθηκών.

Τέλος, για την ολοκλήρωση της πρότασης αποκατάστασης, ακολουθεί μια σειρά αναγκαίων μελλοντικών επεμβάσεων.

Abstract

This dissertation is part of the overall monitoring management plan of the Holly Tomb, to ensure its viability through the documentation of environmental and micro-environmental phenomena.

Measuring and evaluating thermal conditions over time, collecting and analyzing data, contributes to the determination of the monument's pathology and ensures corrective measures for its structural integrity.

In this context, a macroscopic observation was made throughout the monument to identify and photograph the characteristic spots and surfaces that showed signs of moisture and associated deterioration.

For accurate and reliable measurements, were installed wireless atmospheric and wired built-in sensors, for measuring temperature and relative humidity to record the environmental footprint on the Sacred Monument.

Then, taking into account the climatic data of the city of Jerusalem and using finite element analysis, a model of the Holy Tomb was developed to present the temperature changes per season over a year.

Due to the intensity of the phenomena, it was considered necessary to immediately install in the monument an appropriate dehumidification and ventilation system in order to secure the desired conditions in the future.

Finally, a number of necessary future interventions follow in order to complete the rehabilitation proposal.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I.	Θεωρητικό Μέρος.....	1
1.	Η φθορά των δομικών υλικών.....	1
1.1	Μηχανικοί παράγοντες φθοράς.....	3
1.2	Χημικοί παράγοντες φθοράς.....	5
1.3	Βιολογικοί παράγοντες φθοράς.....	9
2.	Φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας.....	10
2.1	Προέλευση της υγρασίας.....	10
2.2	Φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας στα δομικά υλικά	14
2.2.1	Τριχοειδής αναρρίχηση	14
2.2.2	Η συμπύκνωση της υγρασίας.....	17
2.3	Επίδραση της υγρασίας στα δομικά υλικά.....	17
2.4	Διαγνωστικός έλεγχος της υγρασίας.....	22
2.5	Τεχνικές για την αντιμετώπιση της υγρασίας.....	25
3.	Φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας	32
3.1	Αγωγή.....	33
3.2	Συναγωγή	35
3.3	Θερμική ακτινοβολία	37
3.4	Θερμοφυσικές ιδιότητες της ύλης.....	39
3.5	Αγωγή θερμότητας μέσα από τοίχο.....	42
3.5.1	Η έννοια της θερμικής αντίστασης.....	43
II.	Ειδικό θεωρητικό	46
1.	Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	46
1.1	Πλεονεκτήματα της μεθόδου	47
1.2	Τα στάδια ανάλυσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.....	48
1.3	Εφαρμογές της μεθόδου.....	50
III.	Πειραματικό μέρος.....	55
1.	Σκοπός και Σχεδιασμός.....	55
2.	Κλιματολογικά δεδομένα και τοποθεσία	57
3.	Μακροσκοπική παρατήρηση και φωτογραφική τεκμηρίωση	64
4.	Συστήματα παρακολούθησης θερμοκρασίας – υγρασίας.....	70
4.1	Ατμοσφαιρικοί ασύρματοι αισθητήρες.....	71
4.2	Εντοιχισμένοι ενσύρματοι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας	77
4.3	Μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας.....	85

5.	Μοντελοποίηση του Ιερού Κουβουκλίου και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων	88
5.1	Συμπεράσματα.....	101
IV.	Άμεσες επεμβάσεις αντιμετώπισης θερμοϋγρικών φαινομένων	102
1.	Συστήματα αφύγρανσης και εξαερισμού	102
1.1	Σύστημα αφύγρανσης και εξαερισμού του Ιερού Κουβουκλίου	103
1.2	Σύστημα αφύγρανσης Ιερού Βράχου	112
V.	Συμπεράσματα.....	116
VI.	Προοπτικές.....	118
VII.	Βιβλιογραφία.....	124

I. Θεωρητικό Μέρος

1. Η φθορά των δομικών υλικών

Όλα τα δομικά υλικά παρουσιάζουν συνεχή συμπτώματα φθοράς ως αποτέλεσμα της έκθεσής τους στην ατμόσφαιρα. Η φθορά αυτή είναι αποτέλεσμα φυσικών, χημικών, μηχανικών και βιολογικών παραγόντων και εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και από τη φύση του ίδιου του υλικού. Τα φαινόμενα φθοράς που λαμβάνουν χώρα είναι περίπλοκα και συνήθως αλληλοεξαρτώμενα μιας και είναι πολλοί οι παράγοντες που υπεισέρχονται για τον καθορισμό τους.

Όλα τα υλικά ακολουθούν τις επιταγές του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου και έχουν την τάση να οδηγούνται αυθόρμητα σε καταστάσεις χαμηλότερης ελεύθερης ενέργειας (G), ελεύθερης ενθαλπίας (H), χημικού δυναμικού (μ), και υψηλότερης εντροπίας (S). Η τάση αυτή των υλικών να υποβαθμίζονται ενεργειακά και να μετασχηματίζονται σε άλλα σταθερότερα, αποτελεί το κύριο αίτιο της φθοράς τους.

Τα δομικά υλικά, που στην πλειοψηφία τους είναι ανισότροπα, κατά τη δυναμική διεργασία της φθοράς, εκτός από ενεργειακή υποβάθμιση υφίστανται αύξηση της εντροπίας τους, δηλαδή αύξηση της αταξίας των φάσεων του συστήματός τους. Οι νέες φάσεις που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον. Όσο πιο έντονη είναι η κατεργασία της πρώτης ύλης για την παρασκευή των δομικών υλικών, τόσο πιο βίαιες είναι οι μεταβολές των δομικών υλικών στο ίδιο περιβάλλον, με αποτέλεσμα οι φθορές τους να είναι εντονότερες.^{1,2}

Όπως αναφέρθηκε τα φαινόμενα της φθοράς είναι ποικιλόμορφα και εκδηλώνονται στις διεπιφάνειες υλικών/περιβάλλοντος ή υλικών /υλικών. Συνοψίζοντας η φθορά εξαρτάται από:

Το υλικό

- το είδος του δομικού υλικού (πέτρα, κονίαμα, κεραμικό, μέταλλο, σύνθετα υλικά, κ.ά.)
- οι ιδιότητες του υλικού (φυσικοχημικές, ορυκτολογικές και μηχανικές)
- την κατανομή μάζας στον όγκο και την υφή του (δηλαδή η μάκρο- και η μικροδομή του)
 - την προέλευση και την απόληψή του
 - την τεχνολογία παραγωγής του
 - τη συμβατότητα του με άλλα υλικά
- την ιστορία του τόσο στην αρχική του κατασκευή όσο και στις διάφορες επεμβάσεις συντήρησης

Το περιβάλλον:

- το είδος των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων που επιδρούν (θαλασσινή, αστική ή βιομηχανική ατμόσφαιρα)
- το νερό με την εκάστοτε μορφή του (βροχή, αερόλυμα, τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία, συμπύκνωση κ.ά.)
- τις μηχανικές φορτίσεις (θερμοκρασιακές μεταβολές, διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων, σεισμικές δονήσεις, τριβή κ.ά.)
- το μικροκλίμα της περιοχής
- τις συνθήκες χρήσης της κατασκευής
- το περιβάλλον της κατασκευής σε σχέση με άλλα ασύμβατα υλικά
- τους διάφορους βιολογικούς παράγοντες
- το γεωτεχνικό πλαίσιο θεμελίωσης
- την κατανομή, τον προσανατολισμό και την ένταση των περιβαλλοντικών παραγόντων, ανάλογα με τη θέση της επιφάνειας και του υλικού στην κατασκευή.³

Έτσι, η κάθε κατάσταση φθοράς, σε διάφορα περιβάλλοντα, είναι μια σύνθετη συνάρτηση των ενδογενών και των εξωγενών παραγόντων που επηρεάζουν το υλικό.

1.1 Μηχανικοί παράγοντες φθοράς

Οι μηχανικοί παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών διακρίνονται σε εξωτερικής και σε εσωτερικής προέλευσης.

Εξωτερικής προέλευσης μηχανικούς παράγοντες αποτελούν οι ημερήσιες ή εποχιακές θερμοκρασιακές μεταβολές που καταπονούν μέσω των διαστολών και συστολών τα δομικά υλικά, τα φορτία που καταπονούν τα υλικά σαν μέρος του δομικού συνόλου, οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ γειτονικών υλικών, οι καταπονήσεις που οφείλονται στον κακό σχεδιασμό του οικοδομήματος και τέλος οι καταπονήσεις από φυσικές καταστροφές (σεισμοί, βομβαρδισμοί, πόλεμοι, κατακλυσμοί, πυρκαγιές, βανδαλισμοί, κ.τ.λ.).

Θερμοκρασιακές μεταβολές⁴

Οι ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές ή οι άνισες κατανομές θερμοκρασίας στα δομικά υλικά μπορεί να αποτελέσουν την αφορμή για την ανάπτυξη τάσεων σε αυτά, με αποτέλεσμα την εκκίνηση μηχανικών διαδικασιών φθοράς. Επίσης, οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής και θερμοχωρητικότητας των διαφόρων φάσεων και υλικών ενός συστήματος, ενισχύουν τα φαινόμενα μηχανικής φθοράς των δομικών υλικών, καθώς συνεπάγονται την ανάπτυξη τάσεων με περεταίρω επιπτώσεις στη συνοχή των υλικών.

Τα δομικά υλικά που είναι πιο επιρρεπή στις θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος, είναι τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι, δεδομένης της ανισοτροπίας τους. Τα εν λόγω δομικά υλικά, ενώ θεωρητικά δύναται να ανταποκριθούν ελαστικά σε θερμικές τάσεις, οι οποίες προκαλούνται από θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες των 30 °C, στην πραγματικότητα, η ύπαρξη ζωνών αδυναμίας ή επιπέδων ασυνέχειας στα μάρμαρα και κυρίως στους ασβεστόλιθους, διευκολύνει την εκκίνηση διαβρωτικών διαδικασιών ακόμα και κατά τους συνήθεις θερμοκρασιακούς κύκλους του περιβάλλοντος. Στην

περίπτωση πολύ έντονης θέρμανσης και ακραίων θερμοκρασιακών μεταβολών όπως στην περίπτωση των πυρκαγιών, εκδηλώνονται ρηγματώσεις στο όριο μεταξύ θερμού και ψυχρού στρώματος. Η πολύ υψηλή θερμοκρασία (~900 °C) για τα μάρμαρα, τους ασβεστόλιθους, τα ασβεστιτικά κονιάματα καθώς και για τους δολομίτες (~800 °C), προκαλεί τη διάσπαση του ασβεστίτη (CaCO_3) γεγονός που συνεπάγεται επιπτώσεις στη συνοχή του υλικού.

Σεισμικές Δονήσεις

Στα ιστορικά κτήρια, σε αντίθεση με τα νεότερα που είναι σχεδιασμένα σύμφωνα με τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς, κυριαρχεί ο παράγοντας των υφιστάμενων βλαβών και της φθοράς των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, κτήρια που έχουν υποστεί δομικές βλάβες είτε λόγω παρελθόντων σεισμικών δονήσεων είτε λόγω φθοράς των υλικών τους, θα υποστούν περαιτέρω ζημιές και ίσως πλήρη κατάρρευση σε μικρότερες τιμές δυναμικών επιταχύνσεων από αυτές που μπορούν να αντέξουν καινούργια, ισχυρά και κατάλληλα σχεδιασμένα κτήρια. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η ικανότητα απόκρισης ενός ιστορικού κτηρίου σε δυναμικές καταπονήσεις (σεισμούς) εξαρτάται κυρίως από τα συνδετικά του κονιάματα. Επιπλέον, έχειδειχθεί ότι η δυναμική καταπόνηση κτιρίων μπορεί να προκαλέσει βλάβες, όταν οι συχνότητες καταπόνησης κυμαίνονται από 8 έως 80Hz, ανάλογα με τις μέγιστες ταχύτητες που παρουσιάζονται. Η πρόβλεψη κατά DIN για τις βλάβες σε κτίρια είναι ότι μόνο ισχυρά κτίρια μπορούν να αντέξουν ταχύτητες μεταξύ 10 και 40mm/s, ενώ ιστορικά κτίρια, με ήδη υπάρχουσες βλάβες παρουσιάζουν οριακές αντοχές μεταξύ 2 και 5mm/s.⁵

Εσωτερικής προέλευσης μηχανικοί παράγοντες φθοράς νοούνται η φθορά των πορωδών υλικών λόγω της κρυστάλλωσης των αλάτων, η φθορά λόγω σχηματισμού παγετού, η επίδραση του νερού σε όλες τις μορφές του καθώς και η φθορά με τη διόγκωση των μεταλλικών συνδέσμων.

Διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων⁶

Στα περισσότερα μνημεία του ελλαδικού χώρου, για τη σύνδεση των διαφόρων αρχιτεκτονικών στοιχείων, έχουν χρησιμοποιηθεί μεταλλικοί σύνδεσμοι από χάλυβα, χαλκό ή ορείχαλκο βυθισμένοι σε μόλυβδο (μολυβδοχόηση) ή άλλοτε

δοκοί ξύλου βυθισμένοι σε θειάφι ή πίσσα. Κατά τις αναστηλώσεις που ακολούθησαν χρησιμοποιήθηκε εκτός από τα παραπάνω υλικά και ανοξειδωτος χάλυβας βυθισμένος σε σκυρόδεμα ή κονία.

Τα προϊόντα της οξειδωσης, κυρίως οξειδία του σιδήρου ή ανθρακικά άλατα χαλκού, τα οποία δημιουργούνται στην επιφάνεια των συνδέσμων αυξάνουν σημαντικά τον όγκο του συστήματος μέταλλο – προϊόντα διάβρωσης. Τα νέα οξειδία σχηματίζονται πάντα στην εξωτερική επιφάνεια μέσω της διάχυσης των κατιόντων μετάλλου προς το διαβρωτικό περιβάλλον μέσα από το ήδη σχηματισμένο στρώμα των προϊόντων διάβρωσης. Η διόγκωση του εγκιβωτισμένου συνδέσμου προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρότατων τάσεων, που οδηγούν στη ρήξη του υλικού όταν υπερβούν την αντοχή του.

Οι παράγοντες που αφορούν στη δράση του νερού στα δομικά υλικά αναλύονται ενδελεχώς στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Χημικοί παράγοντες φθοράς

Η τεχνολογική πρόοδος και η ανάπτυξη των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων τις τελευταίες δεκαετίες, είχε σαν αποτέλεσμα την παρουσία διαφόρων ρύπων μέσα στον ατμοσφαιρικό αέρα. Οι ρύποι αυτοί εμφανίζονται άλλοτε σε υψηλές και άλλοτε σε χαμηλές συγκεντρώσεις ανάλογα με το είδος των πηγών ρύπανσης αλλά και με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τις μετεωρολογικές συνθήκες και χαρακτηρίζονται ως φθοροποιοί για τα συνήθη δομικά υλικά. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία του νερού στις διάφορες μορφές του στο εσωτερικό των υλικών προκαλεί φθορές από χημικές δράσεις σε αυτά.

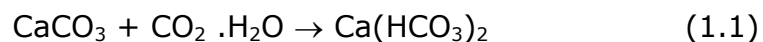
Ατμοσφαιρική ρύπανση-οξική επίδραση

Κατά τον εικοστό όμως αιώνα και ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, η αστικοποίηση και η συγκέντρωση των βιομηχανιών στις μεγαλουπόλεις είχε σαν αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των τοπικών επιπέδων ρύπανσης, προκαλώντας έτσι την επιτάχυνση της φθοράς των μνημείων και την

δημιουργία νέων μορφών και μηχανισμών φθοράς. Ως ρυπαντές θεωρούνται οι ουσίες που προκαλούν αλλαγή της σύστασης του ατμοσφαιρικού αέρα ενώ οι κυριότεροι φθοροποιοί ρύποι για τα συνήθη δομικά υλικά είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου και το υδροχλώριο (HCl).

⊞ Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

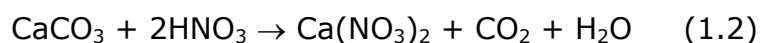
Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι ένα από τα συστατικά της ατμόσφαιρας που παράγεται κυρίως από φυσικές διεργασίες που αφορούν τους ζωντανούς οργανισμούς. Η αυξημένη όμως παρουσία του στην ατμόσφαιρα οφείλεται στο γεγονός ότι είναι το κυριότερο προϊόν της καύσης των διαφόρων καυσίμων υλών. Το CO₂ αντιδρά με το νερό και δίνει ως προϊόν το ασθενές ανθρακικό οξύ που με τη σειρά του διαλύει τα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου σε πολλά δομικά υλικά (ασβεστόλιθους, μάρμαρα, κονιάματα, κ.ά.) σύμφωνα με την αντίδραση:



Το προϊόν της αντίδρασης είναι πολύ πιο διαλυτό στο νερό και προκαλεί τη σταδιακή αποικοδόμηση των υλικών.

⊞ Οξείδια του αζώτου (NO_x)

Το άζωτο είναι το συστατικό της ατμόσφαιρας με τη μεγαλύτερη αναλογία (~78%). Κάποια από τα οξείδια του υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε πολύ μικρές ποσότητες και μπορούν να μετατραπούν σε διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Εκτός αυτού, NO₂ μπορεί να παραχθεί και μέσω διάφορων φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα. Έτσι το άζωτο μεταπηδά σε διάφορα στάδια οξειδωσης και κάποια ποσότητα του μετατρέπεται τελικά σε νιτρικό οξύ (HNO₃). Το νιτρικό οξύ που είναι αρκετά ισχυρό, προσβάλλει το CaCO₃ και παράγει το αρκετά ευδιάλυτο προϊόν Ca(NO₃)₂, οδηγώντας σε διάλυση του ασβεστιτικού υλικού, σύμφωνα με την αντίδραση:



⊞ Οξειδία του θείου

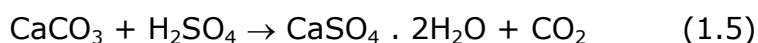
Το θείο υπάρχει στην ατμόσφαιρα με τη μορφή του διοξειδίου και του τριοξειδίου (SO_2 , SO_3). Η καύση προϊόντων που περιέχουν θείο, όπως το αργό πετρέλαιο και το κάρβουνο, οδηγεί στη δημιουργία του SO_2 το οποίο με τη σειρά του οξειδώνεται σε SO_3 :



Το SO_3 παρουσία νερού μετατρέπεται σε θειικό οξύ σύμφωνα με την αντίδραση:



Η παρουσία του θειικού οξέος είναι καταστροφική για τα δομικά υλικά ασβεστιτικής προέλευσης διότι οδηγεί στη δημιουργία γύψου (γυψοποίηση) σύμφωνα με την αντίδραση:



Ο γύψος που σχηματίζεται αποπλένεται συνεχώς από την επιφάνεια του υλικού με αποτέλεσμα η επιφάνεια να διαλύεται και να χάνει τις τυχόν γλυπτές της λεπτομέρειες.

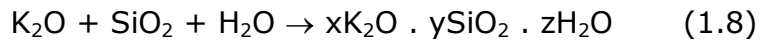
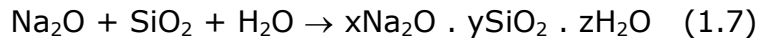
⊞ Προσβολή του HCl

Το HCl μπορεί επίσης να προκαλέσει τη διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) σύμφωνα με την αντίδραση:



Πυριτο-αλκαλική προσβολή

Τα οξειδία του νατρίου και του καλίου τα οποία υπάρχουν στα υδραυλικά και στα τσιμεντιτικά κονιάματα ή σαν πρόσμιξη στα αδρανή, αντιδρούν με το οξείδιο του πυριτίου που μπορεί να βρίσκεται στους πλίνθους της τοιχοποιίας ή στα αδρανή του κονιάματος σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Αποτέλεσμα της παραπάνω προσβολής είναι να παρουσιάζεται αύξηση του όγκου του υλικού, η οποία με τη σειρά της ασκεί πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων του υλικού οδηγώντας σε ρηγματώσεις και τελικά στη φθορά του υλικού.

Αιωρούμενα σωματίδια - αερολύματα

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι στερεά ή υγρά τεμάχια της ύλης που βρίσκονται διασκορπισμένα στην ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης και το μέγεθος τους κυμαίνεται από 0,2nm έως και 500mm. Προέρχονται κυρίως από τη καύση των ορυκτών καυσίμων και σχηματίζουν σκούρες κρούστες στις επιφάνειες που επικάθονται λόγω της πίσσης ή της αιθάλης που περιέχουν. Τα αιωρούμενα σωματίδια επικάθονται στις εκτιθέμενες επιφάνειες των δομικών υλικών δημιουργώντας πάνω σε αυτές κρούστες^{7,8}. Τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν κάποια οξύτητα ή αλκαλικότητα και έτσι όταν επικάθονται στην επιφάνεια της επιτίθενται χημικά. Τα σωματίδια που παρουσιάζουν οξύτητα οδηγούν στο σχηματισμό οξέων ενώ τα σωματίδια που παρουσιάζουν αλκαλικότητα απελευθερώνονται ως σκόνη από το μπετόν σε καινούργια κτήρια.

Τα αερολύματα (aerosols) είναι μίγματα σωματιδίων και σταγονιδίων από θαλάσσιες και ηπειρωτικές σε αέριο μέσα στο οποίο αυτά αιωρούνται. Η μεταφορά και διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί καθώς η ροή του αέρα είναι υπερβολικά πολύπλοκη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ο τρόπος και η έκταση της φθοράς που προκαλούν. Σημαντικό ρόλο παίζουν η τοποθέτηση και η κλίση της επιφάνειας, οι συνθήκες των ρευμάτων του αέρα και της υγρασίας που επικρατούν στο σημείο (μικροκλίμα του σημείου) ενώ η συγκράτηση τους σε μια επιφάνεια έχει διαφορετικούς βαθμούς έντασης που εξαρτώνται από την ανωμαλία της επιφάνειας.

1.3 Βιολογικοί παράγοντες φθοράς

Με τον όρο βιοδιάβρωση νοείται κάθε ανεπιθύμητη μεταβολή στις ιδιότητες ενός δομικού υλικού ως συνέπεια των δραστηριοτήτων κάποιων ζωντανών οργανισμών. Τα φυτά, τα ζώα και διάφοροι μικροοργανισμοί μπορούν να επιφέρουν πολλών ειδών φυσικοχημικές αλλαγές στα υλικά που προσβάλλουν ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξής τους. Η αποίκηση των μικροοργανισμών στα δομικά υλικά και η βιοδιάβρωση σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι σημαντικότερες παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στη βιοδιάβρωση μπορεί να είναι είτε φυσικής είτε χημικής προέλευσης. Στους φυσικούς παράγοντες εντάσσονται η ξηρασία, υγρασία, η θερμοκρασιακή διακύμανση και το φως, δηλαδή το κλίμα και το μικροκλίμα μιας περιοχής, ενώ η διάβρωση λόγω χημικών διεργασιών θεωρείται σημαντικότερη και περιλαμβάνει την παραγωγή ανθρακικού οξέος, την έκκριση οξαλικού οξέος και την παραγωγή υδατοδιαλυτών λειχηνικών ενώσεων που έχουν τη δυνατότητα να σχηματίζουν ευδιάλυτα μεταλλικά σύμπλοκα.

Τα φαινόμενα της φθοράς που σχετίζονται με τη δράση των μικροοργανισμών ή με τα προϊόντα οργανικών δράσεων συχνά υποτιμούνται σε σχέση με τα αποτελέσματα άλλων παραγόντων, όπως της άμεσης χημικής διάβρωσης. Ωστόσο, τα καταστροφικά αποτελέσματα των χημικών διεργασιών μπορούν να ενταθούν με την παρουσία οργανικά παραγόμενων διαβρωτικών παραγόντων, όπως οξυγόνου, οργανικών οξέων και διοξειδίου του άνθρακα. Η δράση των βακτηριδίων μπορεί να ευνοήσει τη διάβρωση της πέτρας μέσα από την ανάλωση χημικών συστατικών των ορυκτών της, απαραίτητων για τις οργανικές διεργασίες, όπως ακόμα, μπορεί και να παρέχει προϊόντα μεταβολισμού τα οποία δρουν σαν καταλύτες στην εξέλιξη της φθοράς.

Στις επιπτώσεις της βιολογικής διάβρωσης κατατάσσονται:

- η αισθητική εμφάνιση του υλικού: δημιουργία κρούστων, αλλαγές στο χρώμα των υλικών, λεκέδες από τις εκκρίσεις των οργανισμών.
- οι χημικές διεργασίες: τα υποπροϊόντα της δράσης του μεταβολισμού των οργανισμών αντιδρούν με το υπόστρωμα

→ οι φυσικές διεργασίες: η μηχανική ρηγμάτωση που μπορεί να προκαλέσει από τις πιέσεις που ασκεί κατά την ανάπτυξή του ο οργανισμός στην επιφάνεια των υλικών.

2. Φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας

Το νερό σε διάφορες μορφές αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των κατασκευών και για το λόγο αυτό έχει προκαλέσει από παλιά το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Η υγρασιακή προστασία για την ελαχιστοποίηση της διαβρωτικής δράσης της υγρασίας είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα κατά την κατασκευή, συντήρηση, ανακαίνιση, αλλά και την προστασία των κατασκευών. Για να γίνει αυτό όμως θα πρέπει να είναι γνωστό, πώς το νερό εισέρχεται στις κατασκευές, ποιοι είναι οι κύριοι τρόποι και μηχανισμοί μεταφοράς του, τι προκαλεί, ποια είναι τα σημάδια εκδήλωσης της δράσης του και πώς αυτά αναγνωρίζονται σε μια διαγνωστική μελέτη και τέλος ποιοι είναι οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίζεται το πρόβλημα.

2.1 Προέλευση της υγρασίας

Μία κατασκευή είναι ένα πολύπλοκο δομικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από διάφορα υλικά (λίθους, τούβλα, ξύλα, μέταλλα, κονιάματα, επιχρίσματα). Ο τρόπος με τον οποίο τα υλικά αυτά συμπεριφέρονται στους περιβαλλοντικούς παράγοντες φθοράς καθορίζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά τους, (φυσικά, χημικά, μηχανικά), και από την τεχνολογία παραγωγής τους (αν πρόκειται για τεχνητά υλικά).⁹

Το νερό μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης από το έδαφος, μέσω της βροχής και της συμπύκνωσης της υγρασίας του αέρα προκαλεί διάφορα φυσικά, χημικά και βιολογικά προβλήματα στα υλικά, δημιουργώντας τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη βακτηρίων με άμεση επιβάρυνση του ατμοσφαιρικού αέρα

στους εσωτερικούς χώρους για τους κατοίκους, γεγονός που επηρεάζει τόσο την υγεία τους όσο και την άνεσή στη διαβίωσή τους.^{10,11}

Το νερό εισέρχεται και συγκρατείται στο εσωτερικό της κατασκευής είτε ως χημικά δεσμευμένο, είτε ως φυσικά ροφημένο νερό είτε μέσω της τριχοειδούς κυκλοφορίας.¹²

Χημικά δεσμευμένο νερό είναι το νερό που αρχικά χρησιμοποιείται με τα δομικά υλικά για την κατασκευή μιας τοιχοποιίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού στη συνέχεια εξατμίζεται ενώ ένα μικρό ποσοστό που παραμένει στην τοιχοποιία δεν ευθύνεται για τυχόν προβλήματα υγρασίας σε αυτήν.

Το φυσικά ροφημένο νερό είναι το νερό που απορροφάται απευθείας από τον αέρα και εξαρτάται από τη σχετική υγρασία του χώρου. Στην περίπτωση που στο εσωτερικό του υλικού έχουν διεισδύσει άλατα με μεγάλη υγροσκοπικότητα, παρατηρείται απορρόφηση νερού από το υλικό ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας, ξηρή ατμόσφαιρα.¹³

Όλα τα πορώδη δομικά υλικά απορροφούν νερό μέσω των τριχοειδών τους πόρων. Το νερό αυτό χαρακτηρίζεται ως **τριχοειδώς αναρριχόμενο νερό** και αποτελεί την σημαντικότερη πηγή φθοράς για τα υλικά.

Με βάση τα παραπάνω, οι κυριότερες πηγές υγρασίας σε μια τοιχοποιία μπορεί να είναι:¹⁴

ο Υγρασία από την ατμόσφαιρα (νερό της βροχής, συμπύκνωση της υγρασίας της ατμόσφαιρας)

ο Υγρασία από το έδαφος (τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία)

ο Υγρασία από διαρροές εγκαταστάσεων (σωληνώσεις, αποχετεύσεις, παροχέτευσης, κ.ά.)

ο Υγρασία κατά την εφαρμογή-κατασκευή-αποκατάσταση των δομικών υλικών

ο Υγρασία από αλατονέφωση ή με απευθείας μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα.

Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν έχουν μελετήσει και περιγράψει τις φυσικές διεργασίες της συμπύκνωσης και της εξάτμισης της υγρασίας σε δομικά υλικά, με τη διαπερατότητα των πορωδών μέσων με νερό^{15,16,17,18,19} και με τη κυκλοφορία του νερού μέσα σε τοιχοποιίες²⁰ ενώ στο επίκεντρο ήταν και οι αντοχές των υλικών κατά τη κίνηση της υγρασίας καθώς και τα τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν για τις τοιχοποιίες και τα υλικά.²¹

Το νερό της βροχής

Η διαβρωτική, κυρίως διαλυτική του δράση, οφείλεται στα διάφορα ιόντα που αφομοιώνει, καθώς οι σταγόνες απορροφούν, αποπλύνοντας τα σωματίδια των αερολυμάτων κατά την πτώση τους. Η χημική σύνθεση του βρόχινου νερού συνδέεται στενά με την ποιότητα της ατμόσφαιρας, ενώ η διαβρωτική του δράση συνίσταται στην αφομοίωση διαφόρων ιόντων καθώς οι σταγόνες απορροφούν τα σωματίδια των αερολυμάτων κατά την πτώση τους. Η σχετικά μικρή διάρκεια της βροχής δεν επιτρέπει στο νερό να διεισδύσει σημαντικά μέσα στα υλικά ενώ το μεγαλύτερο μέρος του απομακρύνεται στη συνέχεια κατά τη φάση της ξήρανσης. Η ποσότητα του νερού που θα διεισδύσει εξαρτάται από το είδος και την κατάσταση του υλικού, τη θέση του υλικού στο κτήριο καθώς και τους διάφορους περιβαλλοντικούς-κλιματολογικούς παράγοντες όπως για παράδειγμα η πίεση των ανέμων που πνέουν στην περιοχή. Έτσι, ένα υλικό με μεγάλους πόρους ευνοεί τη διείσδυση του βρόχινου νερού σε αυτό ενώ οι τυχόν ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την είσοδο της υγρασίας σε αυτό.²²

Παράλληλα, ο ρυθμός απόπλυσης των αερολυμάτων εξαρτάται από το μέσο μέγεθος των σταγόνων, την ταχύτητα πτώσης τους και την απόσταση που διανύουν μέχρι να φθάσουν στην επιφάνεια της γης. Οι βροχές με μικρό μέγεθος σταγόνων, με μεγάλη ειδική επιφάνεια και χαμηλή ταχύτητα πτώσης, απορροφούν μεγαλύτερες ποσότητες αερολυμάτων και κατά συνέπεια φέρουν σημαντικό φορτίο ιόντων. Το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας διαλύεται στο νερό της βροχής για να σχηματίσει στην αρχή $\text{CO}_2\text{H}_2\text{O}$. Αυτό παριστάνει ολόκληρη την ποσότητα του CO_2 που περνά στο νερό. Από αυτό ένα μέρος παραμένει φυσικώς διαλυμένο και το υπόλοιπο σχηματίζει H_2CO_3 το οποίο με τη σειρά του δίσταται σε

Η και HCO_3^- . Αύξηση της θερμοκρασίας του νερού επιφέρει μείωση της ποσότητας του διαλυμένου CO_2 . Κοντά στο σημείο πήξης το νερό διαλύει περίπου διπλάσια ποσότητα CO_2 από αυτήν σε θερμοκρασία 25°C . Αύξηση της μερικής πίεσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα προκαλεί την άνοδο της συγκέντρωσης του διαλυμένου CO_2 στο νερό.

Τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία

Με τον όρο τριχοειδή αναρρίχηση εννοούμε την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση του νερού που προέρχεται από το έδαφος μέσα σε μία τοιχοποιία και την εμφάνιση αναρριχόμενης υγρασίας σε αυτή.²³ Η τριχοειδής αναρρίχηση είναι η σημαντικότερη αιτία εισόδου της υγρασίας σε ένα δομικό υλικό και είναι ένα πανταχού παρόν φαινόμενο, μιας και όλες οι τοιχοποιίες εδράζονται στο έδαφος. Σε όλα τα πορώδη δομικά υλικά υπάρχει μια κατηγορία πόρων που ονομάζονται τριχοειδείς πόροι ή απλά τριχοειδή του υλικού.

Συμπύκνωση της ατμοσφαιρικής υγρασίας

Η συμπύκνωση της υγρασίας, συχνά αναφέρεται σαν μια σύγχρονη «ασθένεια» των κτηρίων. Με τη συμπύκνωση της υγρασίας μπορεί να αποθεθούν αξιόλογες ποσότητες νερού στις επιφάνειες των δομικών υλικών ενώ είναι δυνατόν να σημειωθεί συμπύκνωση όταν υδρατμοί εισέλθουν στο εσωτερικό μιας τοιχοποιίας και φτάσουν σε σημεία με θερμοκρασία μικρότερη του σημείου δρόσου.

Μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα

Το θαλασσινό νερό έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και κυρίως σε NaCl , που φτάνει τα 35 kg αλάτων ανά 1 kg θαλασσινού νερού. Έτσι, καθίσταται ένα πολύ διαβρωτικό μέσο για κάθε υλικό και κατασκευή. Τα σταγονίδια θαλασσινού νερού μπορούν να διανύσουν αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων από τη θάλασσα, ανάλογα με τη διεύθυνση και ένταση των ανέμων, καθώς και την γεωμορφολογία της περιοχής.²⁴ Το θαλασσινό νερό περιέχει υδρόθειο H_2S που προκύπτει από τον μεταβολισμό των θειοαναγωγικών βακτηριδίων. Επίσης υπάρχουν και άλλα βακτηρίδια στη θάλασσα, που μπορούν να παράγουν

αμμωνία NH_3 καθώς και άλλες ενώσεις του αζώτου. Ακόμα, στο θαλασσινό νερό περιέχεται το 1% του συνολικού CO_2 με τη μορφή του H_2CO_3 .

Το pH του θαλασσινού νερού είναι κανονικά αλκαλικό και συγκεκριμένα σε επιφανειακά στρώματα, όπου το νερό ισορροπεί με το ατμοσφαιρικό O_2 , η τιμή του κυμαίνεται από 8,1 - 8,3. Η διαλυτότητα των πετρωμάτων στο θαλασσινό νερό είναι διαφορετική από αυτή στο γλυκό νερό, μέχρι 10% περισσότερο.

2.2 Φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας στα δομικά υλικά

Το νερό μπορεί να κυκλοφορήσει σε υγρή ή σε αέρια μορφή μέσα στο εσωτερικό ενός πορώδους υλικού με διάφορους τρόπους. Όταν το νερό είναι σε υγρή μορφή μπορεί να εισχωρήσει στο υλικό μέσω της ρόφησης, της διάχυσης, της ώσμωσης, της ηλεκτροκίνησης ή της θερμότητας.

Η κίνηση της υγρασίας σε αέρια μορφή γίνεται είτε λόγω της συμπύκνωσης ή της προσρόφησης όταν το νερό εισέρχεται στο υλικό, είτε μέσω της εξάτμισης ή της εκρόφησης όπου το νερό απομακρύνεται από το υλικό. Τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας σε πορώδη δομικά υλικά, ανάλογα με το αν παραμένει σταθερή ή όχι η θερμοκρασία, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ισόθερμα και μη ισόθερμα. Στα φαινόμενα μεταφοράς, εκτός από τη θερμοκρασία, μια σειρά από επιπλέον παραδοχές περιλαμβάνουν τη σταθερή πυκνότητα του νερού και την αμελητέα επίδραση της βαρύτητας.²⁵

2.2.1 Τριχοειδής αναρρίχηση

Το νερό ανέρχεται μέσω των τριχοειδών πόρων λόγω της ηλεκτραρνητικής έλξης που ασκούν τα τοιχώματα των πόρων στα μόρια του νερού που είναι πολωμένα. Η τριχοειδής δύναμη αυξάνει όσο ελαττώνεται η διάμετρος των πόρων και είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από τη βαρύτητα. Αν η αναρρίχηση του νερού δεν αντισταθμίζεται από την τυχόν ξήρανση, η τριχοειδής αναρρίχηση μπορεί να φτάσει το ύψος αρκετών δεκάδων μέτρων. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, το φαινόμενο της ξήρανσης συνυπάρχει με τη διαδικασία της τριχοειδούς αναρρίχησης με αποτέλεσμα να αποκαθίσταται τελικά ισορροπία ανάμεσα στην άνοδο του νερού και την εξάτμιση του από την επιφάνεια. Θα πρέπει να

αναφερθεί ότι σοβαρό ρόλο στη τριχοειδή αναρρίχηση παίζουν και τα διαλυτά άλατα τα οποία εκτός από την κρυστάλλωση τους, δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την εκδήλωση του φαινομένου της ώσμωσης που ενισχύει την αναρρίχηση.

Το νερό εισέρχεται στα δομικά υλικά σε υγρή ή σε αέρια μορφή με τη μορφή υδρατμών αλλά οι κυριότεροι μηχανισμοί μεταφοράς υγρασίας σχετίζονται με την υγρή του φάση. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης, το νερό εισέρχεται από τη πλευρά του υλικού που είναι σε επαφή με το έδαφος και έτσι παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση στη μάζα του υλικού. Για ένα ισότροπο και πορώδες δομικό υλικό, η τριχοειδώς απορροφούμενη μάζα νερού ανά μονάδα επιφάνειας, είναι συνάρτηση του χρόνου σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I = Aw \sqrt{t} \quad (2.1)$$

όπου :

I: η μάζα του απορροφούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού (kg/m²),

Aw: ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης του υλικού (kg/m² s^{1/2})

t: ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο (s).

Για να είναι σε ισχύ η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:²⁶

- η διατομή του υλικού που είναι παράλληλη προς την απορροφητική επιφάνεια και κάθετος προς την κατεύθυνση του υγρού εισροή να είναι σταθερή
- το ύψος του δοκιμίου να είναι σχετικά μικρό έτσι ώστε να θεωρείται αμελητέα η βαρύτητα
- το βάθος βύθισης του δοκιμίου να είναι μικρό και η στάθμη του νερού να διατηρείται σε σταθερό επίπεδο, συνήθως μεταξύ 1 και 2 mm πάνω από την κατώτερη επιφάνεια του δείγματος
- η πιθανή εισροή νερού από πολλές κατευθύνσεις στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου να έχει αμελητέα επίδραση στην ροή του νερού μέσα στο δείγμα
- το σύστημα στήριξης στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου να έχει αμελητέα επίδραση στη ροή νερού μέσα στο δείγμα

- να διατηρείται μια ομοιόμορφη επαφή ανάμεσα στο δείγμα και στο υγρό καθ όλη τη δοκιμή (π.χ., να μην επικάθονται φυσαλίδες αέρα κατατεθεί στην επιφάνεια του δείγματος που είναι σε επαφή με το νερό)
- να μειωθεί η εξάτμιση από τις πλευρές του δείγματος που δεν είναι σε επαφή με το νερό.

Στην παραπάνω εξίσωση επίσης εισάγεται ως συντελεστής αναλογίας ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης A_w του υλικού και εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο οι τριχοειδείς πόροι των δομικών υλικών απορροφούν νερό. Για να είναι συνεπής ο υπολογισμός του συντελεστή A_w με τις μετρήσεις των υπόλοιπων παραμέτρων των χαρακτηριστικών της υγρασίας σε ένα υλικό, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Το μέτωπο υγρασίας να μην έχει φτάσει στην απέναντι επιφάνεια των δοκιμίων (ακόρεστη ροή)
2. το ποσοστό υγρασίας στην επιφάνεια που είναι σε επαφή με το νερό να παραμένει σταθερό και ίσο με το ποσοστό τριχοειδούς κορεσμού του υλικού (capillary moisture content)
3. το ύψος των δοκιμίων να είναι ένα μέρος μόνο του συνολικού ύψους της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας.

Το νερό του εδάφους μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο των πόρων ενός πορώδους υλικού οδηγούμενο από τη τριχοειδή δύναμη. Η τριχοειδής αναρρίχηση είναι μεγαλύτερη για μικρούς τριχοειδείς πόρους και είναι αντίστροφα ανάλογη της μέσης ακτίνας πόρων σύμφωνα με το νόμο του Jurin. Ο νόμος του Jurin αναφέρεται στο ύψος της κατακόρυφης ανόδου υγρού σε τριχοειδή πόρο και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:²⁷

$$h = 2\sigma/\rho g r \cdot \cos\theta \quad (2.2)$$

όπου :

r : η μέση ακτίνα του τριχοειδή πόρου

σ : η επιφανειακή τάση του υγρού

θ : η γωνία επαφής υγρού-στερεού

ρ : η πυκνότητα του υγρού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

2.2.2 Η συμπύκνωση της υγρασίας

Αν η θερμοκρασία σε οποιαδήποτε αρχιτεκτονική επιφάνεια, πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του αέρα που την περιβάλλει, προκαλείται συμπύκνωση της υγρασίας στην επιφάνεια.²⁸

Η ποσότητα της υγρασίας που συμπυκνώνεται δίνεται από τον τύπο:

$$G = (C_i - C_s) \text{ (kg/m}^2\text{h)} \quad (2.3)$$

όπου:

C_i : η συγκέντρωση των υδρατμών του αέρα κοντά στην επιφάνεια,

C_s : η μέγιστη δυνατή συγκέντρωση στην επιφάνεια, σε θερμοκρασία T_s

Το φαινόμενο της συμπύκνωσης μπορεί να συμβεί, εκτός από την επιφάνεια, και στο εσωτερικό ενός δομικού υλικού ή μιας τοιχοποιίας, αρκεί η θερμοκρασία να φτάσει το σημείο δρόσου στο βάθος εκείνο. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο προκαλεί μια θερμοκρασιακή βαθμίδα, κατά την έννοια του πάχους του τοίχου. Συνήθως, θερμότερος και πλούσιος σε υδρατμούς αέρας από το εσωτερικό διαχέεται μέσα στον τοίχο και, όταν φτάσει σε θέσεις, όπου η θερμοκρασία είναι κάτω από το σημείο δρόσου, εκδηλώνεται συμπύκνωση.

Για τη συμπύκνωση νερού μέσα σε τριχοειδής πόρους ισχύει ο νόμος του Kelvin:

$$\ln(f_s / P(T)) = -2\gamma V_m / rRT \quad (2.4)$$

όπου:

f_s : η υγρομετρική κατάσταση της ατμόσφαιρας σε ισορροπία με νερό με μηνίσκο με ακτίνα r

V_m : ο μοριακός όγκος νερού

γ : η επιφανειακή τάση

$P(T)$: η τάση ατμών κορεσμού σε θερμοκρασία T

R : η σταθερά των αερίων

2.3 Επίδραση της υγρασίας στα δομικά υλικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφ. 2.1 η υγρασία μπορεί να εισέλθει με διάφορους τρόπους σε ένα δομικό υλικό. Μπορεί να προέρχεται από τη βροχή, τη

συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας, την απορροή από τις στέγες και τις προσόψεις των κτηρίων και από την τριχοειδή αναρρίχηση από το έδαφος.^{29,30} Τα δομικά υλικά συνήθως περιέχουν μια ποσότητα φυσικά δεσμευμένου νερού χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή τους. Για παράδειγμα τα πορώδη υλικά περιέχουν ένα ποσοστό υγρασίας που κυμαίνεται από 3-5% χωρίς αυτό να αποτελεί αιτία φθοράς τους.³¹ Όταν όμως το ποσοστό υγρασίας ενός υλικού υπερβεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό, ενεργοποιούνται τα φαινόμενα φθοράς των υλικών προκαλώντας μια σειρά από φυσικές, χημικές και βιολογικής φύσης επιδράσεις.^{32,33,34} Έτσι η γνώση της κίνησης της υγρασίας μέσα σε ένα δομικό υλικό είναι πολύ μεγάλης σημασίας γιατί καθορίζει το μηχανισμό φθοράς του δομικού υλικού.

→ Φυσική επίδραση: Κύριος μηχανισμός φθοράς σε αυτή τη κατηγορία είναι η μετατροπή του νερού σε πάγο. Τόσο το συνολικό ποσό της υγρασίας όσο και η πορώδης δομή του υλικού καθορίζουν αν ένα υλικό είναι λιγότερο ή περισσότερο ανθεκτικό στη δράση του παγετού.

→ Χημική επίδραση: Κύριος μηχανισμός φθοράς σε αυτή την κατηγορία είναι η κρυστάλλωση των αλάτων. Τα άλατα αυτά μεταφέρονται με τη βοήθεια του νερού είτε από το έδαφος (τριχοειδής αναρρίχηση) είτε με τη δράση των ρύπων της ατμόσφαιρας και επιδρούν με τα συστατικά του δομικού υλικού. Επιπλέον το νερό μπορεί να δράσει διαλυτικά προς τα άλατα που περιέχονται σε πολλά δομικά υλικά. Κατά την ξήρανση του υλικού, τα άλατα αυτά επανακρυσταλλώνονται στο εσωτερικό των πόρων, προκαλώντας διόγκωση και ρήξη του υλικού.

→ Βιολογική επίδραση: Η ανάπτυξη των προϊόντων της βιοδιάβρωσης στο εσωτερικό των δομικών υλικών είναι δείκτες της ύπαρξης της πλεονάζουσας υγρασίας και αποτελούν κίνδυνο για την υγεία των κατοίκων. Η ανάπτυξη βιολογικών οργανισμών σε μια τοιχοποιία είναι συνδυασμός της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στην τοιχοποιία. Έτσι, οι τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας θα καθορίσουν αν οι οργανισμοί αυτοί θα δημιουργηθούν και θα επιβιώσουν.

Κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων ^{35, 36, 37, 38}

Η κρυστάλλωση των διαλυτών αλάτων θεωρείται ο κυριότερος και πιο καταστροφικός παράγοντας φθοράς των δομικών υλικών, με επιπτώσεις σε όλα τα πορώδη υλικά, ανεξάρτητα από τη χημική τους σύσταση. Τα διαλυτά άλατα που κυκλοφορούν μέσα στα δομικά υλικά είναι κυρίως τα θειικά, τα νιτρικά, τα ανθρακικά και τα χλωριούχα. Αυτά μπορεί να προέρχονται από τα υπόγεια νερά, από όξινους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές (SO_x , NO_x , HCl) οι οποίοι προσβάλλουν τα υλικά, από τη θάλασσα με τη βοήθεια του ανέμου και από άμεση επαφή των υλικών με το τσιμέντο που είναι σημαντική πηγή διαλυτών αλάτων. Η κίνηση των διαλυτών αλάτων γίνεται μέσω των μηχανισμών της ιοντικής διάχυσης, της τριχοειδούς μεταφοράς ή της ιοντικής όσμωσης. Η κρυστάλλωση αλάτων αναφέρεται στη μηχανική φθορά των δομικών υλικών, μέσω της ανάπτυξης μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό των υλικών - πόρων από κρυστάλλους αλάτων και διάρρηξη της συνέχειας του υλικού, όταν οι τάσεις ξεπεράσουν την αντοχή του. Η διάλυση του συνδετικού υλικού μεταξύ των κόκκων του υλικού λόγω της κρυστάλλωσης αλάτων, συνεπάγεται τη λύση της συνοχής του, δημιουργώντας έτσι την αναγκαιότητα εφαρμογής κατάλληλων κατεργασιών συντήρησης (στερέωση, προστασία) για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων του. Οι κύριες πηγές αλάτων σε τοιχοποιίες είναι από υπόγεια νερά με τριχοειδή αναρρίχηση από το έδαφος, μέσω μηχανισμού ιοντικής διάχυσης σε πλήρως υδροπερατά υλικά, ιοντικής όσμωσης διαπίδυσης σε κλειστούς πόρους, τους όξινους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές, τη θάλασσα με τη βοήθεια του ανέμου, τα γειτονικά υλικά. Τα φαινόμενα φθοράς που οφείλονται στην κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων εκδηλώνονται στα υλικά με τη μορφή εξανθήσεων, κρυπτοεξανθήσεων ή κυψέλωσης.

Στην περίπτωση των εξανθήσεων, η εξέλιξη του φαινομένου καθίσταται δυνατή όταν ο ρυθμός μεταφοράς του διαλύματος άλατος στην επιφάνεια υπερβαίνει το ρυθμό εξάτμισης, τα άλατα τότε κρυσταλλώνονται έξω από τους πόρους, σχηματίζοντας αποθέσεις. Οι εξανθήσεις στην επιφάνεια του λίθου εμφανίζονται κύρια το χειμώνα και εξαφανίζονται το καλοκαίρι. Σε ψυχρό και

υγρό καιρό εμφανίζεται η ένυδρη μορφή των αλάτων, όταν φυσικά υπάρχει. Στη βροχερή περίοδο, εμφανίζεται κάθε φορά καινούρια ποσότητα αλάτων, που απλώνονται πάνω στην επιφάνεια προς όλες τις διευθύνσεις. Μεγάλη συγκέντρωση αλάτων μπορεί να παρατηρηθεί πάνω και σε μικρές επιφάνειες τοίχου. Εξανθήσεις εμφανίζονται πάντα στα όρια υγρής και στεγνής περιοχής, όπως επίσης εκεί όπου υπάρχουν ρωγμές. Όταν το νερό διεισδύσει κάπου, εμφανίζονται εξανθήσεις στο σημείο που ξαναβγαίνει.

Στην περίπτωση της εκδήλωσης κρυπτοεξανθήσεων, η ανάπτυξη των κρυστάλλων πραγματοποιείται στο εσωτερικό των πόρων του υλικού, με ταυτόχρονη απόθεση του διαλύτη του διαλύματος άλατος εντός των πόρων. Η εξέλιξη αυτή του φαινομένου, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, καθίσταται δυνατή όταν ο ρυθμός μεταφοράς του διαλύματος άλατος στην επιφάνεια είναι μικρότερος από το ρυθμό εξάτμισης. Αυτή η εκδοχή θεωρείται η πιο επικίνδυνη εκ των δύο, καθώς οδηγεί σε ανάπτυξη πίεσης στα τοιχώματα των πόρων του λίθου, ανάλογα με το είδος του άλατος, το μέγεθος και την κατανομή των πόρων του υλικού. Το φαινόμενο είναι αρκετά καταστροφικό, αφού προκαλεί θραύσεις και απολεπίσεις στον λίθο.³⁹ Η ανάπτυξη των κρυστάλλων στο εσωτερικό των πόρων, συνεπάγεται τη μεταφορά ιόντων στην επιφάνεια των κρυστάλλων. Εκεί λαμβάνουν χώρα επιφανειακές αντιδράσεις (ρόφηση, επιφανειακή πυρήνωση, επιφανειακή διάχυση, αφυδάτωση, ιοντανταλλαγή) που οδηγούν στην ενσωμάτωση του ιόντος στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Η περίπτωση της κυψέλωσης είναι μια ιδιαίτερη μορφή κρυπτοεξανθήσεως, που εμφανίζεται σε περιοχές που εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους. Η επιφάνεια του λίθου εκφυλίζεται με τη δημιουργία σπηλαιώσεων.

Γενικά ένα άλας είναι δυνατόν να κρυσταλλωθεί μόνο όταν ο περιβάλλον αέρας έχει τιμή σχετικής υγρασίας μικρότερη από του κορεσμένου διαλύματος του άλατος στην ισορροπία. Μια μεγάλη κατηγορία διαβρωτικών φαινομένων ερμηνεύεται μέσω των κυκλικών μεταβολών της ατμοσφαιρικής υγρασίας ιδιαίτερα παρουσία διαλυτών αλάτων.

Δράση του παγετού

Η φθορά που προκαλεί ο παγετός στα δομικά υλικά καθορίζεται από έναν αριθμό παραγόντων όπως η ορυκτολογική τους σύνθεση, το πορώδες τους και η τοποθεσία στην οποία βρίσκονται. Το είδος της φθοράς ποικίλλει και μπορεί να είναι ρηγματώση, αποφλοιώση και αποκόλληση. Η δημιουργία πάγου πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία πέσει αρκετά χαμηλότερα από τους 0 °C εξαιτίας της παρουσίας αλάτων στο νερό τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα να χαμηλώνει το σημείο πήξης. Η δημιουργία πάγου μέσα στους πόρους ή στις ρωγμές των δομικών υλικών είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη διότι η στερεοποίηση του νερού προκαλεί μια αύξηση του όγκου του κατά 9.3% με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ισχυρές μηχανικές τάσεις στο εσωτερικό του υλικού.⁴⁰ Σύμφωνα με μια άλλη θεωρία, το νερό μέσα σε ένα πορώδες μέσο, δεν πήζει όλο στους 0 °C, αλλά ένα μέρος του παραμένει στην υγρή φάση και μάλιστα διατηρείται για καταστάσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που φτάνουν μέχρι τους -40 °C. Έτσι, οι μηχανικές πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματα του υλικού αποδίδονται στην ύπαρξη και διαστολή αυτού του υπόψυκτου νερού.⁴¹ Τέλος, μια άλλη θεωρία αναφέρεται στη δημιουργία διφασικών τάσεων λόγω διαφοράς πίεσης στα όρια μεταξύ στερεάς, υγρής και αέριας φάσης.⁴²

Κύκλοι ύγρανσης-ξηράνσης

Όλα τα πορώδη δομικά υλικά επηρεάζονται από τους διαδοχικούς κύκλους ύγρανσης ξήρανσης της υγρασίας. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, κατά την υγρή φάση οι επιφάνειες των κτηρίων καλύπτονται αρχικά από ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού λόγω συμπύκνωσης με ταυτόχρονη διαλυτοποίηση των ρυπαντών της ατμόσφαιρας και μεταφέρονται στο εσωτερικό της κατασκευής μέσω των πόρων ή τυχόν ρωγμών. Κατά την αντίστροφη διαδικασία της ξήρανσης, το νερό μετακινείται προς την εξωτερική επιφάνεια και εξατμίζεται. Υπάρχουν δύο δυνατότητες εξάτμισης, η πρώτη συμβαίνει στο εσωτερικό της μάζας του υλικού. Ως αποτέλεσμα πραγματοποιείται κρυστάλλωση αλάτων με συνέπεια την διόγκωση του υλικού, την δημιουργία τάσεων και τέλος την ρήξη του υλικού. Η δεύτερη συμβαίνει στην επιφάνεια του υλικού με συνέπεια την δημιουργία εξανθημάτων και την δημιουργία σκληρής κρούστας, ενώ στο εσωτερικό του υλικού η διαδικασία της φθοράς συνεχίζεται. Η επιδεκτικότητα

των διαφόρων υλικών στους κύκλους ύγρυνσης-ξηράνσης εξαρτάται από τη πορώδη δομή τους και τις μηχανικές αντοχές τους και λιγότερο από τις χημικές τους ιδιότητες. Τα υλικά με μικρά πορώδη και υψηλές μηχανικές ιδιότητες είναι πιο ανθεκτικά στον τύπο αυτής της φθοράς.

Γενικά η διάβρωση εξελίσσεται γρήγορα όταν το φαινόμενο εμφανίζει μεγάλη περιοδικότητα. Προσπάθειες προσομοίωσης του φαινομένου στο εργαστήριο ⁴³ έδειξαν ότι κατά την ύγρυνση με καθαρό νερό η ξήρανση που ακολουθεί προκαλεί την κρυστάλλωση των αυτοχθόνων αλάτων του λίθου τα οποία μεταφέρονται στην επιφάνεια με τη βοήθεια του νερού, ενώ κατά την ύγρυνση με διάλυμα κάποιου άλατος η οξεία φθορά που προκαλείται καθορίζεται από το άλας που χρησιμοποιείται. Εξήγηση όμως για την ένταση της φθοράς που προκαλείται από τους επαναλαμβανόμενους κύκλους ύγρυνσης - ξήρανσης δε δίνεται μόνο από τη θεωρία της κρυστάλλωσης των αλάτων.

Το καταστροφικό αποτέλεσμα της ύγρυνσης και ξήρανσης αποδίδεται γενικά στη διαστολή του λίθου κατά την απορρόφηση του νερού και όταν αυτή ξηραίνεται. Αποδίδεται επίσης στη σημαντική διαστολή του νερού όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει, επειδή το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην άσκηση πίεσης στα τοιχώματα των πόρων. Το γεγονός ότι η αποσύνθεση των δειγμάτων ή των μερών που έχουν ήδη σπάσει παρατηρείται γενικά όταν το δείγμα υγραίνεται περισσότερο από ότι όταν ξηραίνεται, δείχνει ότι η διαστολή των υδρατμών στον λίθο ευθύνεται για τη διάβρωση περισσότερο από τη διαστολή του ροφούμενου νερού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας.⁴⁴

2.4 Διαγνωστικός έλεγχος της υγρασίας

Πριν οποιαδήποτε επέμβαση συντήρησης για την αντιμετώπιση της ανερχόμενης υγρασίας πραγματοποιείται ένας διαγνωστικός έλεγχος, ο οποίος στοχεύει στον καθορισμό της πηγής προέλευσης της υγρασίας, την περιεκτικότητά της και την κατανομή της σε μια τοιχοποιία. Ο διαγνωστικός έλεγχος περιλαμβάνει δύο στάδια : ^{45, 46}

Α' φάση. Εξέταση επί τόπου. Με την εξέταση αυτή τεκμηριώνεται η κατάσταση του κτηρίου σχετικά με την ύπαρξη ή όχι υγρασίας και τα σημάδια

εκδήλωσής της. Επίσης με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών είναι δυνατή μία πρώτη εκτίμηση της περιεχόμενης υγρασίας των υλικών.

Β' φάση. Αναλυτική εξέταση στο εργαστήριο. Στο στάδιο αυτό αναλύονται τα δείγματα που λαμβάνονται από την τοιχοποιία στο εργαστήριο και πραγματοποιούνται μια σειρά από τεχνικές για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υγρασίας, αλλά και για τον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και των πιθανών προϊόντων φθοράς.

Α' φάση. Εξέταση επί τόπου

1ο βήμα-Οπτική παρατήρηση. Μελετώνται τα χαρακτηριστικά του κτηρίου, όπως ο προσανατολισμός του, η τυπολογία της κατασκευής του, η στατική του κατάσταση, η φύση του εδάφους τριγύρω, η παρουσία υδατοφόρων στρωμάτων, πιθανή διαρροή του νερού από σωληνώσεις. Καθορίζονται με ακρίβεια τα σημεία εκδήλωσης της διαβρωτικής δράσης της υγρασίας, όπως εξανθήσεις, διάφοροι λεκέδες, βιολογικές επικαθήσεις, απόσπαση επιχρίσματος.

Εξωτερική επιθεώρηση

- Έλεγχος των επιφανειών της στέγης, των απορροών των όμβριων υδάτων
- Παρατήρηση της κατάστασης των πλίνθων, λίθων, κονιαμάτων, επιχρισμάτων
- Έλεγχος της κατασκευής της τοιχοποιίας, της ύπαρξης ρωγμών, τις επικαλύψεις
- Παρατήρηση των εξωτερικών στοιχείων από ξύλο (και τα παράθυρα και τις πόρτες)
- Ύπαρξη και θέση αεραγωγών
- Ύπαρξη καπνοδόχων
- Αν υπάρχουν σημάδια από προηγούμενες επεμβάσεις
- Αν συνορεύει με κήπο

Εσωτερική επιθεώρηση εσωτερικού (ορατά σημάδια)

- Ανάπτυξη μυκήτων στο κράσπεδο ή στα ξύλινα στοιχεία
- Αποφλοιώσεις ταπετσαρίας/ επιχρισμάτων
- Ύπαρξη εξανθήσεων

- Ανάπτυξη μούχλας, ύπαρξη λεκέδων
 - Ύπαρξη υγρών περιοχών, σταγονιδίων νερού
 - Εξέταση περιμετρικά και στο κέντρο των ξύλινων πατωμάτων
 - Έλεγχος της περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου
 - Εξέταση και έλεγχος της κατάστασης της ένωσης των δαπέδων με την τοιχοποιία
 - Έλεγχος για σημάδια από άλλη επέμβαση
 - Σημείωση τόσο της οριζόντιας όσο και της κάθετης ένδειξης του υγρόμετρου
 - Έλεγχος για νέα επιχρίσματα, το ύψος μέχρι το οποίο εφαρμόστηκαν και την κατάστασή τους αν είναι δυνατό π.χ. αποκατάστασης, άμμου/ τσιμέντου, γύψος
 - Έλεγχος για την ύπαρξη εξαερισμού στο πάτωμα
 - Έλεγχος για πιθανές διαρροές στο σύστημα ύδρευσης και αποχέτευσης
- Επιπλέον συλλέγονται στοιχεία σχετικά:
- Με την ιστορία και τη χρήση του κτηρίου
 - Τον τρόπο ζωής των κατοίκων (ύπαρξη κεντρικής θέρμανσης, εξαερισμού)

Ακολουθεί τεκμηρίωση της κατάστασης του κτηρίου είτε με φωτογραφίες είτε με σχέδια.

Στη συνέχεια εφαρμόζονται τεχνικές οι οποίες έχουν ως στόχο να ανιχνεύσουν ποιοτικά και ποσοτικά την περιεχόμενη υγρασία σε χαρακτηριστικές ζώνες που επιλέγονται μετά από την επιθεώρηση.

2ο βήμα-Μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας. Μετά τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις ακολουθεί η χρήση σύγχρονων μεθόδων για την ποιοτική και ποσοτική ανίχνευση της υγρασίας στην τοιχοποιία. Αναλυτικότερα :

- Με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου είναι δυνατό να έχει κανείς μια εποπτική εικόνα της ύπαρξης και της κατανομής της υγρασίας στην τοιχοποιία.
- Με τη χρήση υγρόμετρου με ειδικούς ακροδέκτες είναι δυνατή η μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι ενδέχεται η ένδειξη του υγρόμετρου να αποκλίνει από την πραγματική, λόγω της παρουσίας των αλάτων, που μεταβάλλουν την αγωγιμότητα της τοιχοποιίας.

- Δειγματοληψία σε διαφορετικά ύψη και βάθη της τοιχοποιίας. Τα δείγματα που συλλέγονται μπορούν να ζυγιστούν επί τόπου, ή να φυλαχτούν σε δοχεία ερμητικά κλειστά και να μεταφερθούν στο εργαστήριο.

Β' φάση-Αναλυτική μελέτη

1ο βήμα-Μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας. Η πιο ασφαλής μέθοδος για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υγρασίας των δειγμάτων είναι η βαρυμετρική μέθοδος. Υπολογίζεται η απώλεια βάρους δειγμάτων που ελήφθησαν από την τοιχοποιία από τα διάφορα ύψη και βάθη.

2ο βήμα-Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των διαλυτών αλάτων. Για την ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των διαλυτών αλάτων λαμβάνονται από την τοιχοποιία δείγματα από κατάλληλα ύψη και βάθη, ανάλογα με την ηλικία της τοιχοποιίας και των φυσικοχημικών συνθηκών που σχετίζονται με τη διαλυτότητα των αλάτων. Συνήθως η ταυτοποίηση των αλάτων γίνεται είτε με τη χρήση της φασματοσκοπίας υπεριώθρου, ενώ με ατομική απορρόφηση προσδιορίζονται τα ιόντα Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} .

3ο βήμα-Χαρακτηρισμός των δομικών υλικών. Ακολουθεί μια σειρά από μεθόδους, αναλύσεις χημικές, φυσικές, ορυκτολογικές, πετρογραφικές, βιολογικές, με στόχο των χαρακτηρισμό των δομικών υλικών.

4ο βήμα-Ανάλυση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Αναλύονται τα περιβαλλοντικά δεδομένα της περιοχής και προσπαθούν να συσχετιστούν με την περιεχόμενη υγρασία, αλλά και τη φθορά της τοιχοποιίας.

2.5 Τεχνικές για την αντιμετώπιση της υγρασίας

Η υγρασία στις κατασκευές αποτελεί ένα πρόβλημα και στο πέρασμα του χρόνου χρησιμοποιήθηκαν ένας μεγάλος αριθμός από τεχνικές και υλικά για να αντιμετωπιστεί.

Οι Φοίνικες τον 7ο π.χ., χρησιμοποιούσαν κονιάματα με σπασμένο κεραμικό (Cocciopesto) στο εσωτερικό των δεξαμενών νερού. Κονιάματα ποζολανικά χρησιμοποιούσαν και οι Ρωμαίοι στο εσωτερικό δεξαμενών και υδραγωγείων. Στις μέρες μας υπάρχει μια πληθώρα υλικών αλλά και τεχνικών για την αντιμετώπιση της ανερχόμενης υγρασίας.⁴⁷

Η κατηγοριοποίηση τους μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως σε:

- καταστρεπτικές ή μη (ανάλογα με το αν επεμβαίνουν ή όχι στην τοιχοποιία)
- άμεσες ή έμμεσες και συμπληρωματικές (επέμβαση στην τοιχοποιία ή στο περιβάλλον ή και στα δύο)

Πρέπει να τονιστεί ότι καλύτερη μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η πρόληψη του. Ο μηχανισμός δράσης τους βασίζεται γενικά:

- στη μείωση ή ακόμη και στην εξάλειψη της ροής της υγρασίας από το έδαφος ή στη μείωση του νερού των θεμελιώσεων
- στην αύξηση της εξάτμισης της υγρασίας προς το εξωτερικό περιβάλλον

Έμμεσες μέθοδοι επέμβασης

Στις έμμεσες μεθόδους επεμβαίνουμε στο περιβάλλον της κατασκευής.⁴⁸ Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- **Η αποστράγγιση** γύρω από τις θεμελιώσεις. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στο άνοιγμα μιας περιμετρικής τάφρου αερισμού γύρω από τις θεμελιώσεις του κτηρίου, αν το έδαφος έχει κατάλληλη κλίση ή στην αποστράγγιση των υδάτων με χρήση κάποιας αντλίας. Η επέμβαση εξαρτάται από το είδος της τοιχοποιίας. Αν τα θεμέλια αποτελούνται από κάποιο υλικό με θιξοτροπικές ιδιότητες πρέπει να αποφεύγεται γιατί υπάρχει κίνδυνος να μετατραπεί αυτό σε σκόνη.

Η περιμετρική τάφρος μπορεί να είναι ανοικτή, κλειστή ή στεγασμένη. Προτείνεται για υφιστάμενες κατασκευές με παρουσία υγρασία που προέρχεται από:

- επιφανειακά στάσιμα ή ρέοντα νερά
- διηθούμενα νερά που προσβάλλουν τα πλευρικά νερά

Έχει περιορισμένη αποτελεσματικότητα στην περίπτωση ύπαρξης υπόγειων νερών.⁴⁹

- **Ο εξαερισμός-κλιματισμός**, προκειμένου για τον εσωτερικό χώρο ενός κτηρίου.

Άμεσες μέθοδοι αντιμετώπισης

Στις άμεσες μεθόδους επεμβαίνουμε στην ίδια την κατασκευή. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- **Οριζόντια στεγανοποίηση**

Η οριζόντια στεγανοποίηση πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- α) με το κόψιμο του τοίχου και την εισαγωγή ενός αδιαπέρατου διαφράγματος
- β) με τη χρήση διαφόρων ουσιών που σχηματίζουν μία αδιαπέρατη ζώνη στον τοίχο.

Οι δύο αυτές μέθοδοι στοχεύουν στην δημιουργία ενός φράγματος στην ανερχόμενη υγρασία.

1α) Στην πρώτη περίπτωση ο τοίχος κόβεται και εισάγεται ένα αδιαπέρατο διάφραγμα με σκοπό να παρεμποδίσει την ανερχόμενη υγρασία. Οι τομές του τοίχου γίνονται σε οριζόντια διεύθυνση και σε χαμηλά σημεία που παρουσιάζουν έντονη υγρασία που προέρχεται από το έδαφος. Ο τοίχος κόβεται με ηλεκτρικό πριόνι ή με καροτέζα με κεφαλή από διαμάντι. Στη συνέχεια εισάγεται ένα αδιαπέρατο, χημικά ουδέτερο υλικό, το οποίο αντέχει στις μηχανικές φορτίσεις, όπως φύλλα ή ελάσματα πλαστικού, αλουμινίου, μολύβδου, ανοξειδωτού χάλυβα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά τεχνικά προβλήματα.

1β) Στη δεύτερη περίπτωση δημιουργείται στην τοιχοποιία με τη χρήση κατάλληλων χημικών μια αδιαπέρατη από την υγρασία ζώνη. Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται έχουν υδρόφοθο χαρακτήρα και είναι συνήθως σιλικονούχες ή εποξειδικές ρητίνες και πολυουρεθάνες. Η μέθοδος περιλαμβάνει τρία στάδια. Αρχικά αποσπάται το επίχρισμα και ο τοίχος «πλένεται» για την απομάκρυνση των εύθρυπτων μερών και των αλάτων. Στη συνέχεια με τη βοήθεια τρυπάνων ή καροτέζων ανοίγονται οπές. Ο αριθμός των οπών καθώς και η κατανομή τους εξαρτώνται από το υλικό που πρόκειται να

χρησιμοποιηθεί, από την πίεση με την οποία αυτό εισάγεται, από τη δυνατότητα απορρόφησής του και τέλος από τον τύπο της τοιχοποιίας. Ακολουθεί η εισαγωγή του υλικού η οποία γίνεται με έγχυση με ή χωρίς πίεση (με τη βοήθεια της βαρύτητας). Το ποσοστό επιτυχίας της οριζόντιας στεγανοποίησης είναι περιορισμένο εξαιτίας της φύσης και της ανθεκτικότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται, τη παρουσία αλάτων που δυσχεραίνει τη σωστή εφαρμογή τους, καθώς επίσης και από την ανικανότητά τους να εμποτίσουν τον τοίχο στο συνολικό του πάχος.⁵⁰

• Ηλεκτρικά συστήματα

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η ηλεκτροεξώσμωση (ενεργητική και παθητική) και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι.

Η ηλεκτροεξώσμωση στοχεύει στην αναίρεση του αιτίου εμφάνισης του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης. Ξεκινά από τη διαπίστωση ότι μεταξύ του τοίχου και του εδάφους υπάρχει μία διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Τα τοιχώματα των τριχοειδών των δομικών υλικών και το επάνω μέρος του τοίχου θεωρείται ότι φέρουν αρνητικό φορτίο, ενώ το έδαφος θετικό. Η ηλεκτροεξώσμωση προσπαθεί να αντιστρέψει την παραπάνω φυσική διαδικασία καθιστώντας το έδαφος αρνητικό πόλο και το επάνω μέρος του τοίχου θετικό, με αποτέλεσμα τα μόρια του νερού να κινούνται από τον τοίχο στο έδαφος. Υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτροεξώσμωσης, η παθητική και η ενεργητική.

Η παθητική ηλεκτροεξώσμωση προσπαθεί να αναιρέσει τη διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ του τοίχου και του εδάφους και έτσι να σταματήσει η τριχοειδής αναρρίχηση, δεδομένου ότι αναιρεί το αίτιο εμφάνισής της. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται ως εξής: Στην αρχή αφαιρείται το επίχρισμα. Μετά με τη βοήθεια τρυπανιών ανοίγονται οπές ανά 50 εκατοστά περίπου και σε ύψος 80 εκατοστών από το έδαφος μέσα στις οποίες εισάγονται ειδικοί μεταλλικοί δέκτες οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους οριζόντια με έναν αγωγό από χαλκό. Ο αγωγός για να κλείσει το κύκλωμα γειώνεται με μεταλλικές ράβδους σε βάθος κάτω από το επίπεδο θεμελίωσης.

Βελτίωση της μεθόδου αυτής μπορεί να πραγματοποιηθεί με το συνδυασμό της με ηλεκτροφόρηση, που προϋποθέτει γέμισμα πλήρωση των ανοιγμάτων των

ηλεκτροδίων με τα κατάλληλα υλικά (μέθοδος Traber) και συνεχή παρακολούθηση τάσεων, εντάσεων ρεύματος, αντιστάσεων και του pH του τοίχου, καθώς και μελέτη της χημικής σύστασης των αλάτων.

Στην ενεργητική ηλεκτροεξώσμωση εφαρμόζεται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο με στόχο να αντιστραφεί η αρχική διαφορά δυναμικού. Αυτό πραγματοποιείται με εφαρμογή στο επάνω μέρος της τοιχοποιίας θετικών ηλεκτροδίων, οπότε ο τοίχος καθίσταται θετικός πόλος, ενώ στο έδαφος τοποθετούνται αρνητικά ηλεκτρόδια, οπότε το έδαφος γίνεται αρνητικός πόλος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ρέει το νερό προς το έδαφος. Και τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται με μία κεντρική μονάδα ελέγχου.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ενέργεια που απαιτήθηκε για την ξήρανση ενός τμήματος μιας τοιχοποιίας πάχους 60 εκατοστών, μήκους 4 μέτρων και ύψους 2 μέτρων με περιεχόμενη υγρασία 20%, που αντιστοιχεί περίπου σε 1 τόνο νερού σε ποσοστό 3%, ήταν περίπου 700 KWh. Αυτό συνεπάγεται ότι πριν την εφαρμογή της μεθόδου, πρέπει να προηγείται μια οικονομοτεχνική μελέτη για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους εφαρμογής της μεθόδου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε τοιχοποιίες με υψηλό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας, της τάξης του 15%, γιατί με την ξήρανση η περιεχόμενη υγρασία μειώνεται σε ποσοστά κάτω από την τιμή της κρίσιμης περιεκτικότητας της, δυσχεραίνεται η κυκλοφορία του νερού στο εσωτερικό των πόρων, οπότε σταματά και η λειτουργία της μεθόδου.⁵¹

Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Βασίζονται στη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αντιθέτων των κανονικών, αντιστρέφοντας τη δύναμη που ασκείται στα μόρια του νερού και περιορίζοντας έτσι την αναρρίχηση.

• **Ατμοσφαιρικοί σίφωνες**

Οι διάφοροι τύποι σιφώνων διακρίνονται ανάλογα με το σχήμα τους, σε κυκλικούς, ημικυκλικούς, τριγωνικούς και πολυγωνικούς. Το υλικό κατασκευής τους μπορεί να είναι

κεραμικό, πλαστικό ή ανοξειδωτος χάλυβας. Αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι πολυγωνικοί από κεραμικό υψηλού πορώδους, οι οποίοι τοποθετούνται στον τοίχο κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ένα τους άκρο να βρίσκεται στην επιφάνεια του. Το ρεύμα αέρα που δημιουργείται στο εσωτερικό του σωλήνα επιταχύνει την εξάτμιση. Συνήθως τοποθετούνται σε οριζόντιες ζώνες σε απόσταση 15 εκατοστών από το έδαφος.

Υπάρχει αρνητική κριτική σχετικά με την εφαρμογή και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής σε περιοχές με υπερβολικά μεγάλη υγρασία, αλλά λόγω και της αισθητικής αλλοίωσης των αρχιτεκτονικών επιφανειών των μνημείων που προκαλεί.

Ενδιάμεσες μέθοδοι και συμπληρωματικές μέθοδοι

Οι ενδιάμεσες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εξυγίανση μιας τοιχοποιίας από την υγρασία χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η δημιουργία κενών στους τοίχους και τα επιχρίσματα ελεγχόμενης μικροδομής.

• Δημιουργία κενών μεταξύ των τοίχων

Προτείνεται η δημιουργία κενών μεταξύ των τοίχων έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η είσοδος του νερού. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Koch, από το όνομα του αρχιτέκτονα που ανακάλυψε την τεχνική αυτή. Βασίζεται στη μείωση της ταχύτητας ανόδου της υγρασίας. Βασικά μειονεκτήματά της είναι η μεταβολή της στατικής κατάστασης της τοιχοποιίας (ανακατανομές των φορτίων), καθώς και η αλλοίωση της μορφολογίας του κτηρίου.⁴⁹

• Επιχρίσματα ελεγχόμενης μικροδομής

Τα επιχρίσματα ελεγχόμενης μικροδομής, αποτελούν ένα προστατευτικό επίστρωμα της τοιχοποιίας, με εύκολη εφαρμογή. Δεν είναι μια επιθετική τεχνική για την τοιχοποιία και δε δημιουργεί ασυνέχειες σε αυτήν. Η λειτουργία τους είναι τριπλή:

- επιτρέπουν τη μεταφορά της υγρασίας στην τοιχοποιία

- μεγαλώνουν την επιφάνεια επαφής της τοιχοποιίας με τον ατμοσφαιρικό αέρα χάρη στους μακροπόρους που περιέχουν, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό το ρυθμό εξάτμισης της υγρασίας

- αποτελούν ένα προστατευτικό θυσιαζόμενο επίστρωμα της τοιχοποιίας στους περιβαλλοντικούς παράγοντες φθοράς

Ουσιαστικά τα επιχρίσματα αυτά μεταβάλλουν το μηχανισμό αναπνοής της τοιχοποιίας. Υπάρχει βέβαια το ενδεχόμενο η εφαρμογή τους να μην μπορεί να προκαλέσει την ξήρανση μιας τοιχοποιίας, αν η ταχύτητα διείσδυσης της υγρασίας στην τοιχοποιία είναι πολύ υψηλή και στην περίπτωση αυτή πρέπει να συνοδεύονται και από την εφαρμογή και άλλων μεθόδων. Για το λόγο αυτό κατατάσσονται στις ενδιάμεσες μεθόδους.

Το όλο σύστημα του επιχρίσματος αποτελείται συνήθως από δύο στρώματα τα οποία έχουν διαφορετικό πάχος, διαφορετική σύνθεση και λειτουργία :

- Το πρώτο στρώμα (primer, rinzaffo) έχει πάχος περίπου 0,5cm. Είναι ένα στρώμα προετοιμασίας για την τοποθέτηση του αναπνέοντος επιχρίσματος και για αυτό θα πρέπει να παρουσιάζει καλή πρόσφυση στο υπόστρωμα και να έχει τέτοια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, τα οποία να διευκολύνουν τη μεταφορά της υγρασίας ανάμεσα στα στρώματα.

- Το αναπνέον επιχρίσμα έχει πάχος περίπου 2-3 cm. Είναι το στρώμα αυτό που αυξάνει το ρυθμό εξάτμισης της υγρασίας.

Το φινίρισμα της επιφάνειας πρέπει να γίνεται με στρώμα με κατάλληλο πορώδες.⁵²

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- η εύκολη εφαρμογή της
- το λογικό κόστος
- το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σεισμικές περιοχές, γιατί δε δημιουργεί ασυνέχειες στην τοιχοποιία επηρεάζοντας τη στατική κατάσταση ενός κτηρίου
- την προστασία που παρέχει στην τοιχοποιία έναντι των περιβαλλοντικών παραγόντων φθοράς
- την ελαστομηχανική και χημική συμβατότητα της με το υπόστρωμα
- την αντοχή της στη διάβρωση από διαλυτά άλατα

Τα μειονεκτήματά τους είναι ότι:

- πριν την εφαρμογή της πρέπει να αφαιρούνται τα παλιά επιχρίσματα
- δε μπορεί να εφαρμοστεί σε επιφάνειες καλλιτεχνικής αξίας
- απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά την προετοιμασία και κατά την εφαρμογή της, γιατί αν δεν ακολουθηθούν με ακρίβεια οι οδηγίες που υποδεικνύει η εταιρεία παρασκευής τους, ενδέχεται οι ιδιότητες των επιχρισμάτων μετά τη σκλήρυνσή να μην είναι οι απαιτούμενες.⁵³

3. Φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας

Η θερμότητα ορίζεται ως η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται μέσα από το όριο ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα – ή στο περιβάλλον – που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω ακριβώς αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο συστημάτων.

Η θερμότητα μεταδίδεται πάντα από σύστημα υψηλότερης προς σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η μοναδική αιτία αυτής της μεταφοράς ενέργειας είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ίδιο το σύστημα δεν περιέχει θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί να οριστεί μόνο στα όρια του συστήματος, κατά τη διαδικασία της μεταφοράς της από ένα σύστημα σε ένα άλλο και για όσο χρόνο διαρκεί η μεταφορά.

Το αντικείμενο της Μετάδοσης Θερμότητας είναι η διερεύνηση των μηχανισμών με τους οποίους η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ των σωμάτων και η ποσοτικοποίηση αυτής της συναλλαγής.

Σύστημα είναι μία διάταξη ή συνδυασμός διατάξεων, που περιέχουν την υπό μελέτη ποσότητα μάζας. Ουσιαστικά είναι ένα υλικό τμήμα, το οποίο μπορεί να εξεταστεί χωριστά από το περιβάλλον του.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί με τους οποίους πραγματοποιείται αυτή η μεταφορά ενέργειας. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται σε ακίνητο μέσο (στερεό, υγρό ή αέριο) και ονομάζεται αγωγή (conduction). Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται σε μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής

επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού και ονομάζεται συναγωγή (convection). Ο τρίτος μηχανισμός στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έτσι μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας, χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, με την εφαρμογή του τρίτου μηχανισμού, της θερμικής ακτινοβολίας (thermal radiation)^{54, 55}.

3.1 Αγωγή

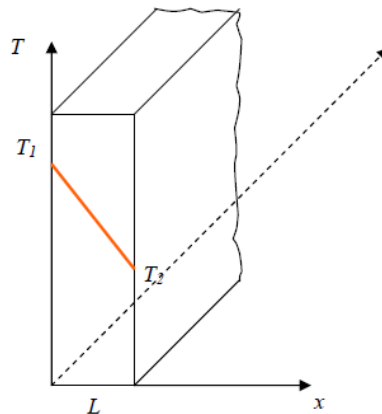
Η αγωγή θερμότητας συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από στοιχειώδη σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή μακροσκοπικά περιγράφεται (σε μία διάσταση) από τον Νόμο του Fourier. Ας θεωρήσουμε επίπεδο σώμα σταθερού πάχους L με τις άλλες δύο διαστάσεις του να εκτείνονται στο άπειρο (Εικόνα 3.1). Αν επικρατεί στην μία πλευρά του θερμοκρασία T_1 και στην άλλη πλευρά του θερμοκρασία T_2 μικρότερη της T_1 , ενώ η κλίση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του είναι σταθερή (γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας), τότε ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά την x διεύθυνση (κάθετα στο επίπεδο του σώματος) ανά μονάδα επιφάνειας δίδεται:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Το παραπάνω μέγεθος ονομάζεται πυκνότητα ροής θερμότητας ή πυκνότητα θερμороής (heat flux), ενώ η μονάδα μέτρησής του είναι W/m^2 (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας). Εκφράζει τη θερμική ενέργεια που περνά από μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, λήγω της θερμοκρασιακή κλίσης σε διεύθυνση κάθετη στην εν λόγω επιφάνεια. Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση θερμότητας

πραγματοποιείται από υψηλότερες προς χαμηλότερες θερμοκρασίες, δηλαδή κατά τη φορά των αρνητικών θερμοκρασιακών κλίσεων.



Εικόνα 3.1 Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σώμα πάχους L κατά τη x διεύθυνση και απείρων διαστάσεων στα δύο άλλες διευθύνσεις.

Ο συντελεστής k στην παραπάνω σχέση ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity) με μονάδα μέτρησης $W/(m K)$. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται η θερμοκρασιακή κλίση (ενώ μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που θεωρήσαμε σταθερή θερμοκρασιακή κλίση στο εσωτερικό του σώματος (γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας), η παραπάνω σχέση γράφεται :

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3.2)$$

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια (θερμοροή μέσα από την εν λόγω επιφάνεια) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν A της επιφάνειας, δηλαδή:

$$q_x = q_x'' A = -k A \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

Η διεύθυνση της μετάδοσης θερμότητας είναι κάθετη στις ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες του σώματος. Είναι δηλαδή η πυκνότητα θερμοροής ένα διανυσματικό μέγεθος, το οποίο στις τρεις διαστάσεις δίδεται:

$$q'' = -k \nabla T = -k \left(\hat{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

όπου $T(x, y, z)$ το θερμοκρασιακό πεδίο εντός του σώματος. Ο τελεστής ∇ εφαρμοζόμενος σε ένα βαθμωτό πεδίο, δίνει διάνυσμα, το οποίο έχει διεύθυνση κάθετη στις ισοεπιφάνειες του πεδίου, δίνει δηλαδή σε κάθε σημείο του χώρου τη διεύθυνση προς την οποία υπάρχει η μέγιστη μεταβολή του πεδίου με φορά προς την αύξουσα τιμή του.

Η πυκνότητα θερμοροής είναι διάνυσμα, οι τρεις συνιστώσες της θα δίδονται:

$$\begin{aligned}q_x'' &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \\q_y'' &= -k \frac{\partial T}{\partial y} \\q_z'' &= -k \frac{\partial T}{\partial z}\end{aligned}\tag{3.5}$$

Για την εξαγωγή των προηγούμενων σχέσεων, καθώς και της γενικευμένης μορφής του Νόμου του Fourier, έγινε η υπόθεση ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας παίρνει την ίδια τιμή σε κάθε διεύθυνση εντός του σώματος, δηλαδή το σώμα είναι ισότροπο ως προς την αγωγή θερμότητας.

3.2 Συναγωγή

Η συναγωγή αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως και στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα στοιχειώδη σωματίδια, που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την θερμική ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνησή τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού.

Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια, ή το αντίθετο. Γνωρίζουμε από τη μηχανική των ρευστών ότι στην περιοχή επαφής του ρευστού με στερεή επιφάνεια αναπτύσσεται το λεγόμενο οριακό στρώμα ταχύτητας (ή υδραυλικό οριακό στρώμα), ως αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του ρευστού. Στο οριακό στρώμα εμφανίζεται ομαλή μετάβαση από την ταχύτητα της ροής μακριά από το τοίχωμα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) στην μηδενική ταχύτητα στην επιφάνεια του ακίνητου τοιχώματος. Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η ταχύτητα της ροής πάνω στην επιφάνεια ισούται, ως γνωστόν, με την ταχύτητα της επιφάνειας (συνθήκη μη ολίσθησης). Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται κατάντι της ροής.

Στην περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της στερεής επιφάνειας και του ρευστού εμφανίζεται και το λεγόμενο θερμικό οριακό στρώμα (thermal boundary layer), του οποίου το πάχος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό του υδραυλικού οριακού στρώματος. Εντός του θερμικού οριακού στρώματος εμφανίζεται ομαλή μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας T_s έως τη θερμοκρασία της κύριας ροής T_o . Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από την θερμή επιφάνεια στο ψυχρότερο ρευστό. Επειδή στην περιοχή κοντά στο στερεό τοίχωμα οι ταχύτητες της ροής είναι πολύ μικρές, ο μηχανισμός της διάχυσης είναι αυτός που επικρατεί. Αντίθετα, μακριά από το τοίχωμα, όπου έχουν αυξηθεί οι ταχύτητες της ροής, επικρατεί η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά. Ειδικά πάνω στο τοίχωμα, όπου η σχετική ταχύτητα της ροής είναι μηδενική, υπάρχει αποκλειστικά μετάδοση θερμότητας με διάχυση.

Το φαινόμενο της συναγωγής εξαρτάται από την ροή του ρευστού (και τα χαρακτηριστικά της) και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας. Μια γενική σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, ο οποίος δίνει την πυκνότητα ροής θερμότητας:

$$q_x'' = h (T_s - T_o) \quad (3.6)$$

Ο συντελεστής h ονομάζεται συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και δίδεται σε $W/(m^2K)$. Η τιμή του εξαρτάται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Ο προσδιορισμός του συνήθως απαιτεί σοβαρές γνώσεις ρευστομηχανικής, ενώ για τυπικές ροές η τιμή του βρίσκεται από πίνακες και διαγράμματα.

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια (θερμοροή μέσα από την εν λόγω επιφάνεια) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν A της επιφάνειας, δηλαδή:

$$q_x = q_x'' A = A h (T_s - T_o) \quad (3.7)$$

3.3 Θερμική ακτινοβολία

Κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο), το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από 0 K , εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία (σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – φωτονίων) δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Σε αντίθεση με τους άλλους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή), η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να πραγματοποιείται και εν κενώ (στην πραγματικότητα η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται πιο αποδοτικά εν κενώ). Ας θεωρήσουμε τη στερεή επιφάνεια ενός σώματος. Η ακτινοβολία που εξέρχεται από την επιφάνεια παράγεται στο εσωτερικό του σώματος και ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας καλείται πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας E , ενώ η μέγιστη τιμή της E_b δίδεται από τον νόμο Stefan – Boltzman ως:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3.8)$$

όπου T_s η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας (σε K) και σ η σταθερά των Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$).

Η επιφάνεια που εκλύει τη μέγιστη αυτή ισχύ ακτινοβολίας ονομάζεται μέλαν σώμα (blackbody). Σε μία πραγματική επιφάνεια η ακτινοβολούσα ισχύς είναι προφανώς μικρότερη για την ίδια θερμοκρασία και δίδεται:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3.9)$$

όπου ε η ικανότητα εκπομπής (emissivity) της επιφάνειας, με τιμές μεταξύ 0 και 1. Η τιμή της εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και δείχνει πόσο προσεγγίζει η συγκεκριμένη επιφάνεια το μέλαν σώμα.

Εκτός από την εκπομπή ακτινοβολίας από μια επιφάνεια, γίνεται και πρόσπτωση ακτινοβολίας, η οποία παράγεται εκτός της επιφάνειας. Αν G η πυκνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (ισχύς ανά μονάδα επιφανείας), τότε ένα τμήμα της μπορεί να απορροφηθεί από το σώμα (αυξάνοντας την εσωτερική του ενέργεια), ένα τμήμα μπορεί να ανακλαστεί, ενώ το υπόλοιπο τμήμα μπορεί να διαπεράσει το σώμα (εάν αυτό είναι ημιδιαφανές).

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το σώμα περιγράφεται με την απορροφητικότητα α , οπότε ισχύει:

$$G_{\text{απορρ}} = \alpha G \quad (3.10)$$

Η θερμική ισχύς που ακτινοβολείται συχνά εκφράζεται σε μορφή αντίστοιχη με αυτή που μεταδίδεται με συναγωγή, δηλαδή:

$$q_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} A (T_s - T_{\varepsilon\xi}) \quad (3.11)$$

ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία, ο οποίος δίδεται:

$$h_{\text{rad}} \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_{\varepsilon\xi}) (T_s^2 + T_{\varepsilon\xi}^2) \quad (3.12)$$

Προφανώς η απορροφητικότητα παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η απορροφητικότητα της επιφάνειας δεν εξαρτάται μόνο από την επιφάνεια αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας.

Η ίδια επιφάνεια μπορεί να έχει διαφορετική απορροφητικότητα σε ακτινοβολίες διαφορετικού μήκους κύματος. Μόνο η απορροφώμενη ακτινοβολία μεταβάλλει

την εσωτερική ενέργεια του σώματος, ενώ η ανακλώμενη και η ακτινοβολία που διαπερνά το σώμα δεν έχουν προφανώς καμία επίδραση σε αυτή.

3.4 Θερμοφυσικές ιδιότητες της ύλης

Οι ιδιότητες της ύλης, που συνδέονται με τη μετάδοση θερμότητας, συνήθως χαρακτηρίζονται ως θερμοφυσικές ιδιότητες. Αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς. Στην πρώτη κατηγορία συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k που συνδέεται με την αγωγή θερμότητας και η κινηματική συνεκτικότητα ν , που συνδέεται με τη συναγωγή θερμότητας.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δίνει μια ένδειξη του ρυθμού με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται εντός της ύλης. Αφού η αγωγή θερμότητας πραγματοποιείται σε ατομικό επίπεδο, μέσω των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας θα εξαρτάται από τη μοριακή δομή του σώματος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ορίζεται από το Νόμο του Fourier ως:

$$k \equiv -\frac{q_x''}{(\partial T / \partial x)} \quad (3.13)$$

Αφού ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη μοριακή δομή του σώματος, θα μεταβάλλεται σημαντικά ανάμεσα σε σώματα διαφορετικής φάσης. Στα στερεά, όπου οι διαμοριακές αλληλεπιδράσεις είναι πολύ ισχυρές, περιμένουμε μεγάλες τιμές του συντελεστή. Μικρότερες τιμές αναμένουμε να παίρνει στην περίπτωση των υγρών, ενώ στα αέρια, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων και των ατόμων είναι σχετικά πολύ ασθενείς, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας θα παίρνει τις μικρότερες τιμές.

Στα στερεά σώματα η μετάδοση θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται μέσω δύο μηχανισμών. Ο πρώτος συνδέεται με τη διάδοση κυμάτων στην κρυσταλλική δομή, ενώ ο δεύτερος συνδέεται με τη μετακίνηση των ελευθέρων

ηλεκτρονίων. Στα μη μεταλλικά υλικά ο πρώτος όρος είναι ο κυρίαρχος. Στην περίπτωση των κρυσταλλικών υλικών, η διάδοση των κυμάτων είναι πιο εύκολη, από την περίπτωση των άμορφων σωμάτων, οπότε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας παίρνει μεγαλύτερες τιμές για κρυσταλλικά υλικά. Ειδικά για μερικά κρυσταλλικά μη μεταλλικά υλικά, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να ξεπεράσει την τιμή μεταλλικών υλικών. Στα μεταλλικά υλικά κυρίαρχος όρος είναι αυτός που συνδέεται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μεταλλικού δεσμού. Ο συγκεκριμένος όρος είναι ανάλογος της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μετάλλου, ή αντίστοιχα αντιστρόφως ανάλογος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μετάλλου.

Οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τα στερεά, μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, η δε μεταβολή τους εξαρτάται από το σώμα και τη δομή του.

Η ικανότητα ενός σώματος να αποθηκεύει θερμική εσωτερική ενέργεια εκφράζεται από την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση c_p , που δίνει την αύξηση της αποθηκευμένης θερμικής εσωτερικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας για μοναδιαία αύξηση της απόλυτης θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τα υγρά και τα στερεά η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο και σταθερή πίεση ταυτίζονται.

Το γινόμενο της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση με την πυκνότητα δίνει την ειδική θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου, που εκφράζει την ικανότητα του σώματος να αποθηκεύει ενέργεια στον όγκο του. Επειδή τα στερεά που έχουν μεγάλη πυκνότητα έχουν μικρές τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας, ενώ τα υγρά, με μικρότερη πυκνότητα έχουν μεγαλύτερες τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας, με την εφαρμογή του παραπάνω γινομένου προκύπτει ότι πολλά υγρά και στερεά έχουν συγκρίσιμες τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας ανά μονάδα όγκου. Τα αέρια αντιθέτως, λόγω της πολύ μικρής τους πυκνότητας, έχουν πολύ χαμηλές τιμές της παραπάνω ιδιότητας, το οποίο εκφράζει τη χαμηλή τους ικανότητα να αποθηκεύουν θερμική εσωτερική ενέργεια.

Η αγωγή θερμότητας και η αποθήκευση θερμικής εσωτερικής ενέργειας δρουν ανταγωνιστικά στο εσωτερικό ενός σώματος. Το μέγεθος που εκφράζει την

ικανότητα ενός σώματος να άγει θερμότητα σε σχέση με την ικανότητά του να την αποθηκεύει, ονομάζεται θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity) α και δίδεται:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.14)$$

Τα υλικά με μεγάλη τιμή του α αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, σε αντίθεση με υλικά με μικρή τιμή της θερμικής διαχυτότητας, τα οποία απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο για να έρθουν σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον τους.

Οριακές συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης διάχυσης θερμότητας

Η επίλυση της εξίσωσης διάχυσης θερμότητας, επειδή περιέχει μερικές παραγώγους στις τρεις διευθύνσεις και ως προς τον χρόνο, απαιτεί την χρησιμοποίηση κατάλληλων οριακών και αρχικών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες αφορούν στον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής κατάστασης στα όρια του χωρίου στο οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασιακή διανομή. Οι αρχικές συνθήκες αφορούν στον προσδιορισμό του πεδίου θερμοκρασίας σε όλο το χωρίο στην αρχή του χρόνου και απαιτούνται στην περίπτωση που επιλύεται το μη μόνιμο (χρονικά) πρόβλημα (όταν η χρονική παράγωγος είναι μη μηδενική). Επειδή η χρονική παράγωγος είναι πρώτης τάξης, μία μόνο αρχική συνθήκη απαιτείται, ενώ αντίθετα, επειδή οι χωρικές παράγωγοι είναι δεύτερης τάξης απαιτούνται δυο οριακές συνθήκες για κάθε διεύθυνση.

Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο

Ως μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας ορίζουμε την κατάσταση όπου η θερμοκρασία είναι συνάρτηση μόνο μίας χωρικής παραμέτρου, στη διεύθυνση της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η αγωγή θερμότητας μέσα από τοίχο πεπερασμένου πάχους αλλά με άπειρες τις άλλες δύο διαστάσεις, η αγωγή θερμότητας στα τοιχώματα σωλήνα απείρου μήκους και η αγωγή θερμότητας στα τοιχώματα σφαιρικού δοχείου. Στην πρώτη περίπτωση η διεύθυνση αγωγής θερμότητας είναι η διεύθυνση η κάθετη στις δύο πλευρές του τοίχου, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις είναι η διεύθυνση

της ακτίνας. Αρχικά θα μελετηθεί η περίπτωση της αγωγής θερμότητας χωρίς παραγωγή θερμότητας στο εσωτερικό του σώματος.

3.5 Αγωγή θερμότητας μέσα από τοίχο

Για τη διερεύνηση του προβλήματος χρησιμοποιείται η εξίσωση διάχυσης θερμότητας εκφρασμένη σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Θεωρούμε ότι ο τοίχος έχει άπειρες διαστάσεις, με πεπερασμένο όμως (σταθερό) πάχος, ενώ σε κάθε πλευρά του η θερμοκρασία είναι παντού σταθερή. Ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία μεταβάλλεται μόνο σε διάσταση κάθετη στον τοίχο, οπότε το πρόβλημα είναι μονοδιάστατο. Αν αντίστοιχα θεωρηθεί μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο (οπότε μηδενίζεται ο αντίστοιχος χρονικός όρος) και δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας εντός του τοίχου, η εξίσωση διάχυσης θερμότητας γίνεται:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (3.15)$$

όπου η διεύθυνση x είναι κάθετη στις εξωτερικές επιφάνειες του τοίχου. Ο όρος εντός της παρενθέσεως στην παραπάνω σχέση είναι προφανώς η πυκνότητα θερμοροής κατά την x διεύθυνση και η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι αυτή δεν μεταβάλλεται κατά την εν λόγω διεύθυνση.

Υποθέτοντας σταθερή τιμή για τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k , η παραπάνω διαφορική εξίσωση ολοκληρώνεται, με τη γενική της λύση να προκύπτει:

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (3.16)$$

Οι σταθερές στην παραπάνω σχέση προσδιορίζονται με τη βοήθεια των οριακών συνθηκών. Η παραπάνω σχέση είναι προφανώς γραμμική, δηλαδή η θερμοκρασία εντός του τοίχου μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των δύο πλευρών του. Για την περίπτωση που γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες στις δύο πλευρές του τοίχου (περίπτωση οριακών συνθηκών τύπου Dirichlet) τότε οι δύο σταθερές προσδιορίζονται από την εφαρμογή της γενικής λύσης στις δύο επιφάνειες, για $x = 0$ και $x = L$, όπου το 0 αντιστοιχεί στην μία πλευρά και L το πάχος του τοίχου. Αν T_1 και T_2 οι δύο θερμοκρασίες τότε:

$$T(0) = T_1 \Rightarrow C_1 \cdot 0 + C_2 = T_1 \Rightarrow C_2 = T_1$$

$$T(L) = T_2 \Rightarrow C_1 L + C_2 = T_2 \Rightarrow C_1 L + T_1 = T_2 \Rightarrow C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.17)$$

Με αντικατάσταση των σταθερών στη γενική λύση προκύπτει:

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \quad (3.18)$$

Η πυκνότητα θερμοροής προκύπτει προφανώς:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = \frac{k}{L} (T_1 - T_2) \quad (3.19)$$

και όπως περιμέναμε είναι ανεξάρτητη της θέσης x . Αντίστοιχα η θερμοροή μέσα από επιφάνεια εμβαδού A , κάθετη στη διεύθυνση x , δίδεται:

$$q_x = q_x'' A = \frac{k A}{L} (T_1 - T_2) \quad (3.20)$$

3.5.1 Η έννοια της θερμικής αντίστασης

Κατά την επίλυση προβλημάτων μονοδιάστασης μετάδοσης θερμότητας χωρίς την παρουσία πηγών θερμότητας, μεγάλη διευκόλυνση προσφέρει η εισαγωγή της έννοιας της θερμικής αντίστασης. Γενικά ως αντίσταση ορίζουμε το λόγο της δρώσας δύναμης προς το ρυθμό μετάδοσης, που είναι αποτέλεσμα της δρώσας δύναμης. Έτσι στην περίπτωση του ηλεκτρισμού, η ηλεκτρική αντίσταση δίδεται από το Νόμο του Ohm.

Με ανάλογο τρόπο, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Fourier για τη μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας μέσα από ένα τοίχο, μπορούμε να ορίσουμε τη θερμική αντίσταση αγωγής ως:

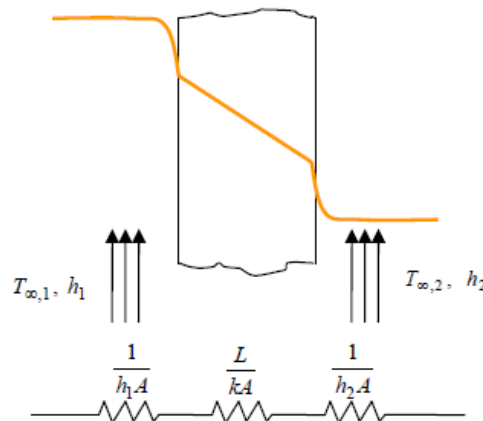
$$R_{t, αγ} \equiv \frac{T_1 - T_2}{q_x} = \frac{L}{k A} \quad (3.21)$$

Αντίστοιχα ορίζεται η θερμική αντίσταση συναγωγής:

$$R_{t, \text{συν}} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{q_x} = \frac{1}{h A} \quad (3.22)$$

Κατά τη μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας (χωρίς παραγωγή θερμότητας εντός των σωμάτων) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές αντίστοιχες με αυτές των ηλεκτρικών κυκλωμάτων για την εύρεση της συνολικής θερμικής αντίστασης επάλληλων σωμάτων.

Ας θεωρήσουμε έναν τοίχο ο οποίος έρχεται σε επαφή από τις δύο πλευρές του με ρεύματα ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας.



Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ρευμάτων, θερμότητα μεταδίδεται με συναγωγή από το θερμότερο ρεύμα προς τον τοίχο. Στη συνέχεια, η θερμότητα αυτή μεταδίδεται με αγωγή προς την άλλη πλευρά του τοίχου και από τη δεύτερη επιφάνεια με συναγωγή προς το ψυχρότερο ρεύμα (έχουμε προς το παρόν αμελήσει την ύπαρξη ακτινοβολίας).

Επειδή έχουμε θεωρήσει μονοδιάστατο πρόβλημα (δηλαδή δεν υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση και άρα και μετάδοση θερμότητας σε άλλη διεύθυνση πλην της κάθετης στο τοίχωμα), ενώ δεν υπάρχουν και όροι πηγής θερμότητας, η εφαρμογή του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου σε οποιαδήποτε θέση κάθετα στον τοίχο δίνει ότι η πυκνότητα θερμοροής είναι σταθερή (άρα και η θερμοροή από επιφάνεια σταθερού εμβαδού A). Οπότε:

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{(1/h_1 A)} = \frac{T_1 - T_2}{(L/kA)} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{(1/h_2 A)} \quad (3.23)$$

Όμως η θερμοροή μπορεί να εκφραστεί και με βάση τη συνολική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο ρευμάτων, χρησιμοποιώντας την έννοια της συνολικής θερμικής αντίστασης του συστήματος:

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{tot}} = \frac{(T_{\infty 1} - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_{\infty 2})}{R_{tot}} \quad (3.24)$$

Αντικαθιστώντας από την προηγούμενη σχέση τις θερμοκρασιακές διαφορές και λύνοντας ως προς την ολική θερμική αντίσταση προκύπτει:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{k A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.25)$$

Η παραπάνω σχέση είναι αντίστοιχη της εν σειρά άθροισης ηλεκτρικών αντιστάσεων, δηλαδή η συνολική θερμική αντίσταση του σώματος ισούται με το άθροισμα των επί μέρους αντιστάσεων που συναντά διαδοχικά η θερμοροή. Η ίδια τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν ο τοίχος αποτελείται από διαδοχικά επάλληλα στρώματα υλικών σταθερού πάχους και διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας.

Εκτός από την εν σειρά σύνδεση θερμικών αντιστάσεων μπορούμε να έχουμε και σύνδεση θερμικών αντιστάσεων εν παράλληλω, όταν οι αντίστοιχοι μηχανισμοί θερμοροής δρουν παράλληλα. Έτσι στην περίπτωση ύπαρξης ταυτόχρονης μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και με ακτινοβολία, οι δύο μηχανισμοί μεταφέρουν θερμότητα παράλληλα και κατ' αυτό τον τρόπο πρέπει να θεωρηθεί η σύζευξη των αντίστοιχων αντιστάσεων. Ειδικά για τη μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία η αντίστοιχη αντίσταση θα δίδεται:

$$R_{t, ακτ} \equiv \frac{T_s - T_{περ}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (3.26)$$

Η παράλληλη σύνδεση των αντιστάσεων ακτινοβολίας και συναγωγής μπορεί να γίνει αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου (που περιέχει την επιφάνεια) $T_{περ}$ ισούται με τη θερμοκρασία της επ' άπειρον ροής του ρευστού.

Ειδικά στην περίπτωση σύνδεσης επάλληλων στρωμάτων υλικών διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η θερμική αντίσταση που οφείλεται στην ατελή επαφή των στρωμάτων μεταξύ τους. Η θερμική αυτή αντίσταση οφείλεται στην παρουσία κενών μεταξύ των δύο στρωμάτων, στα

οποία η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με αγωγή (στον αέρα που παρεμβάλλεται) και με ακτινοβολία. Επειδή ο αέρας είναι κακός αγωγός της θερμότητας, είναι προφανές ότι η παρουσία των κενών συνδέεται με αντίσταση στην αγωγής θερμότητας. Η μείωση της αντίστασης αυτής μπορεί να γίνει με συμπίεση των επάλληλων στρωμάτων και με μείωση της τραχύτητας των επιφανειών τους, στην οποία οφείλεται η κακή επαφή τους. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο υγρό υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο θα γεμίζει επιτυχώς τα κενά μεταξύ των στρωμάτων, μειώνοντας τη θερμική τους αντίσταση.

Η θερμική αντίσταση επαφής μεταξύ διαφόρων υλικών, με διαφορετικές τραχύτητες επιφάνειας, μπορεί να βρεθεί από πίνακες που υπάρχουν και έχουν προκύψει πειραματικά.

II. Ειδικό θεωρητικό

1. Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEM: Finite Element Method) είναι μία υπολογιστική μέθοδος εύρεσης προσεγγιστικών λύσεων σε συστήματα διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους. Εξαιτίας της ποικιλομορφίας και της ευελιξίας της συγκεκριμένης μεθόδου, ως εργαλείο ανάλυσης, είναι εύκολη η λειτουργική της εφαρμογή σε ιδιαίτερα προβλήματα.

Με τη βοήθεια των υπολογιστών, οι περίπλοκες γεωμετρίες καθώς και οι συνθήκες του προβλήματος διατηρούνται και δεν απλοποιούνται αυθαίρετα οδηγώντας σε ανακρίβειες και λανθασμένες απαντήσεις, τελικά εξάγεται μία κατά προσέγγιση αριθμητική λύση.

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δίνει για ένα πρόβλημα μία προσεγγιστική λύση. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στο διαμερισμό ενός χωρίου Ω , στο οποίο αναζητούμε τη λύση μιας διαφορικής εξίσωσης, με κατάλληλες οριακές συνθήκες σε πεπερασμένα στοιχεία απλού γεωμετρικού σχήματος. Πιο αναλυτικά το αντικείμενο στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε την κατανομή μίας μεταβλητής θεωρείται ότι αποτελείται από πολλά και μικρά διαδοχικά

τμήματα ή υποπεριοχές, που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Αυτές οι δομικές μονάδες συνδέονται μεταξύ τους σε κόμβους (nodes). Πιο σωστά οριακοί κόμβοι, διότι βρίσκονται στο άκρο του στοιχείου, συνήθως, δηλαδή στο σύνορο μεταξύ στοιχείων. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το στοιχείο μπορεί να έχει κόμβους και στο εσωτερικού του. Σκοπός μας είναι να βρούμε την κατανομή της μεταβλητής μέσα στο σώμα, επομένως θεωρούμε ότι η κατανομή αυτής της μεταβλητής μπορεί να προσεγγιστεί από μία απλή συνάρτηση για κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Έτσι συγκεντρώνουμε ένα πλήθος εξισώσεων, έπειτα από την εφαρμογή σε κάθε στοιχείο, με αγνώστους τις τιμές της μεταβλητής στους κόμβους των στοιχείων.

Γενικά, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, διατυπώνονται οι εξισώσεις για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και συνδυάζονται για να ληφθεί ένα σύστημα εξισώσεων για ολόκληρο το σώμα.^{56, 57}

1.1 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δυνατότητα να διατυπώσουμε λύσεις για τα μεμονωμένα στοιχεία και έπειτα να τις συνθέσουμε και να αποκομίσουμε μια λύση η οποία αντιπροσωπεύει ολόκληρο το πρόβλημα. Στην ουσία ένα σύνθετο πρόβλημα παίρνει μορφή μιας σειράς πολύ απλουστευμένων προβλημάτων.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η ποικιλία των τρόπων με τους οποίους μπορούν να διατυπωθούν οι ιδιότητες των μεμονωμένων στοιχείων. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

- Η προσέγγιση του λογισμού μεταβολών. Σκοπός του λογισμού μεταβολών είναι η εύρεση σταθερών συναρτησιακών τιμών. Το συναρτησιακό είναι ολοκλήρωμα το οποίο έχει συγκεκριμένη τιμή για κάθε συνάρτηση που αντικαθίσταται στο συναρτησιακό. Το θεμελιώδες πρόβλημα είναι να βρούμε μια συνάρτηση $f(x)$ τέτοια ώστε για μικρές μεταβολές $\delta f(x)$ να μην μεταβάλλουν το αρχικό συναρτησιακό. Αν και η χρήση του συμβόλου δ κάνει τον λογισμό μεταβολών να μοιάζει με συνήθη διαφορικό λογισμό το σύμβολο δ δεν πρέπει να συγχέεται με το d του διαφορικού. Το διαφορικό αναφέρεται σε απειροστές

μεταβολές μιας συνάρτησης για δοσμένη απειροστή μεταβολή της ανεξάρτητης μεταβλητής. Η μεταβολή δ αναφέρεται σε απειροστές μεταβολές της συνάρτησης που λαμβάνονται μεταξύ δύο γειτονικών καμπυλών για την ίδια τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής. Κάθε συναρτησιακό όμως παρουσιάζει ακρότατη τιμή. Αποδεικνύεται ότι για να υπάρχει ακρότατη τιμή πρέπει το συναρτησιακό να υπακούει στην συνθήκη των Euler-Lagrange.

- Η δεύτερη προσέγγιση αφορά τη λήψη των ιδιοτήτων στοιχείων και καλείται άμεση προσέγγιση και σχετίζεται με την επίλυση της υπάρχουσας διαφορικής εξίσωσης. Η άμεση προσέγγιση χρησιμοποιείται για τα σχετικά απλά προβλήματα και υπάρχει η ανάγκη για την άλγεβρα μητρών όσον αφορά στις πεπερασμένες εξισώσεις στοιχείων.

1.2 Τα στάδια ανάλυσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

1. Υποδιαίρεση του σώματος

Σε αυτό το βήμα πρέπει το σώμα να χωριστεί σε μικρά τμήματα με μη αλληλεπικαλυπτόμενες υποπεριοχές. Επομένως, πρέπει να επιλεγεί ο τύπος, το μέγεθος, ο αριθμός και η διάταξη των πεπερασμένων στοιχείων. Καθίσταται αναγκαίο να αναφερθεί ότι όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της λύσης αλλά με σημαντικό υπολογιστικό κόστος ιδιαίτερα για προβλήματα 3 διαστάσεων. Επιπλέον, έπειτα από κάποια τιμή η ακρίβεια στη λύση δε βελτιώνεται.

2. Βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom), δηλ. οι άγνωστοι του προβλήματος - Επιλογή κατάλληλης προσεγγιστικής συνάρτησης

Ως βαθμούς ελευθερίας, ορίζουμε τους αγνώστους του προβλήματος, οι οποίοι ουσιαστικά είναι οι τιμές του ζητούμενου μεγέθους στους κόμβους του πλέγματος (κάνουμε λόγο για βαθμούς ελευθερίας όταν στο πρόβλημα μας έχουμε να αντιμετωπίσουμε εκτός από τις μετατοπίσεις κόμβων και τις παραγώγους τους). Στην συνέχεια, με βάση τους βαθμούς ελευθερίας σχηματίζεται η προσεγγιστική έκφραση για το άγνωστο μέγεθος. Η προσεγγιστική συνάρτηση που αντιπροσωπεύει την άγνωστη μεταβλητή μέσα

σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει να είναι απλή υπολογιστικά και να τηρεί κάποιες προϋποθέσεις σύγκλισης. Συνήθως είναι πολυωνυμική συνάρτηση.

3. Υπολογισμός των συντελεστών ακαμψίας (stiffness matrix) και της φόρτισης (load vector) σε κάθε στοιχείο -Συναρτήσεις βάσης

Η κατανομή της κύριας άγνωστης ποσότητας εντός ενός στοιχείου προσεγγίζεται δια των τιμών της επί των κόμβων του στοιχείου. Η προσέγγιση αυτή εκφράζεται μέσω της χρήσης μιας πλήρους ομάδας συγκεκριμένων πολυωνυμικών σχέσεων που είναι γνωστές ως συναρτήσεις βάσης. Η ακρίβεια της προσέγγισης καθορίζεται, μεταξύ άλλων, από την τάξη αυτών των πολυωνύμων, τα οποία μπορεί να είναι γραμμικά, τετράεδρα ή ακόμη και ανωτέρας τάξης.

Στο βήμα αυτό γίνεται παραγωγή του πίνακα ακαμψίας και του διανύσματος φορτίου για κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Για να μπορέσουμε να πάρουμε τις εξισώσεις, δηλαδή τις σχέσεις που συνδέουν π.χ. τις θερμοκρασίες στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων με τα διανύσματα φορτίου (load vectors) θα πρέπει να ερμηνεύσουμε τη μετάδοση θερμότητας σε μια ολοκληρωτική μορφή. Για τον υπολογισμό μητρώου θερμικής αγωγιμότητας k του πεπερασμένου στοιχείου e χρησιμοποιούνται δυο μέθοδοι:

- Η συναρτησιακή μέθοδος (functional approach) εφαρμόζεται εφόσον είναι γνωστή η ενέργεια του συστήματος που εξετάζουμε. Όταν δεν υπάρχει τύπος που να εκφράζει την ενέργεια του συστήματος τότε αναγκαστικά πρέπει να λύσουμε τις διαφορικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τη φυσική του συστήματος.
- Η μέθοδος του Galerkin χρησιμοποιείται απευθείας για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος. Η μέθοδος αντιμετωπίζει τις διαφορικές εξισώσεις.

4. Η διαδικασία της συνάθροισης - Επίλυση του συστήματος

Υπολογίζουμε τη συνεισφορά όλων των στοιχείων στο συνολικό πρόβλημα με ιδιαίτερη προσοχή στους κοινούς κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Κατόπιν, επιλύουμε το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες τύπου Dirichlet που καθορίζουν τιμές σε κάποιους κόμβους.

5. Υπολογισμός δευτερευόντων χαρακτηριστικών

Σε προβλήματα μετάδοσης θερμότητας είναι η θερμορροή.

1.3 Εφαρμογές της μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμεύει στην επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής, της Θερμότητας, της Ρευστομηχανικής, του Ηλεκτρομαγνητισμού και άλλων.

Σε εξειδικευμένες κατασκευές όπως είναι τα μνημεία η FEM έχει εφαρμοστεί κυρίως σε θέματα αποτίμησης της δυναμικής συμπεριφοράς. Συγκεκριμένα διερευνάται το ζήτημα της ανάλυσης των κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία και ειδικότερα, η ανάπτυξη κατάλληλων αναλυτικών προσομοιωμάτων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικότερα, αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής τρωτότητας των ιστορικών κατασκευών και μνημείων λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές παραμέτρους, που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας και του σεισμικού γεγονότος, αλλά και η επίδραση των διατάξεων παθητικού ελέγχου στην τρωτότητα των ιστορικών κατασκευών.

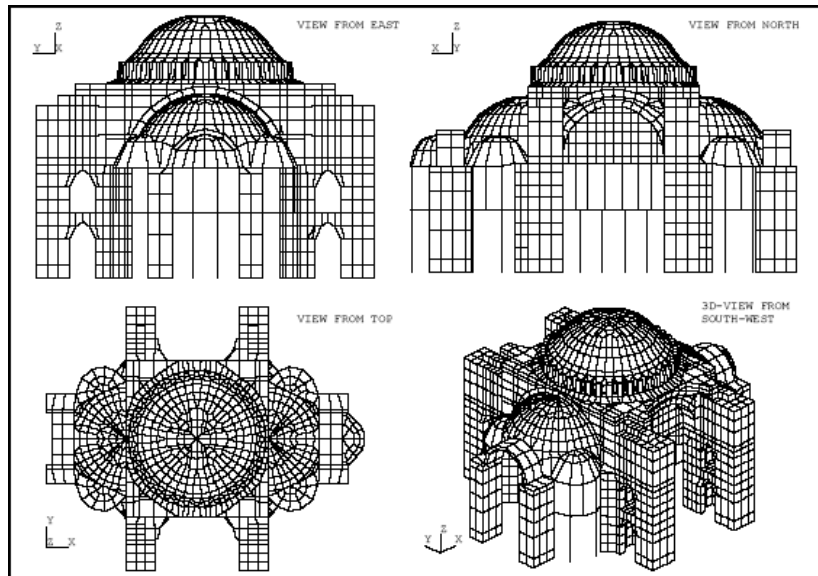
Για την αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης των ιστορικών κατασκευών λαμβάνονται υπόψη οι δομικές ιδιότητες (θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας, δυναμικές ιδιότητες) και οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν το σεισμικό γεγονός (περίοδος σεισμού, εύρος της ταλάντωσης, κατεύθυνση). Η αλληλεπίδραση αυτών των "εσωτερικών" και "εξωτερικών" παραμέτρων, αντίστοιχα, οδηγεί στην τελική σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί σε σχέση με τη μεταφορά θερμότητας περιορίζονται σε σύγχρονα δομικά στοιχεία προκειμένου να αποτιμηθεί η επαρκής θερμομόνωση των κατασκευών και σε παράγοντες που την επηρεάζουν. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες χαρακτηριστικές εφαρμογές:

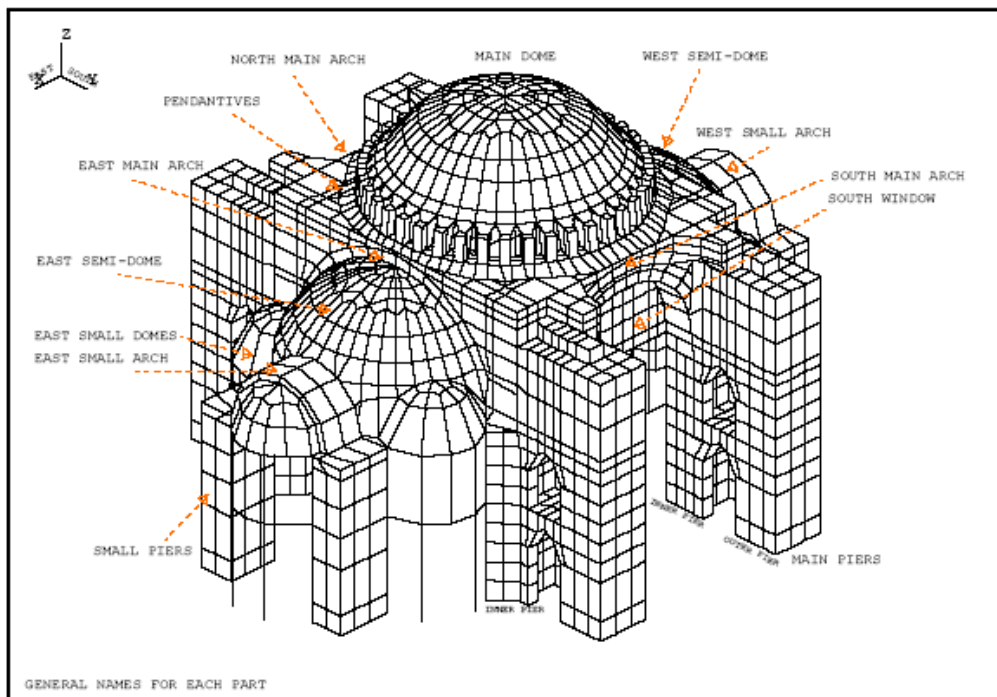
- Εφαρμογές στην αποτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς των μνημείων

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Αγιά Σοφιάς, όπου μελετήθηκε η δυναμική συμπεριφορά και η σεισμική απόκριση του μνημείου. Εφαρμόστηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τα δεδομένα των μελετών σχετικά με τα υλικά, των γεωτεχνικών μελετών για το χαρακτηρισμό της

αντοχής, της ακαμψίας, της θεμελίωσης και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μνημείου σε σεισμικές καταπονήσεις. ⁵⁸



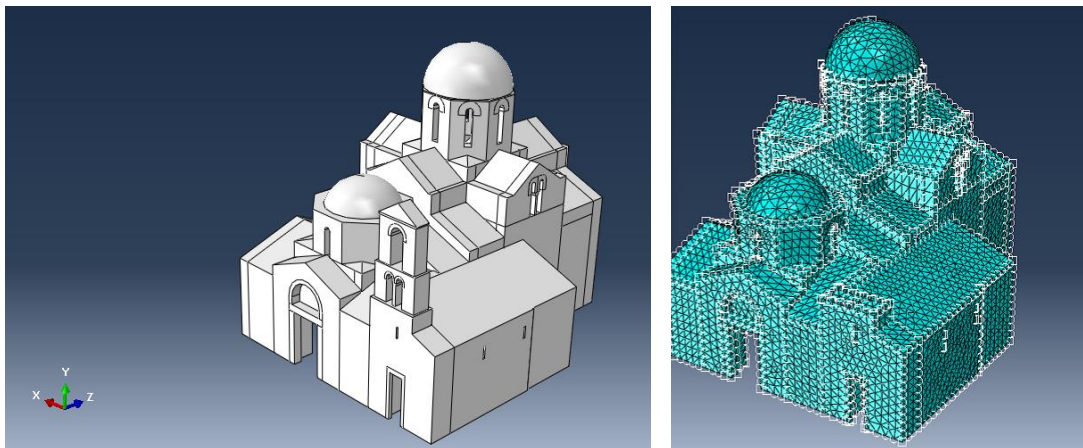
Εικόνα 1.1: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της Αγιά Σοφιάς – Όψεις



Εικόνα 1.2: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της Αγιά Σοφιάς

Μέσω της μεθόδου προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του θόλου, των ημιθόλων, αλλά και των κύριων τόξων κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου σεισμού.

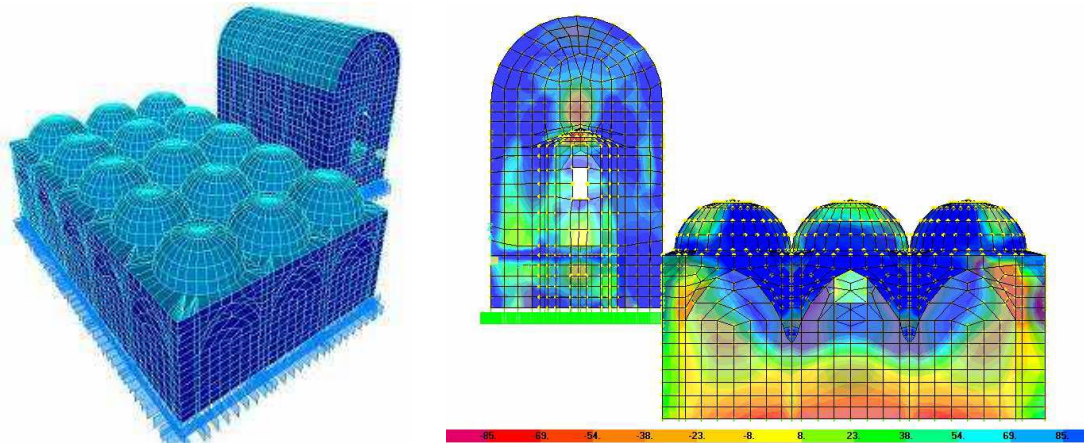
Άλλη εφαρμογή αποτελεί η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του Καθολικού της Ι.Μ. Καισαριανής. Με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση τριών εναλλακτικών ειδών προσομοίωσης: ως ένα ενιαίο σώμα, ως ανεξάρτητα σώματα (τα μέρη του μνημείου που ανάγονται σε διαφορετικές κατασκευαστικές φάσεις προσομοιώνονται ως ανεξάρτητα σώματα), και τα μέρη του μνημείου προσομοιώνονται ως σώματα σε επαφή.^{59, 60}



Εικόνα 1.3: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της Ι.Μ. Καισαριανής

Συμπερασματικά προέκυψε ότι στο τρίτο προσομοίωμα η εισαγωγή των φαινομένων επαφής στην ανάλυση, διαφοροποιεί δραστικά και επί το ευμενέστερο τα αποτελέσματα της ανάλυσης, επιβεβαιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την αντοχή του μνημείου στο χρόνο.

Για την εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης στην περίπτωση της Νέας Μονής Χίου χρησιμοποιήθηκε επίσης η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της γεωμετρίας, με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, που αποτελούν ένα συνδυασμό πεπερασμένων στοιχείων πλάκας και μεμβράνης.⁶¹



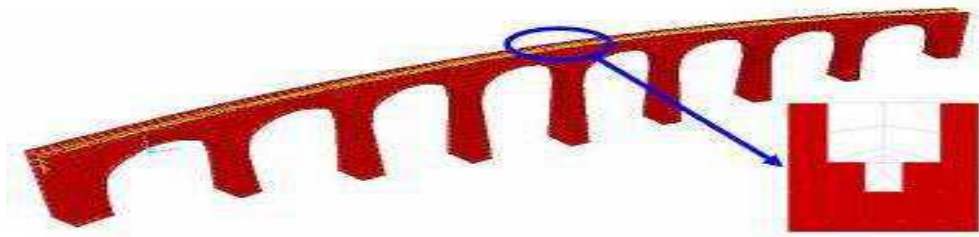
Εικόνα 1.4: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (αριστερά) και απεικόνιση των ορθών τάσεων (δεξιά)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της υπάρχουσας κατάστασης αποκάλυψαν τις εκτενείς περιοχές των ζημιών, με αποτέλεσμα να κριθεί αναγκαία ενίσχυσή του.

Άλλο παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η σιδηροδρομική γέφυρα στο Μάναρι της Πελοποννήσου είναι μια κυρτή γέφυρα που αποτελείται από λίθινες αψίδες, προκειμένου να εξυπηρετεί την κυκλοφορία των και είναι η μεγαλύτερη γέφυρα του είδους της στην Ελλάδα.

Για την αποτίμηση της συμπεριφορά της γέφυρας, αναπτύχθηκε ένα χωρικό προσομοίωμα. Χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα ισοπαμετρικά χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, που ενεργοποιούν τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Αυτή η προσομοίωση θεωρείται επαρκής προκειμένου να περιγραφεί με μεγάλη λεπτομέρεια η γεωμετρία της κατασκευής και η λειτουργία τους ως καμπτικού συστήματος εκτός επιπέδου.⁶²



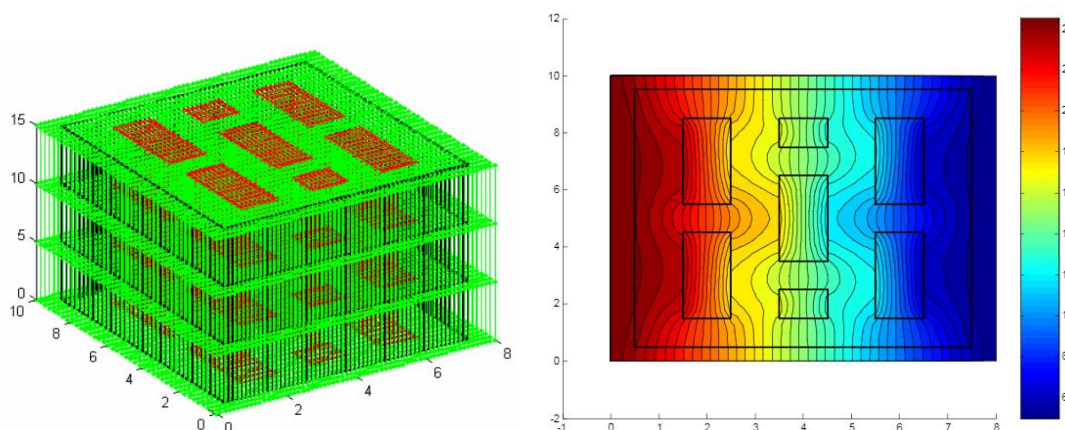


Εικόνα 1.5: Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η κυκλοφορία της γέφυρας περιορίζεται σε τραίνα παλαιού τύπου. Για να επιτραπεί η κυκλοφορία νέου τύπου τραίνων, η γέφυρα πρέπει να ενισχυθεί, ώστε να είναι ικανή να αντέχει τα φορτία και τις ταχύτητες των σύγχρονων απαιτήσεων.

- Εφαρμογές στη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ανομοιογενούς δομικού στοιχείου

Αντικείμενο αυτής της ανάλυσης αποτελεί η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ανομοιογενούς δομικού στοιχείου (οπτόπλινθοι και συνδετική κονία) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Δεδομένα αυτού του προβλήματος είναι η γεωμετρία του δομικού στοιχείου και η θερμική αγωγιμότητα του κάθε στοιχείου που έχει χρησιμοποιηθεί ⁶³.



Εικόνα 1.6: Γεωμετρία οπτόπλινθου με διάκενα αέρα και θερμοκρασιακό πεδίο

Η τιμή της θερμοκρασίας εντός του κύβου ή ορθογωνίου παραλ/επίπεδου υπολογίζεται μέσω της προσεγγιστικής έκφρασης που περιλαμβάνει τις

αντίστοιχες τιμές στους κόμβους. Ωστόσο, η προσεγγιστική έκφραση δεν είναι δυνατό να εισαχθεί απευθείας στη διαφορική εξίσωση. Γι' αυτό, το μαθηματικό πρόβλημα επαναδιατυπώνεται με τη βοήθεια της διατύπωσης Galerkin, που εφαρμόζεται απευθείας στην εξεταζόμενη διαφορική εξίσωση της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες του φυσικού προβλήματος, γνωστές θερμοκρασίες σε εξωτερικές επιφάνειες, το σύστημα των εξισώσεων μπορεί να λυθεί και να βρεθεί τελικά η κατανομή της μεταβλητής μέσα στο σώμα.

Στην περίπτωση της ανάλυσης για «μόνιμη κατάσταση» βρίσκουμε τη συνολική θερμορροή $Q_{ολ}$ σε W αφού προηγουμένως έχει οριστεί η διαφορά θερμοκρασίας Δt μεταξύ του αριστερού και του δεξιού άκρου του στοιχείου ($25^{\circ}C$ και $5^{\circ}C$ αντίστοιχα).

Προκύπτει ότι στην κατακόρυφη διάτρηση η μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό του κτιρίου στο περιβάλλον και αντίστροφα εμποδίζεται καθώς δημιουργείται κάτι σαν πλέγμα και ιδιαίτερα με τη συμβολή της θερμομόνωσης επιφέρουν αξιοπρόσεκτα και σημαντικότερα αποτελέσματα αναφορικά με τον ισοδύναμο συντελεστή αγωγιμότητας της τοιχοποιίας.

III. Πειραματικό μέρος

1. Σκοπός και Σχεδιασμός

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση θερμικών δεδομένων στο πλαίσιο του θερμοϋγρικού προβλήματος και η δημιουργία μοντέλου απόκρισης του αποκατεστημένου Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Είναι η πρώτη φορά που πραγματοποιούνται επεμβάσεις για την μελλοντική παρακολούθηση και απόκριση του Ιερού Κουβουκλίου, στην πάροδο του χρόνου, στο πλαίσιο της προγραμματικής συμφωνίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με το Πατριαρχείο Ιεροσολύμων.

Για το σκοπό αυτό ελήφθησαν υπόψη οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στα Ιεροσόλυμα, η τοποθεσία του Ναού, καθώς και οι περιβαλλοντικοί και μικροπεριβαλλοντικοί παράγοντες που επικρατούν στο Ιερό Κουβούκλιο.

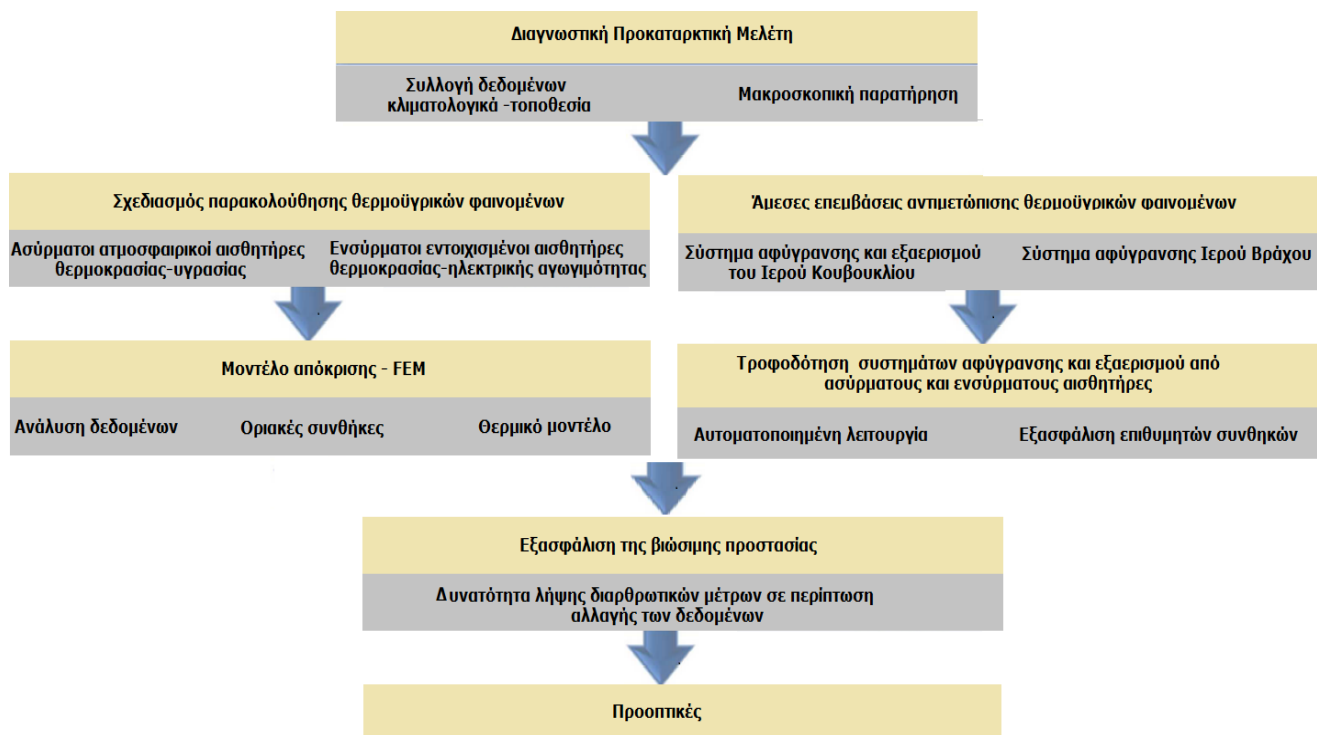
Πραγματοποιήθηκαν μακροσκοπικές παρατηρήσεις στο σύνολο του Ναού αλλά και πιο λεπτομερώς καθώς και φωτογραφική τεκμηρίωση προκειμένου να προσδιοριστεί και να χαρτογραφηθεί το αποτύπωμα των θερμοϋγκρικών φαινομένων, δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια των έργων αποκατάστασης στο Ιερό Κουβούκλιο βρέθηκε αναρριχόμενη υγρασία, ως αποτέλεσμα του υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, αλλά και διαρροών από τα δίκτυα αποχέτευσης / παροχέτευσης, ανοιχτών καναλιών, καθώς και υπόγειων χώρων και δομών.

Έγινε επιλογή χαρακτηριστικών σημείων εντός και εκτός του Ιερού Κουβουκλίου, όπου τοποθετήθηκαν ατμοσφαιρικοί ασύρματοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ενώ για την πιο ολοκληρωμένη παρακολούθηση χρησιμοποιήθηκαν και εντοιχισμένοι ενσύρματοι αισθητήρες στη φέρουσα τοιχοποιία. Επιπλέον κριτήριο στην επιλογή των θέσεων ήταν η καταγραφή καθ ύψος της αναρριχόμενης υγρασίας.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης του Ιερού Κουβουκλίου ενώ με τη χρήση προγράμματος ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων έγινε προσομοίωση απόκρισης του μνημείου στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στη διάρκεια ενός έτους.

Παράλληλα ήταν αναγκαία η άμεση παρέμβαση στο Ιερό Μνημείο με εγκατάσταση κατάλληλων συστημάτων αφύγρανσης και εξαερισμού για την πρόληψη της περαιτέρω επιδείνωσης της ήδη επιβαρυσμένης κατάστασης.

Η στρατηγική παρακολούθησης που αναπτύχθηκε απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα ροής στρατηγικού σχεδιασμού

2. Κλιματολογικά δεδομένα και τοποθεσία

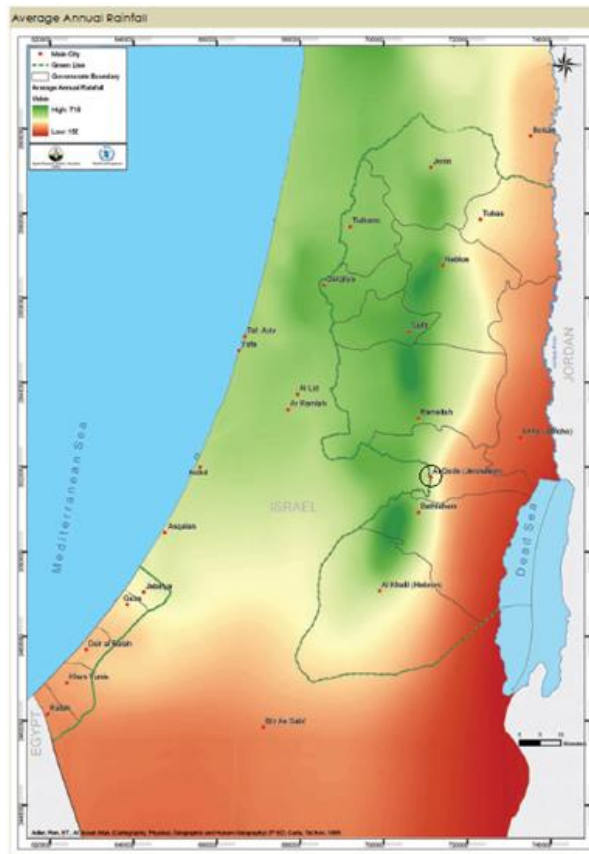
Παρότι μικρό σε μέγεθος, το Ισραήλ περιλαμβάνει τα ποικίλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας ολόκληρης ηπείρου που κυμαίνονται από δασώδη υψίπεδα και εύφορες πράσινες κοιλάδες μέχρι ορεινές ερήμους και από την παράκτια πεδιάδα ως την ημιτροπική Κοιλάδα του Ιορδάνη και τη Νεκρά Θάλασσα, το χαμηλότερο σημείο της Γης.

Βρίσκεται μεταξύ 29° -33° βόρεια του ισημερινού σε περιοχή που χαρακτηρίζεται ως υποτροπική μεταξύ της εύκρατης και της τροπικής ζώνης. Οι βόρειες και οι παράκτιες περιοχές του Ισραήλ εμφανίζουν το μεσογειακό κλίμα που χαρακτηρίζεται από ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και δροσερούς χειμώνες, ενώ οι νότιες και οι ανατολικές περιοχές του χαρακτηρίζονται από ξηρό κλίμα. Σχεδόν η μισή επιφάνεια της χώρας είναι ημιάνυδρη.

Η περίοδος των βροχών εκτείνεται από τον Οκτώβριο μέχρι τις αρχές Μαΐου, και οι βροχοπτώσεις κορυφώνουν από τον Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο. Οι βροχοπτώσεις ποικίλλουν σημαντικά από το Βορρά έως το Νότο. Οι υψηλότερες βροχοπτώσεις παρατηρούνται στο βόρειο και το κεντρικό τμήμα της χώρας και

μειώνονται στο νότιο τμήμα του Ισραήλ, από την έρημο Negev έως το Eilat όπου οι βροχοπτώσεις είναι αμελητέες. Η συνολική ετήσια βροχόπτωση φτάνει τα 50-70 εκ. στο βορρά και 2,5 εκ. στο νότο.

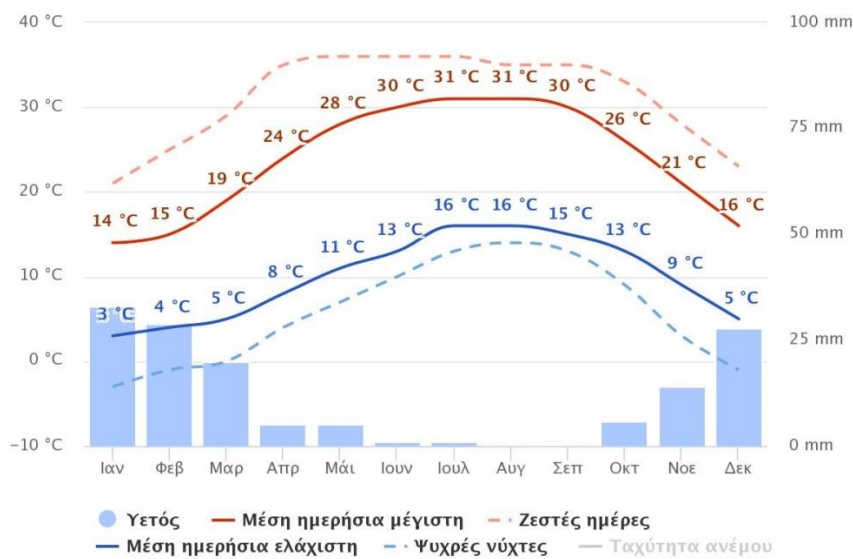
Το βαρύ χιόνι πέφτει μόνο στο βορειότερο τμήμα των υψωμάτων του Γκολάν, όπου η κορυφή του όρους Mount Hermon ύψους 2.224 μ. πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, παραμένει γενικά χιονισμένη από τον Δεκέμβριο μέχρι τον Μάρτιο. Σε άλλα μέρη της χώρας παρατηρείται χιόνι σπάνια.



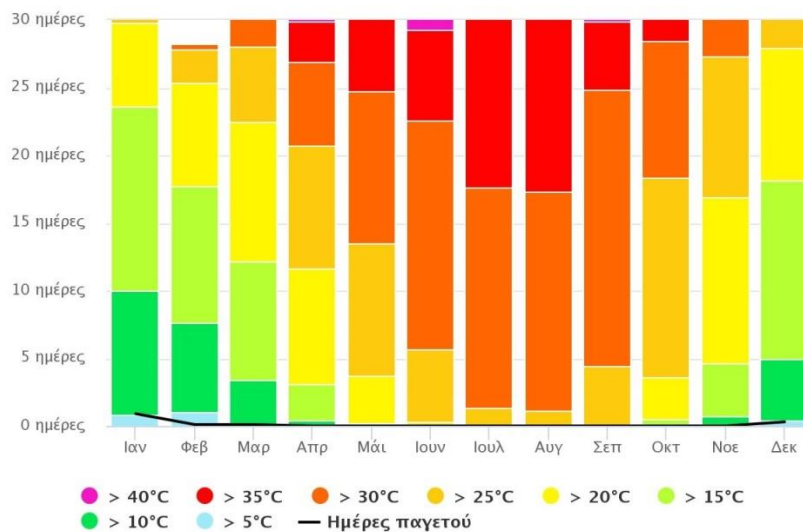
Εικόνα 2.1: Χάρτης μέσης κατανομής βροχοπτώσεων

Η Ιερουσαλήμ βρίσκεται στα βουνά της Ιουδαίας, σε υψόμετρο περίπου 600-800 m, στα όρια του εύκρατου κλίματος στα βόρεια και δυτικά και του ημι-άνυδρου και άνυδρου κλίματος στα ανατολικά, γνωστού ως έρημο της Ιουδαίας. Η Ιερουσαλήμ ανήκει στην κλιματική περιοχή της Μεσογείου (σύμφωνα με την ταξινόμηση Köppen) με μέση ετήσια βροχόπτωση 537 mm. Η κατακρήμιση πραγματοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου-Απριλίου. Ο Ιανουάριος είναι ο πιο κρύος μήνας του έτους με μέση θερμοκρασία 8,5 °C ενώ ο Ιούλιος και Αύγουστος είναι οι πιο θερμοί

μήνες με τη μέση θερμοκρασία 23,5 °C. Οι θερμοκρασίες ποικίλουν ευρέως από ημέρα σε νύχτα.



Εικόνα 2.2: Μέσος όρος θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων



Εικόνα 2.3: Μέγιστες Θερμοκρασίες

Η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται σε 16,8 °C και η μέση ετήσια σχετική υγρασία περίπου σε 72% ⁶⁴.

Η περιβαλλοντική παρακολούθηση αποτελεί βασικό στοιχείο της διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα και της

σχετικής υγρασίας μέσω των μηχανισμών προσρόφησης, συμπύκνωσης, τριχοειδούς αναρρίχησης, κρυστάλλωσης αλάτων, προκαλούν εκτεταμένες φθορές, λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων στα δομικά υλικά.^{65,66}

Γενικά, η φθορά είναι συνέπεια πολλών κύκλων ύγρυνσης ξήρανσης και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού.⁶⁷

Η τοπογραφία του Ναού της Αναστάσεως

Ο Ναός της Αναστάσεως βρίσκεται στη χριστιανική συνοικία στο δυτικό μέρος της παλαιάς πόλης της Ιερουσαλήμ. Περιτριγυρισμένος από τον πυκνοκατοικημένο αστικό ιστό της παλαιάς πόλης, δεν είναι διακριτά τα όρια του ενώ ξεχωρίζει μόνο από τους δύο μεγάλους τρούλους που τον σκεπάζουν, ο μεγαλύτερος τη Ροτόντα, ο δε μικρότερος το Καθολικό των Ορθοδόξων.



Εικόνα 2.4: Η περιτειχισμένη πόλη της Ιερουσαλήμ από τον αέρα, κοιτάζοντας βορειοανατολικά

(Photograph Gideon Avni, Israel Antiquities Authority)



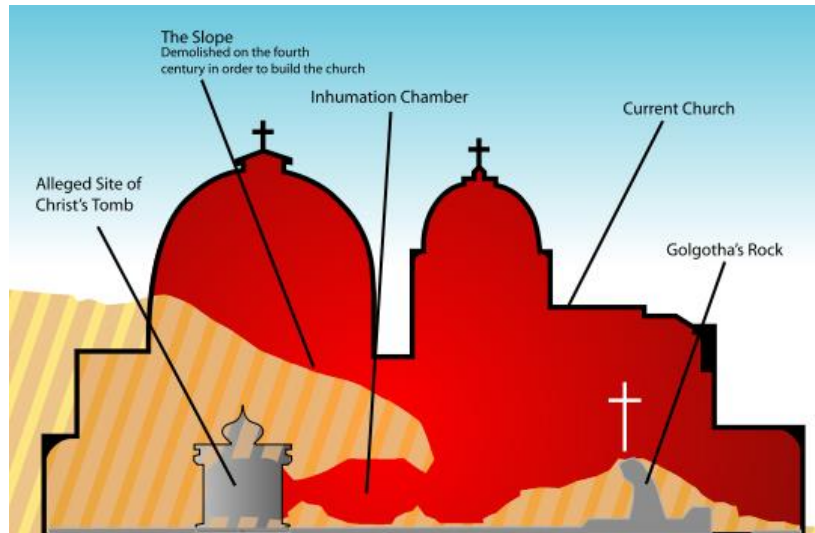
Εικόνα 2.5: Η εκκλησία του Αγίου Τάφου από τον αέρα, κοιτάζοντας βόρεια.
(Photograph Gideon Avni, Israel Antiquities Authority)



Εικόνα 2.6: Η εκκλησία του Αγίου Τάφου από τον αέρα, κοιτάζοντας νοτιοδυτικά.
(Photograph Pantomap Israel Ltd)

Τοποθετημένος στη θέση παλαιού λατομείου, σύμφωνα με τις ιστορικές πηγές, οι αρχιτέκτονες του Μεγάλου Κωνσταντίνου έκοψαν πολύ μεγάλες ποσότητες βράχου και έσκαψαν σε βάθος περίπου 8-9 μέτρων για να φτάσουν στο ύψος του Πανάγιου

Τάφου. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα κυκλικό πλάτωμα διαμέτρου 35 μέτρων πάνω στο οποίο εδραιώθηκε η Ροτόντα του Ναού της Αναστάσεως, στο κέντρο της οποίας άφησαν τον αποκομμένο βράχο του Αγίου Τάφου.



Εικόνα 2.7: Κατασκευή του ναού σε πλαγιά με σχετική κλίση

Λόγω της κλίσης του εδάφους διακρίνεται ξεκάθαρα η δυσμενής θέση του Ναού της Αναστάσεως ως προς την φυσική ρήση των όμβριων υδάτων που καταλήγουν στην περίμετρό του. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα τα κύρια ανοιχτά κανάλια όδευσης των ομβρίων υδάτων, με πράσινο και μπλε χρώμα, αλλά και το κεντρικό αποχετευτικό δίκτυο, με κόκκινο και μωβ χρώμα, όπως είναι καταγεγραμμένα από τις Δημόσιες Αρχές της πόλης της Ιερουσαλήμ.

Ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας με ροή ακριβώς κάτω από το Ιερό Μνημείο τείνει να το επιβαρύνει στο σύνολο του με φαινόμενα τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας από το έδαφος.^{68,69}

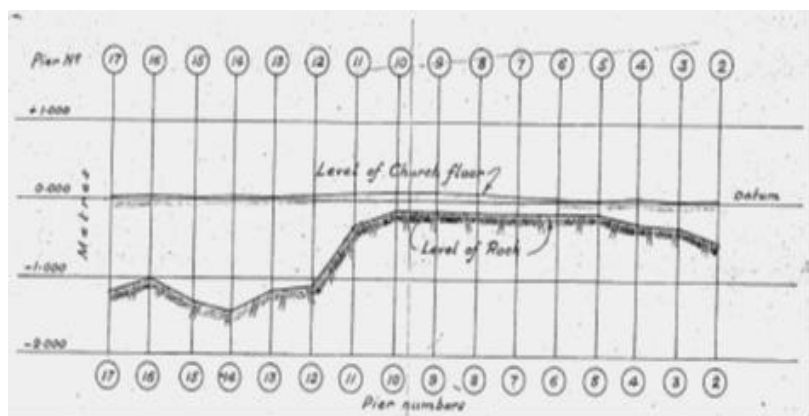
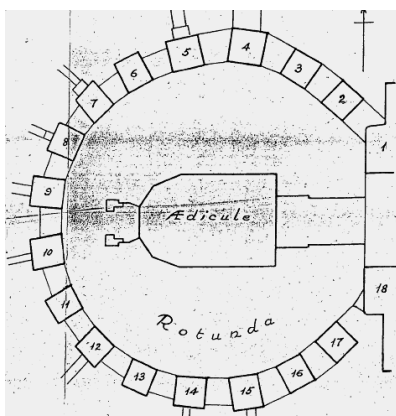
Στη θεμελίωση του Ναού περιλαμβάνονται μέρος του σύνθετου υπεδάφους από το παλαιό λατομείο, τα υπολείμματα παλαιότερων κατασκευών στις οποίες κατασκευάστηκαν νεότερες δομές, πυκνό δίκτυο αποχετευτικών αγωγών, των εγκαταλελειμμένων δεξαμενών και άλλων υπόγειων ανοιγμάτων που ανασκάφτηκαν στον τοπικό βράχο.⁷⁰



Εικόνα 2.8: Κύρια ανοιχτά κανάλια όδευσης των ομβρίων υδάτων με πράσινο και μπλε χρώμα, το κεντρικό αποχετευτικό δίκτυο με κόκκινο και μωβ χρώμα

Σύμφωνα με τις έως τώρα επιστημονικές αναφορές, έχει διαπιστωθεί ότι το Ιερό Κουβούκλιο στη δυτική πλευρά του είναι εδραιωμένο σε βραχώδη περιοχή ενώ η ανατολική πλευρά του βρίσκεται πάνω σε προσχώσεις του παλαιού τοίχους του Ναού της Αναστάσεως.

Στη βόρεια και δυτική πλευρά της Ροτόντα, ο βράχος είναι κοντά στο δάπεδο (βάθος 0,30-0,50 μ.), ενώ στη νότια πλευρά ο φυσικός βράχος συναντάται σε βάθη μέχρι 1,5 m κάτω από το δάπεδο της Ροτόντα (Freeman Report, 1947).



Εικόνα 2.9: Επίπεδο φυσικού βράχου στα θεμέλια του περιστυλίου της Ροτόντα, σύμφωνα με την έκθεση Freeman

Η τοπογραφία, ο προσανατολισμός του Ναού σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές συνθήκες, το περιβάλλον, το μικροκλίμα της περιοχής, η θερμοκρασία και η υγρασία που επιδρούν στο Ναό της Αναστάσεως αποτελούν βασικά στοιχεία στη μελέτη των θερμοϋγρικών φαινομένων.

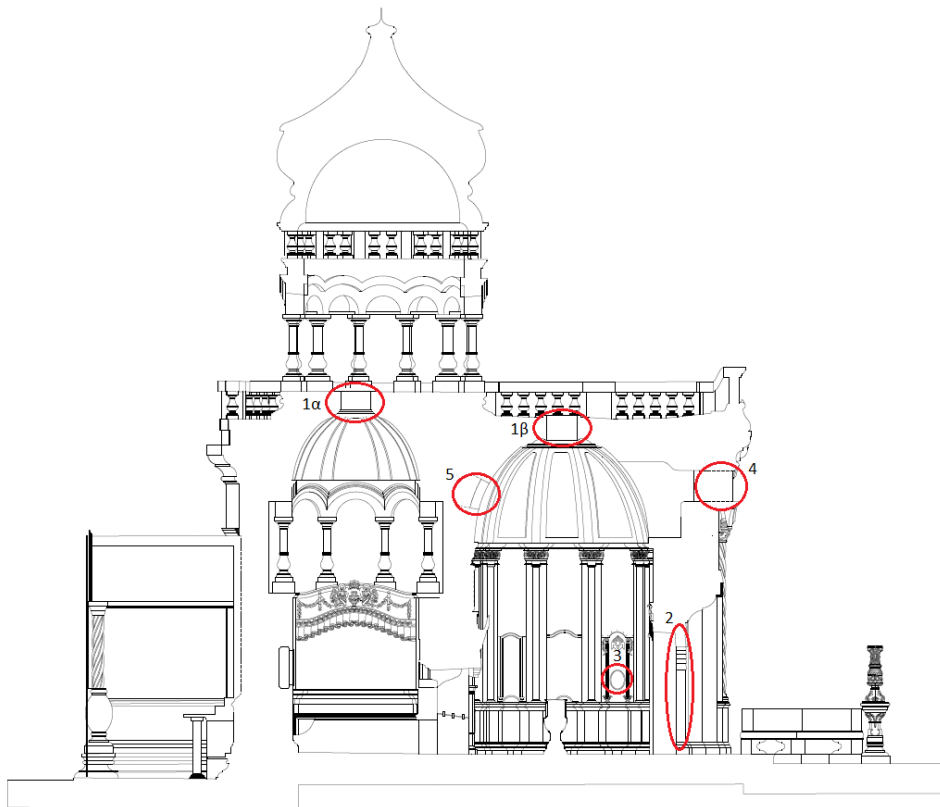
3. Μακροσκοπική παρατήρηση και φωτογραφική τεκμηρίωση

Αρχικά δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο μικροκλίμα του Ναού της Αναστάσεως και στις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας που επικρατούν στο εσωτερικό του και στο περιβάλλον του Ιερού Κουβουκλίου. Παρατηρήθηκε ότι μεταξύ των ανοιγμάτων που υπάρχουν στο Ναό, όπως της κεντρικής εισόδου στο Νότιο τμήμα, άνοιγμα που οδηγεί στα λουτρά προς το βόρειο τμήμα και ανοίγματα που οδηγούν σε εσωτερικά αίθρια και αυλές, δημιουργούνται ρεύματα αέρα με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας και την μεταφορά της υγρασίας εντός των χώρων του. Παράλληλα, τα μονίμως ανοιχτά παράθυρα ψηλά στο θόλο της Ροτόντας αλλά και του Ναού της Αναστάσεως σε συνδυασμό με την έλλειψη θέρμανσης στο σύνολο του Ναού, εντείνουν το πρόβλημα αυτό.

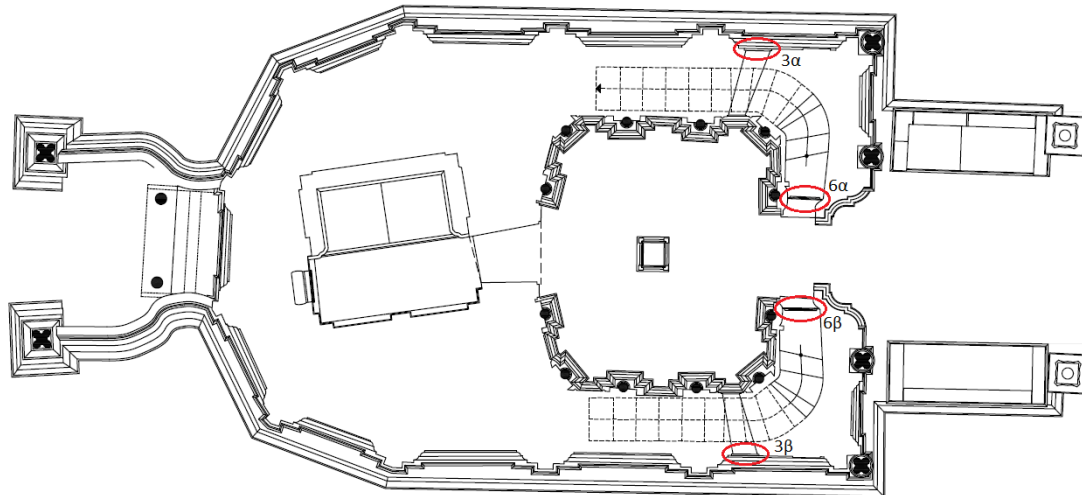


Εικόνα 3.1: Κάτοψη του Ναού
1 κεντρική είσοδος του Ναού,
2 άνοιγμα προς λουτρά,
3 εσωτερικό αίθριο,
4, 5 ανοίγματα ψηλά στο θόλο της
Ροτόντας και του Ιερού
Ναού αντίστοιχα

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι και στο Ιερό Κουβούκλιο υπάρχουν μόνιμα ανοίγματα όπως της κεντρικής εισόδου, κλίμακες εντός της βόρειας και νότιας τοιχοποιίας που οδηγούν στο δώμα, οπή αερισμού στο θόλο του προθαλάμου (Παρεκκλήσι των Αγγέλων), αλλά και στο θόλο του Ταφικού Θαλάμου, καθώς και πλάγιες οπές στο βόρειο και νότιο τμήμα του προθαλάμου οι οποίες υπηρετούν την αφή του Αγίου Φωτός. Μεταξύ των ανοιγμάτων αυτών δημιουργείται φυσικός ελκυσμός αέρα που συντελεί στη μεταφορά των μικροκλιματικών συνθηκών του εξωτερικού περιβάλλοντος από τη Ροτόντα προς το εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου.

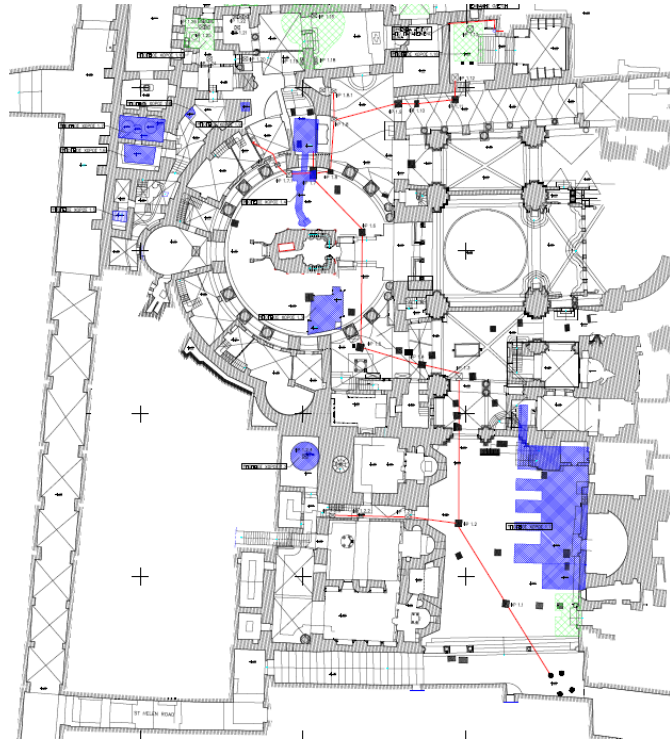


Εικόνα 3.2: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου 1α , 1β οπές στο θόλο του προθαλάμου και του Ταφικού Θαλάμου, 2 είσοδος Ιερού Κουβουκλίου, 3 πλάγιες οπές, 4 οπή αερισμού, 5 οπή σύνδεσης προθαλάμου με ταφικό θάλαμο



Εικόνα 3.3: Κάτοψη του Ιερού Κουβουκλίου πλάγιες οπές 3α, 3β και οπές κλιμάκων 6α , 6β

Στη συνέχεια της μακροσκοπικής παρατήρησης το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στη διερεύνηση των υπόγειων δομών – δεξαμενών όπως και φρεατίων στο χώρο της Ροτόντας και του Ναού. Όπως αποτυπώνεται και στο σχέδιο που ακολουθεί προκειμένου να διευκολυνθεί η συλλογή ομβρίων υδάτων από τις γύρω περιοχές του κτιριακού συγκροτήματος, είχε κατασκευαστεί ένα ολοκληρωμένο δίκτυο αποχετευτικών αγωγών, νερού και δεξαμενών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ένα μέρος του είναι ορατό και λειτουργικό ακόμη και σήμερα επιτρέποντας τη συλλογή νερού. Οι δομές αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω συνδετήριων αγωγών ενώ η υπερχείλιση τους, όμβρια αλλά και λύματα οδηγούνται μέσα από ανοιχτά κανάλια και διαβρωμένες σωληνώσεις, από την βόρεια προς στην νότια πλευρά της Ροτόντας πολύ κοντά στο Ιερό Κουβούκλιο, προς το υπάρχον δίκτυο της παλαιάς πόλης των Ιεροσολύμων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαρροή των υδάτων αυτών μέσω του εδάφους στο φυσικό βράχο και στα θεμέλια του Ιερού Κουβουκλίου εντείνοντας τα θερμοϋγκρικά φαινόμενα στο σύνολο του Ιερού Μνημείου.



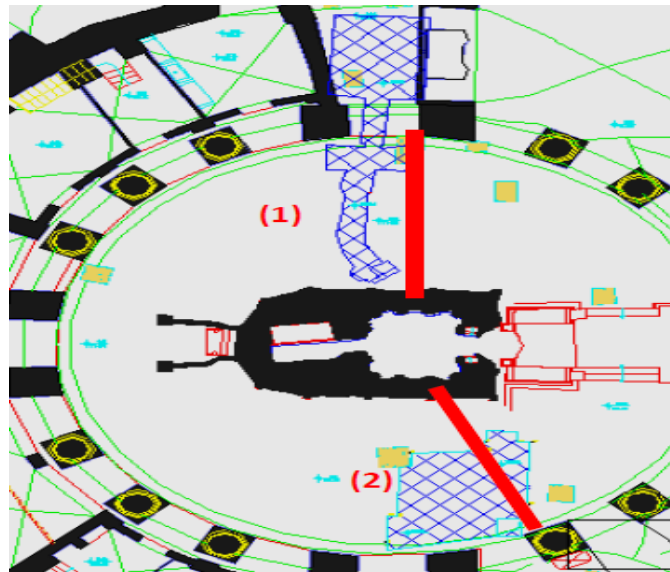
Εικόνα 3.4: Κάτοψη του Ναού με υπόγειες δομές – δεξαμενές αλλά και σύστημα αποχέτευσης



Εικόνα 3.5: Φρεάτια λυμάτων-όμβριων στο χώρο της Ροτόντας

Μετά από επίσκεψη στη Δεξαμενή του Αδριανού στο Βόρειο υπόγειο τμήμα του Ιερού Κουβουκλίου αλλά και στην εκσκαφή του Corbo στο Νότιο και σε βάθος από 1,00 – 2,65 μέτρα από το δάπεδο της Ροτόντας παρατηρήθηκαν και αποτυπώθηκαν

οξειδωμένες σωληνώσεις ομβρίων, έντονα προϊόντα φθοράς και διάβρωσης αλλά και έντονη βιολογική δράση της υγρασίας στα υλικά.



Εικόνα 3.6: Κάτοψη (1) Βόρειο τμήμα - Δεξαμενή Αδριανού, (2) Νότιο τμήμα - Εκσκαφή Κόρμπο



Εικόνα 3.7: Έντονη διάβρωση στους υπόγειους χώρους

Όπως έχει προαναφερθεί, λόγω του υψηλού υδροφόρου ορίζοντα αλλά και της κατεύθυνσης των υπόγειων υδάτων, από δυτικά προς ανατολικά, επιδεινώνονται τα φαινόμενα αναρριχόμενης υγρασίας από το έδαφος στις τοιχοποιίες του Ιερού

Κουβουκλίου. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η ακόλουθη φωτογραφία με έκδηλο το φαινόμενο της υγρασίας στην βάση της νότιας τοιχοποιίας.



Εικόνα 3.8: Ύπαρξη υγρασίας στην βάση της νότιας τοιχοποιίας

Κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης από το ΕΜΠ πραγματοποιήθηκε απομάκρυνση της ορθομαρμάρωσης στη νότια εσωτερική τοιχοποιία του Ιερού Κουβουκλίου στο εσωτερικό του Ταφικού Θαλάμου, όπου αποκαλύφθηκε τμήμα του Ιερού Βράχου. Λόγω των πολύ έντονων φαινομένων ανερχόμενης υγρασίας, συμπύκνωσης καθώς και βιοδιάβρωσης κρίθηκε αναγκαία η τοποθέτηση μεταλλικού πλαισίου με υαλοπίνακα προκειμένου να λειτουργήσει ως εργαλείο παρακολούθησης των φαινομένων αυτών αλλά και για την προστασία του Ιερού Βράχου.



Εικόνα 3.9: Φαινόμενα υγρασίας στον Ιερό Βράχο

Εξ αρχής ήταν σχεδιασμένο ένα διάτρητο τμήμα στο επάνω μέρος του παραθύρου μεταξύ του πλαισίου του υαλοπίνακα και του πλαισίου του παραθύρου έτσι ώστε να αερίζεται ελαφρώς ο Ιερός Βράχος διαμέσου του Ταφικού Θαλάμου. Παρόλα αυτά κατά την μακροσκοπική παρατήρηση διαπιστώθηκε θάμπωμα στην γυάλινη επιφάνεια γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη υψηλών ποσοστών υγρασίας.



Εικόνα 3.10: Παράθυρο με υαλοπίνακα στον Ιερό Βράχο

4. Συστήματα παρακολούθησης θερμοκρασίας – υγρασίας

Για την ολοκληρωμένη αποτίμηση της φθοράς και της παθολογίας ιστορικών κτηρίων και μνημείων ανεκτίμητης θρησκευτικής ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της επίδρασης του μικροπεριβάλλοντος στα δομικά υλικά .

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κυρίως:

- Ατμοσφαιρικοί ασύρματοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας
- Εντοιχισμένοι ενσύρματοι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών
- Εντοιχισμένοι ενσύρματοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας

4.1 Ατμοσφαιρικοί ασύρματοι αισθητήρες

Τεχνική Περιγραφή:

Η δυνατότητα χρήσης ασύρματων συστημάτων ανίχνευσης - αισθητήρων είναι ιδανική σε δοκιμές και μετρήσεις για περιπτώσεις απομακρυσμένης παρακολούθησης της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ενώ παρέχουν ταυτόχρονα υψηλής απόδοσης ανάλυση.

Οι ατμοσφαιρικοί αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι MicroStrain® LXRS® της εταιρίας LORD.



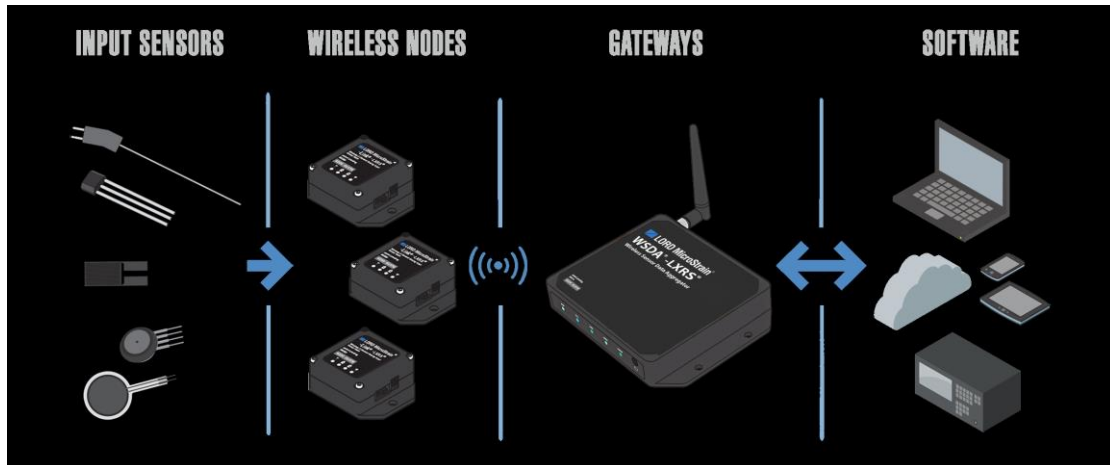
Εικόνα 4.1: LORD MicroStrain® LXRS® Wireless Sensor

Επιτυγχάνουν υψηλής ταχύτητας ανίχνευση με παράλληλη συλλογή δεδομένων από πλήθος αισθητήρων που λειτουργούν ασύρματα ως δίκτυο.

Μέσω του λογισμικού Node Commander ® δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας κόμβων αποτελούμενων από έναν ή και περισσότερους αισθητήρες και έτσι επιτυγχάνεται ευελιξία στη συλλογή δεδομένων είτε ταυτόχρονα από το σύνολο των αισθητήρων, είτε από επιλεγμένες ομάδες αισθητήρων ή και μεμονωμένα. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα προγραμματισμού για συνεχή δειγματοληψία, συλλογή και καταγραφή δεδομένων, αλλά και περιοδικά.

Οι αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται αποτελούν σημαντικό εργαλείο γιατί συντονίζουν και διατηρούν τη μετάδοση των δεδομένων από το δίκτυο των ασύρματα καταμεμημένων κόμβων.

Η απρόσκοπτη ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και των αναμεταδοτών, \pm 32 μικροδευτερόλεπτα συγχρονισμού κόμβου-κόμβου, περιορίζει την απώλεια δεδομένων και επιταχύνει δειγματοληψίες στις περισσότερες συνθήκες λειτουργίας. Η εύχρηστη διαδικτυακή πλατφόρμα SensorCloud™ επιτρέπει την ανάλυση, τη σύνοψη - παρουσίαση των δεδομένων δίνοντας τη δυνατότητα ενημέρωσης και από βιβλιοθήκες δεδομένων.



Εικόνα 4.2: Σύστημα παρακολούθησης θερμοϋγρικών δεδομένων (T, RH%)

Κύρια χαρακτηριστικά:

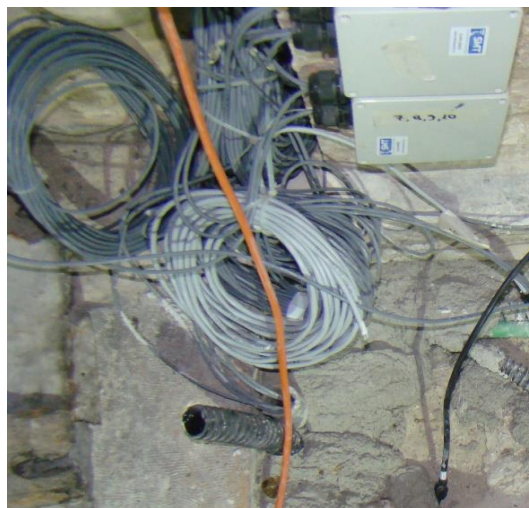
- κατάλληλος σχεδιασμός με ανθεκτικό πλαίσιο υψηλής αντοχής και μικρό όγκο συσκευής
- χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Αποστολή δεδομένων υψηλής ανάλυσης με μετατροπέα A / D 24 bit
- Υψηλή απόδοση
- Ταυτόχρονη υποστήριξη εκατοντάδων ασύρματων αισθητήρων
- Ασύρματη εμβέλεια έως 2 km
- Ευκολία στη χρήση
- Θυρίδα υποδοχής θερμοηλεκτρικών λεπίδων
- Μειωμένο κόστος λόγω έλλειψης καλωδίωσης

Τοποθέτηση:

Η παρακολούθηση των μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο στην ολοκληρωμένη αποτίμηση της επίδρασης των θερμοϋγρικών

φαινομένων στα δομικά υλικά του Ιερού Κουβουκλίου, ενώ παράλληλα είναι αναγκαία στην ανάπτυξη στρατηγικής για την διαχείριση της εσωτερικής θερμοκρασίας και της υγρασίας.

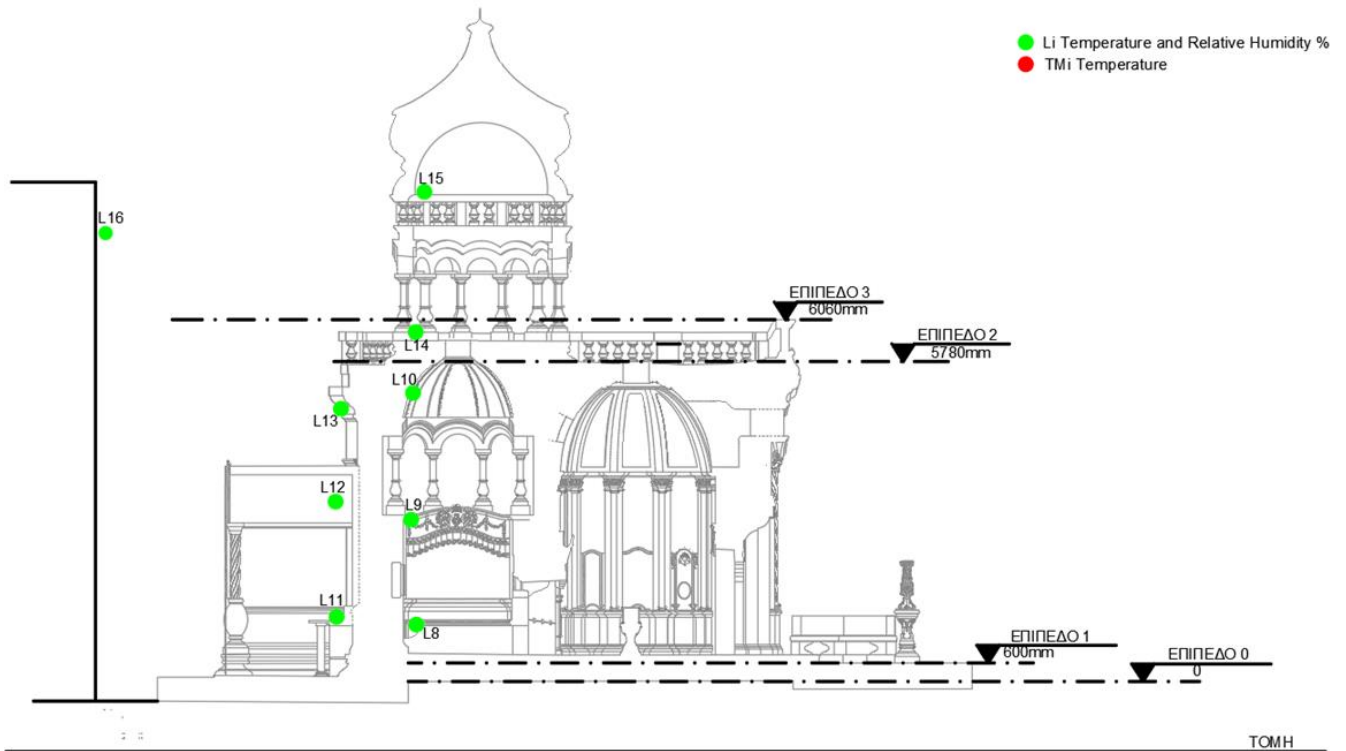
Για το σκοπό αυτό κρίθηκε αναγκαίο να τοποθετηθούν 16 στο σύνολο ασύρματοι ατμοσφαιρικοί αισθητήρες ταυτόχρονης μέτρησης θερμοκρασίας (T°C) και σχετικής υγρασίας (RH%) εκ των οποίων 7 στο εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου και 8 εξωτερικά αυτού και 1 στο διάζωμα στο χώρο της Ροτόντας. Απαραίτητη ήταν η απρόσκοπτη επικοινωνία των αισθητήρων με 2 ασύρματους αναμεταδότες ώστε κάθε ένας να συντονίζει τη μετάδοση από 8 αισθητήρες. Οι συγκεκριμένοι τοποθετήθηκαν στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου, για την λήψη και αποστολή μέσω wifi ή Broadband των δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που βρίσκεται στο κέντρο παρακολούθησης εντός του Ναού της Αναστάσεως. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα αποστολής και επεξεργασίας τους στο ΕΜΠ.



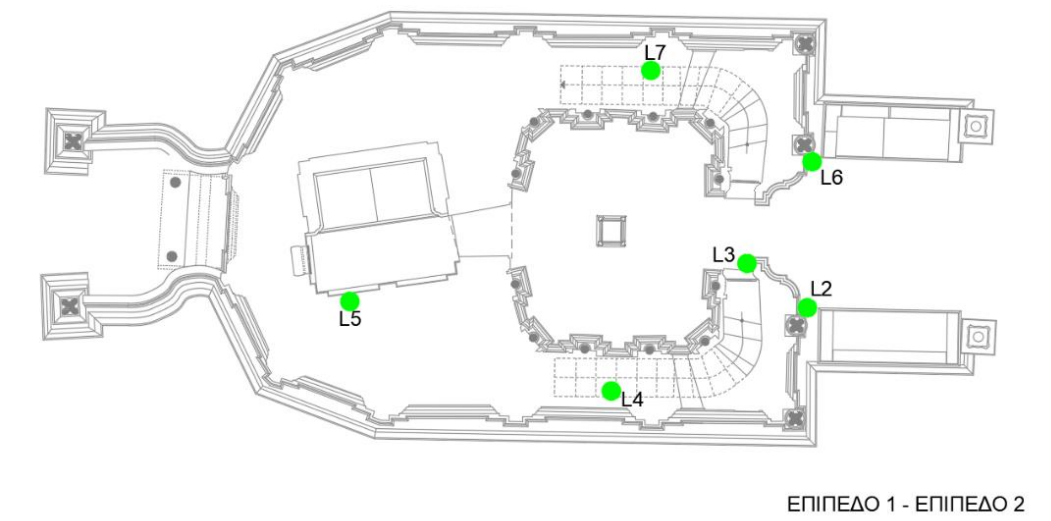
Εικόνα 4.3: Αναμεταδότες στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου

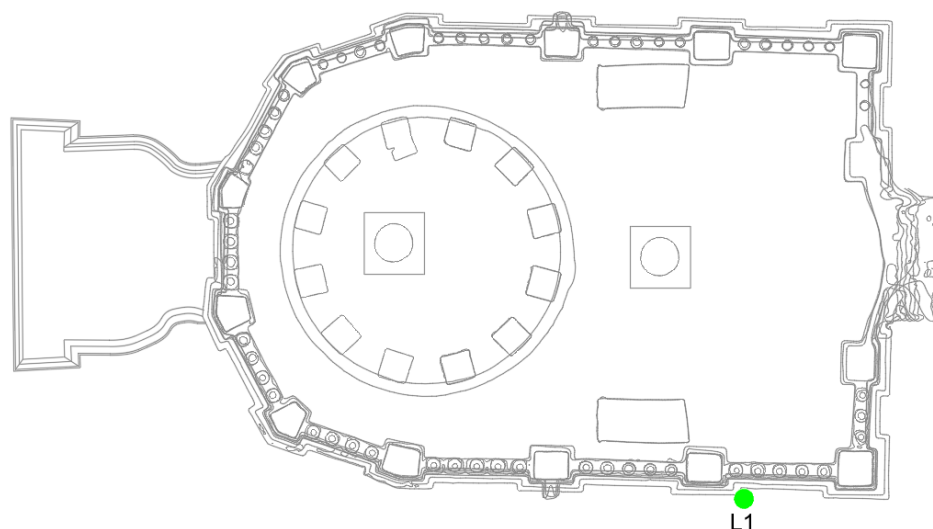
Η επιλογή των θέσεων των αισθητήρων τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου έγινε με κριτήριο την καταγραφή καθ ύψος αλλά και βάση του προσανατολισμού των μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν. Ταυτόχρονα βασικό κριτήριο αποτέλεσε η δυνατότητα σύγκρισης και συσχέτισμού των ατμοσφαιρικών συνθηκών σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν εντός της τοιχοποιίας. Γι αυτό το λόγο τοποθετήθηκαν οι ατμοσφαιρικοί ασύρματοι αισθητήρες

σε αντίστοιχες θέσεις με εκείνες των ενσύρματων όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Επιπλέον κριτήριο αποτέλεσε και ο συσχετισμός μετρήσεων στο ίδιο ύψος εκατέρωθεν εντός και εκτός της τοιχοποιίας. Τέλος η τοποθέτηση έγινε έτσι ώστε να μην είναι άμεσα ορατοί από τους επισκέπτες και να μην αλλοιώνουν την αισθητική του Ιερού Μνημείου.



Εικόνα 4.4: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με τις θέσεις των ασύρματων αισθητήρων





ΕΠΙΠΕΔΟ 3

Εικόνα 4.5: Κατόψεις του Ιερού Κουβουκλίου με τις θέσεις των ασύρματων αισθητήρων

Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακα οι θέσεις και η αντίστοιχη περιγραφή των αριθμημένων αισθητήρων όπως τοποθετήθηκαν κατά τη διάρκεια των παρεμβάσεων παρακολούθησης.

ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟΥ		
A/A	Θέση	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
L3	Αριστερά της εισόδου στο ανατολικό τμήμα, Παρεκκλήσι του Αγγέλου σε ύψος 0,6 m	Στο συγκεκριμένο σημείο ευνοούνται φαινόμενα φυσικού ελκυσμού, ενώ ταυτόχρονα είναι απαραίτητη η σύγκριση και ο συσχετισμός με εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS7, DMS8, TM3, TM4.
L4	Εντός κλιμακοστασίου στο νότιο τμήμα, Παρεκκλήσι του Αγγέλου, σε ύψος 2,5 m	Στο συγκεκριμένο σημείο το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στη σύγκριση και τον συσχετισμό με εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS9, TM2.
L5	Εντός του Ταφικού Θαλάμου στο παράθυρο του Ιερού Βράχου	Στο συγκεκριμένο σημείο το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στη σύγκριση και τον συσχετισμό με εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS11, TM1, αλλά και αισθητήρα αφυγραντήρα.

L7	Εντός κλιμακοστασίου στο βόρειο τμήμα, Παρεκκλήσι του Αγγέλου, σε ύψος 2 m	Στο συγκεκριμένο σημείο το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στη σύγκριση και τον συσχετισμό με εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS5, DMS6.
L8	Εντός του Ταφικού Θαλάμου στο δυτικό τμήμα, σε ύψος 0,6 m.	Μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας και συσχετισμός με τον αισθητήρα L11 ο οποίος βρίσκεται περίπου στο ίδιο ύψος, εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου.
L9	Εντός του Ταφικού Θαλάμου στο δυτικό τμήμα πάνω από ανάγλυφες παραστάσεις, σε ύψος 2,5 m.	Στο συγκεκριμένο σημείο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και σε καθημερινή βάση υπάρχουν αναμμένα καντήλια που επηρεάζουν το μικροπεριβάλλον του χώρου. Συσχετισμός με τον αισθητήρα L12 ο οποίος βρίσκεται περίπου στο ίδιο ύψος, εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου.
L10	Εντός του Ταφικού Θαλάμου στο δυτικό τμήμα πάνω στο θόλο, ύψος 5,5 m.	Στο συγκεκριμένο σημείο ευνοούνται φαινόμενα φυσικού ελκυσμού. Συσχετισμός με τον αισθητήρα L13 ο οποίος βρίσκεται περίπου στο ίδιο ύψος, εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου.

ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟΥ		
A/A	Θέση	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
L1	Στη νότια τοιχοποιία, σε ύψος 0,20 m	Σύγκριση και συσχετισμός με τον ενσύρματο αισθητήριο DMS12.
L2	Αριστερά της εισόδου στο ανατολικό τμήμα, σε ύψος 0,6 m	Σύγκριση και συσχετισμός με τους εσωτερικούς αισθητήρες στα σημεία όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω.
L6	Δεξιά της εισόδου στο ανατολικό τμήμα, σε ύψος 0,6 m	Σύγκριση και συσχετισμός με εντοιχισμένο ενσύρματο αισθητήριο DMS4.
L11	Στο δυτικό τμήμα, στην πτέρυγα των Κοπτών, σε ύψος 0,6 m	Σύγκριση και συσχετισμός με ασύρματο αισθητήρα L8.
L12	Στο δυτικό τμήμα, στην πτέρυγα των Κοπτών, σε ύψος 2,5 m.	Σύγκριση και συσχετισμός με ασύρματο αισθητήρα L9.

L13	Στο δυτικό τμήμα, σε ύψος 5 m	Σύγκριση και συσχετισμός με ασύρματο αισθητήρα L10.
L14	Στη βάση του περιστυλίου που στηρίζει το θόλο του Ιερού Κουβούκλιου	Σύγκριση και συσχετισμός με ασύρματο αισθητήρα L10.
L15	Στο θόλο του Ιερού Κουβουκλίου, σε ύψος 8 m	Η επιλογή του συγκεκριμένου σημείου έγινε με σκοπό την καθ' ύψος κάλυψη του Ιερού Μνημείου.
L16	Στην ανατολική πλευρά της Ροτόντας, σε ύψος 7,5 m	Ενδεικτική μέτρηση στο συγκεκριμένο ύψος.

4.2 Εντοιχισμένοι ενσύρματοι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας

Τεχνική Περιγραφή αισθητήρων ηλεκτρικής αγωγιμότητας:

Η χρήση εντοιχισμένων αισθητήρων είναι απαραίτητη για τη ποσοστιαία μέτρηση της υγρασίας εντός της τοιχοποιίας αφού βρίσκονται σε άμεση επαφή με τα υλικά της.

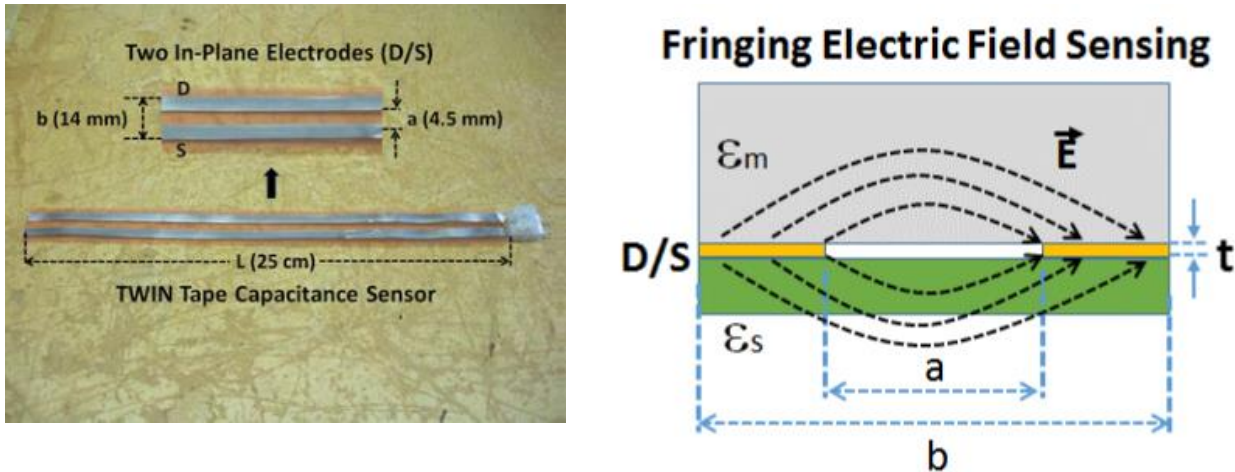
Οι εντοιχισμένοι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι οι DMS της εταιρίας SMT.



Εικόνα 4.6: Dielectric Moisture Sensor

Ο εντοιχισμένος αισθητήρας διηλεκτρικής υγρασίας (DMS) αποτελείται από δυο παράλληλα εύκαμπτα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα, συχνότητας

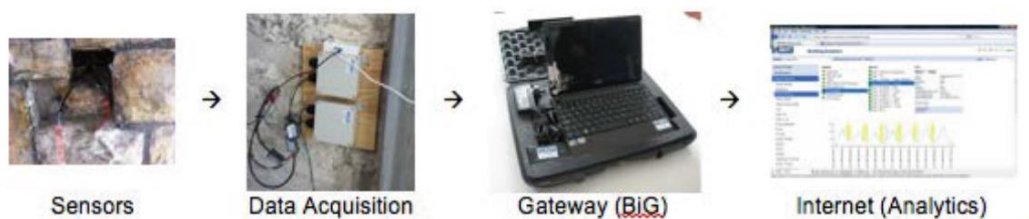
λειτουργίας 5 MHz, κατάλληλα για εγκατάσταση πάνω, κάτω ή μέσα σε οποιοδήποτε υλικό τοιχοποιίας με σκοπό τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών που αποτελείται.



Εικόνα 4.7: Παράλληλα εύκαμπτα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα και σχηματική απεικόνιση της διηλεκτρικής λειτουργίας

Προκειμένου να μετρηθεί η περιεκτικότητα της υγρασίας στο σύστημα της τοιχοποιίας γίνεται μετατροπή των διηλεκτρικών δεδομένων μέσω κατάλληλου λογισμικού σε ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας. Ενσωματωμένος πυκνωτής ελέγχου χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα στις μετρήσεις.

Με τη βοήθεια data loggers οι εντοιχισμένες συσκευές καταγραφής δεδομένων αποστέλλουν ενσύρματα τις μετρήσεις και μέσω της πλατφόρμας Analytics πραγματοποιείται η αποθήκευση, επεξεργασία - ανάλυση και παρουσίαση των δεδομένων.

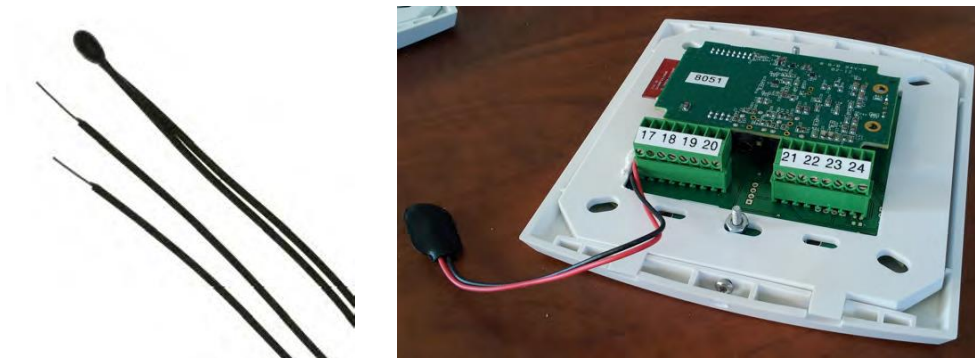


Εικόνα 4.8: Αναπαράσταση συστήματος για την παρακολούθηση της υγρασίας της τοιχοποιίας

Τεχνική Περιγραφή αισθητήρων θερμοκρασίας:

Η μέτρηση της θερμοκρασίας με χρήση εντοιχισμένων αισθητήρων είναι απαραίτητη για την αποτίμηση της θερμοκρασίας κελύφους μιας κατασκευής, ενώ η ταυτόχρονη αντιστοίχιση της με τα ποσοστά υγρασίας σε μια τοιχοποιία αποτελούν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία προσέγγισης των θερμοϋγκρικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα εκεί.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν τα αισθητήρια θερμοκρασίας MF52 της εταιρείας SMT.



Εικόνα 4.9: Αισθητήρια θερμοκρασίας MF52 της εταιρείας SMT.

Τα συγκεκριμένα αισθητήρια σε σχήμα φακής είναι επικαλυμμένα με ρητίνη αιθοξυλίνης για προστασία του δέκτη και μεγαλύτερη αντοχή ενώ το μικρό μέγεθος τους διευκολύνει την τοποθέτηση. Δίνουν αξιόπιστες μετρήσεις και είναι κατάλληλα για εφαρμογές με επαναληψιμότητα μετρήσεων. Έχουν εύρος μέτρησης από -55°C έως 125°C και είναι κατάλληλα σχεδιασμένα για να συνδέονται εύκολα με τις συσκευές καταγραφής δεδομένων της SMT και να έχουν γρήγορη απόκριση.

Τοποθέτηση:

Η χρήση των εντοιχισμένων ενσύρματων αισθητήρων μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας ήταν αναγκαία παρέμβαση για την καταγραφή των δεδομένων - συνθηκών σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας.

Τοποθετήθηκαν 10 στο σύνολο εντοιχισμένοι ενσύρματοι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και 4 αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας.

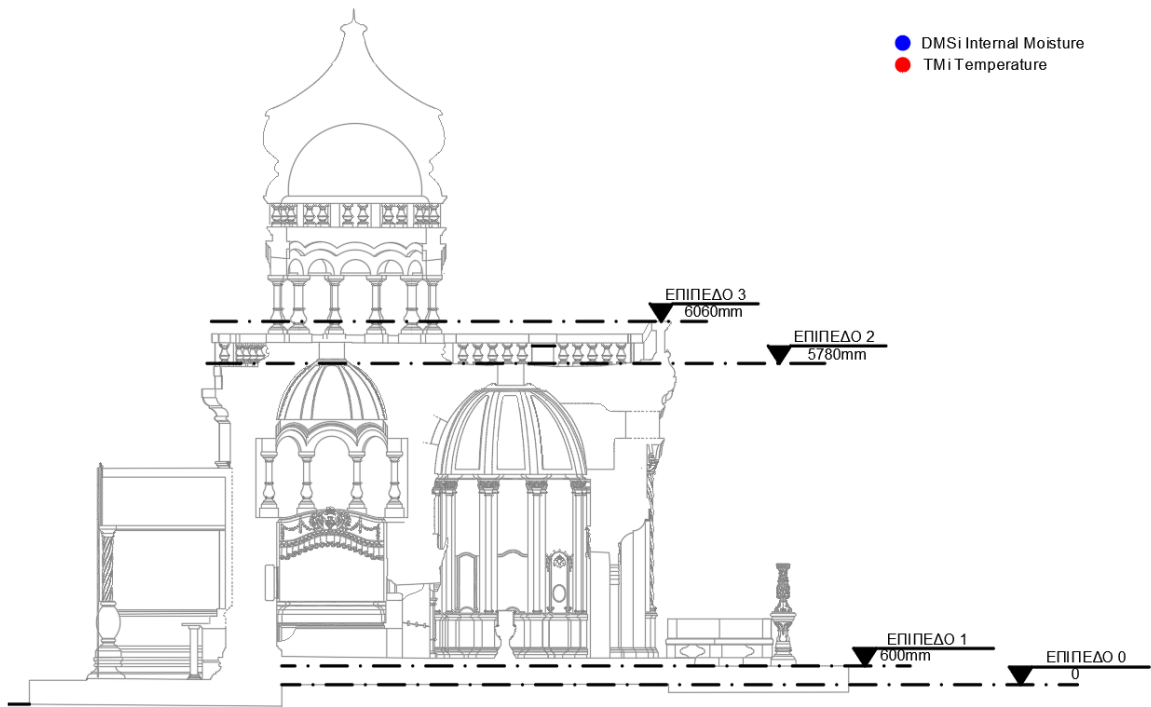
Οι ενσύρματοι αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (DMS) τοποθετήθηκαν με κριτήριο την κάλυψη του Ιερού Κουβουκλίου καθ ύψος από τη βάση έως και το δώμα προκειμένου να προσδιοριστεί το ύψος της ανερχόμενης υγρασίας από το έδαφος. Κριτήριο αποτέλεσε και ο προσανατολισμός των θέσεων προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ βόρειας και νότιας τοιχοποιίας. Επιπλέον, αισθητήρες θερμοκρασίας (TM) τοποθετήθηκαν μόνο σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος για την ταυτόχρονη αντιστοίχιση της θερμοκρασίας, όπως στον Ιερό Βράχο για την παρακολούθηση των πολύ έντονων φαινομένων υγρασίας που παρουσίαζε, αλλά και σε άλλα σημεία όπως παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω. Τέλος η επιλογή των θέσεων έγινε έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχών φθορές και οπές στις ορθομαρμαρώσεις.

Οι καλωδιώσεις έγιναν με τρόπο που να μην είναι ορατές από τους προσκυνητές και καταλήγουν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που βρίσκεται στο κέντρο παρακολούθησης εντός του Ναού της Αναστάσεως.

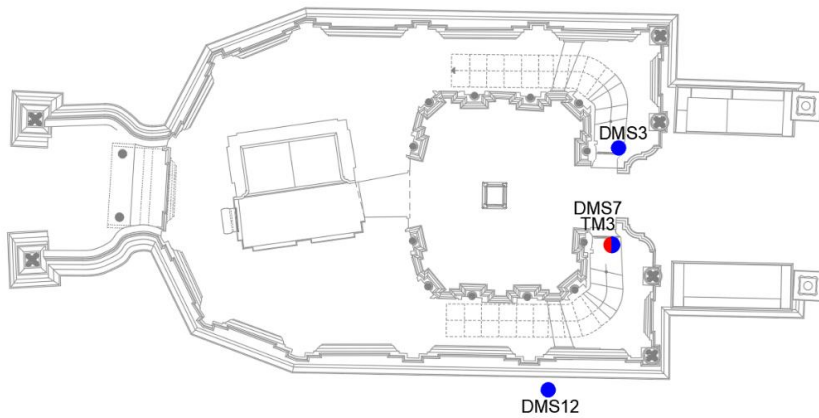


Εικόνα 4.10: Οδεύσεις καλωδίων από τα κλιμακοστάσια του Ιερού Κουβουκλίου

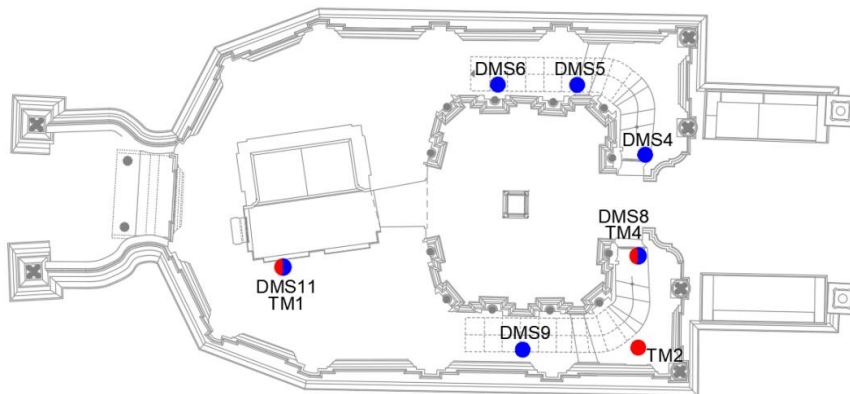
Μέσω κατάλληλου λογισμικού οι μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας ανάγονται σε ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας ενώ γίνεται ταυτόχρονη αντιστοίχιση της θερμοκρασίας μόνο στις συγκεκριμένες θέσεις, όπου τα δυο είδη αισθητήρων συνυπάρχουν.



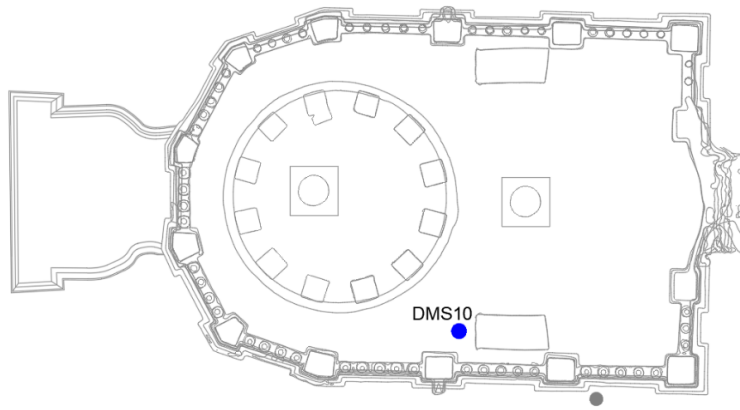
ΤΟΜΗ



ΕΠΙΠΕΔΟ 0



ΕΠΙΠΕΔΟ 1 - ΕΠΙΠΕΔΟ 2



ΕΠΙΠΕΔΟ 2

Εικόνα 4.11: Κάτοψη του Ιερού Κουβουκλίου με τις Θέσεις εντοιχισμένων ενσύρματων αισθητήριων

Πιο συγκεκριμένα στο εσωτερικό του Ιερού κουβουκλίου τοποθετήθηκαν 7 DMS και 4 ΤΜ αισθητήρες

Ο αισθητήρας DMS1 και ΤΜ1 τοποθετήθηκαν στον Ιερό Βράχο προκειμένου να διερευνηθούν τα φαινόμενα υγρασίας, με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην προκληθούν φθορές.



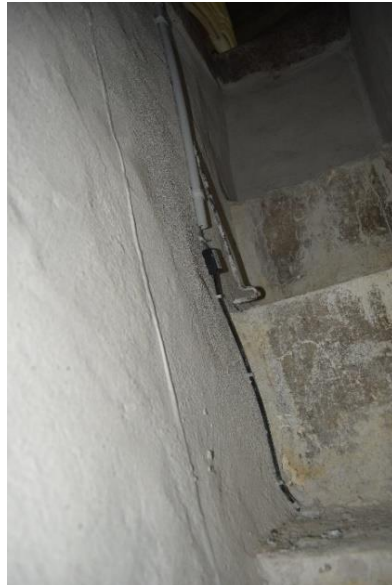
Εικόνα 4.12: Εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS1 και ΤΜ1 στον Ιερό Βράχο

Οι αισθητήρες DMS2, ΤΜ2 τοποθετήθηκαν χαμηλά σε ύψος περίπου 20 εκατοστών από το έδαφος, αριστερά της εισόδου στο ανατολικό τμήμα του Ναού εντός του κονιάματος αρμολόγησης. Ο αισθητήρας DMS3 τοποθετήθηκε χαμηλά σε ύψος περίπου 50 εκατοστών από το έδαφος δεξιά της εισόδου.



Εικόνα 4.13: Εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS2 και DMS3 - είσοδος του Ιερού Κουβουκλίου

Οι αισθητήρες DMS4 και DMS5 τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά εντός των 2 μικρών κλιμακοστασίων που οδηγούν στο δώμα του ναού στην βόρεια και νότια πλευρά και σε ύψος περίπου 3 μέτρα από το έδαφος, εντός της τοιχοποιίας.



Εικόνα 4.14: Εντοιχισμένα ενσύρματα αισθητήρια DMS4 και DMS5 - κλιμακοστάσια του Ιερού Κουβουκλίου

Οι αισθητήρες DMS6 και DMS7 τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά όπως φαίνονται και στην κάτοψη, στη βόρεια και νότια πλευρά και σε ύψος περίπου 1,5 μέτρο από το

έδαφος, εντός της τοιχοποιίας, ενώ ταυτόχρονα τοποθετήθηκε και αισθητήρας θερμοκρασίας στη θέση TM6.

Ένας επιπλέον αισθητήρας θερμοκρασίας τοποθετήθηκε στη νότια τοιχοποιία 1 μέτρο πάνω από το έδαφος πλησίον του σημείου όδευσης των καλωδιώσεων από το εσωτερικό του Ναού προς το εξωτερικό του.

Εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου τοποθετήθηκαν 2 αισθητήρες.

Ο αισθητήρας DMS8 τοποθετήθηκε στο δάπεδο του δώματος του Ιερού Κουβουκλίου μετά από αφαίρεση της πλάκας, επάνω στο ιστορικό κονίαμα.



Εικόνα 4.15 : Εντοιχισμένος ενσύρματος αισθητήρας DMS8 στο δάπεδο του δώματος

Ο αισθητήρας DMS9 τοποθετήθηκε στη βάση της νότιας τοιχοποιίας, μετά την απομάκρυνση του ιστορικού δαπέδου.



Εικόνα 4.16: Εντοιχισμένος ενσύρματος αισθητήρας DMS9 στη βάση της νότιας τοιχοποιίας

Για την τοποθέτηση των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε διάνοιξη οπών μήκους 40 cm και διαμέτρου 2 cm, ενώ στην κάθε θέση που έγινε διάνοιξη έχει ληφθεί δείγμα του υλικού για εργαστηριακή ανάλυση.

Στη συνέχεια έγινε καθαρισμός των οπών με αέρα για την απομάκρυνση σκονών και ακολούθησε η τοποθέτηση των αισθητήρων με τέτοιο τρόπο ώστε όλη η επιφάνεια τους να εφάπτεται στο δομικό υλικό.

Τέλος πραγματοποιήθηκε ολοκληρωτική πλήρωση των οπών με κατάλληλο ένεμα ενώ ιδιαίτερη βάση δόθηκε στην αποφυγή εγκλεισμάτων αέρα που θα δημιουργούσαν δυσκολία στις μετρήσεις.

4.3 Μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας

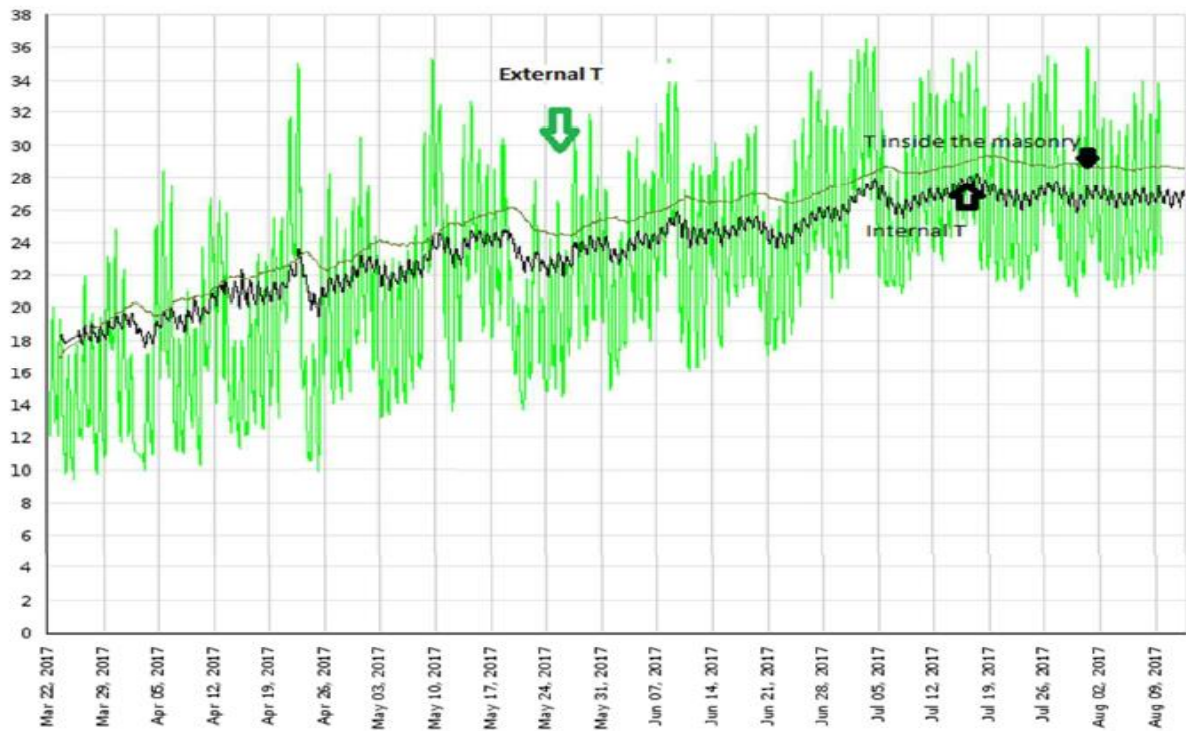
Μετά την τοποθέτηση του συστήματος των ασύρματων ατμοσφαιρικών και ενσύρματων εντοιχισμένων αισθητήρων πραγματοποιήθηκε η έναρξη των μετρήσεων της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας από τις 22 Μαρτίου έως και 9 Αυγούστου 2017.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου αλλά και μέσα στην τοιχοποιία, όπως έχουν μετρηθεί από τους αισθητήρες, καθώς και τις αντίστοιχες που επικρατούν στην πόλη της Ιερουσαλήμ.

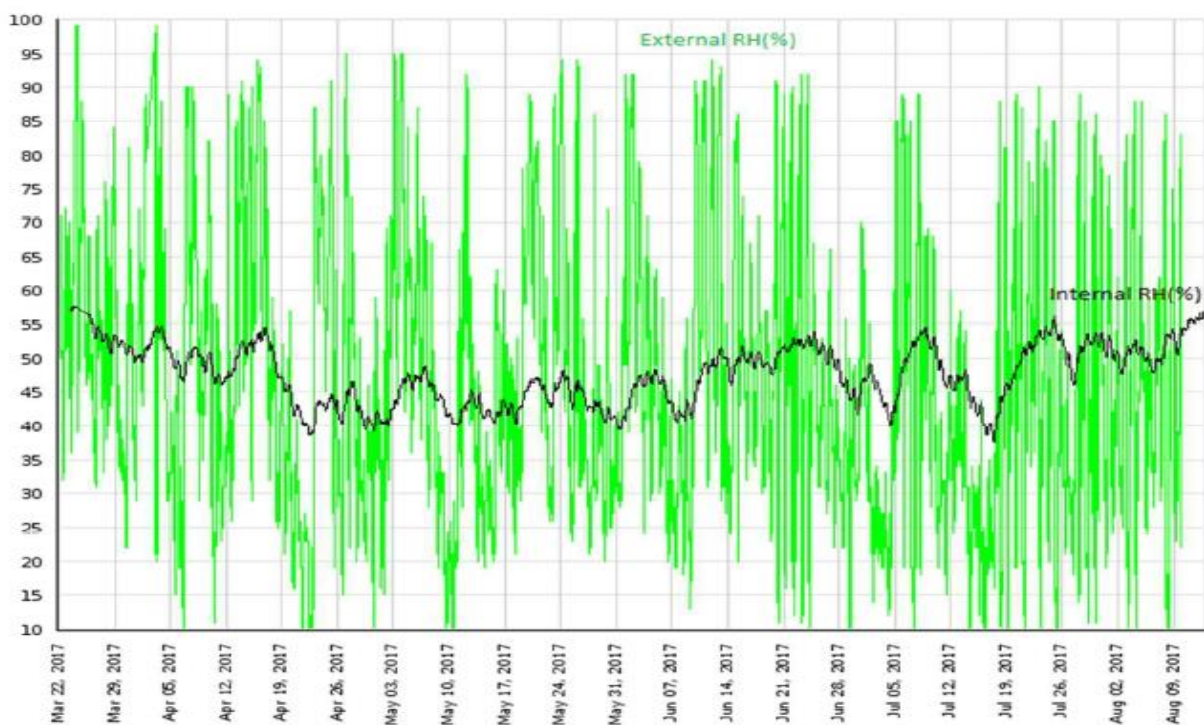
Είναι εμφανές ότι οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας του Ιερού Κουβουκλίου είναι λίγο υψηλότερες από αυτές στην επιφάνεια της εξωτερικής τοιχοποιίας χωρίς να παρουσιάζουν μεταξύ τους μεγάλες αποκλείσεις⁶⁴.

Κατά τους εαρινούς μήνες η θερμοκρασία του αέρα εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου στο χώρο της Ροτόντας κυμαίνεται από 17°C έως 24 °C, ενώ εντός της τοιχοποιίας από 17 °C έως 26 °C.

Κατά τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία του αέρα εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου στο χώρο της Ροτόντας κυμαίνεται μεταξύ 23 °C έως 28 °C, ενώ εντός της τοιχοποιίας από 26 °C έως 29 °C.

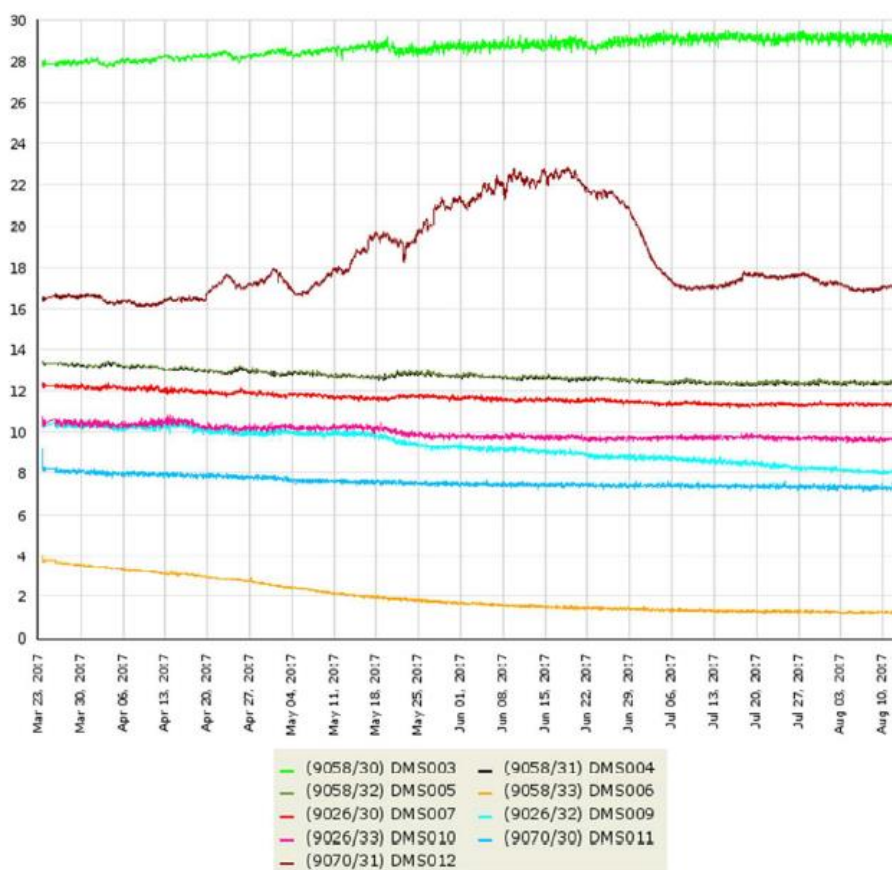


Εικόνα 4.3.1: Καθημερινές μεταβολές θερμοκρασιών της πόλης των Ιεροσολύμων, εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου και μέσα στην τοιχοποιία του.



Εικόνα 4.3.2: Ημερήσιες μεταβολές της σχετικής υγρασίας του αέρα (%) της πόλης των Ιεροσολύμων και εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου.

Η εσωτερική υγρασία αέρα κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 40-60%, πολύ χαμηλότερη από τις τιμές του εξωτερικού περιβάλλοντος που είναι πολύ υγρό. Οι υψηλότερες τιμές υγρασίας παρουσιάζονται στη βάση της θεμελίωσης (DMS3, DMS12), όπου επιβεβαιώνεται η παρουσία νερού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης, σε αντίθεση με θέσεις που βρίσκονται πιο ψηλά (DMS6, DMS9, DMS10, DMS11), όπου παρατηρούνται πιο χαμηλά ποσοστά εξαιτίας της εξάτμισης.



Εικόνα 4.3.3: Καθημερινές μεταβολές της σχετικής υγρασίας του αέρα (%)εξωτερικά του Ιερού Κουβουκλίου και μέσα στην τοιχοποιία του.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάπτυξη θεωρητικού μοντέλου απόκρισης του Ιερού Κουβουκλίου μόνο για τις θερμοκρασιακές μεταβολές στη διάρκεια ενός έτους λαμβάνοντας τις παραπάνω μετρήσεις. Κύριος στόχος είναι η αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς του Ιερού Μνημείου με βάση τις μετρήσεις εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας.

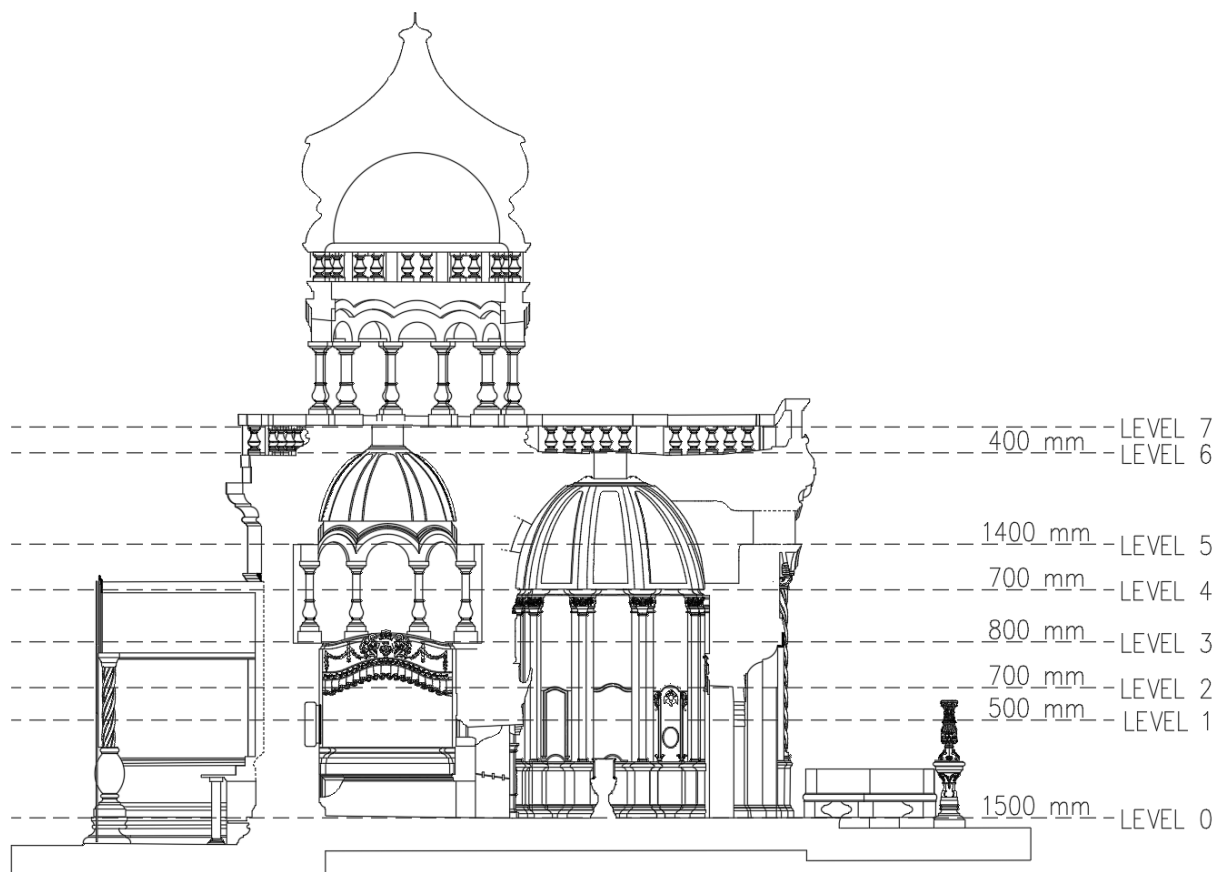
5. Μοντελοποίηση του Ιερού Κουβουκλίου και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Η μεθοδολογία πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

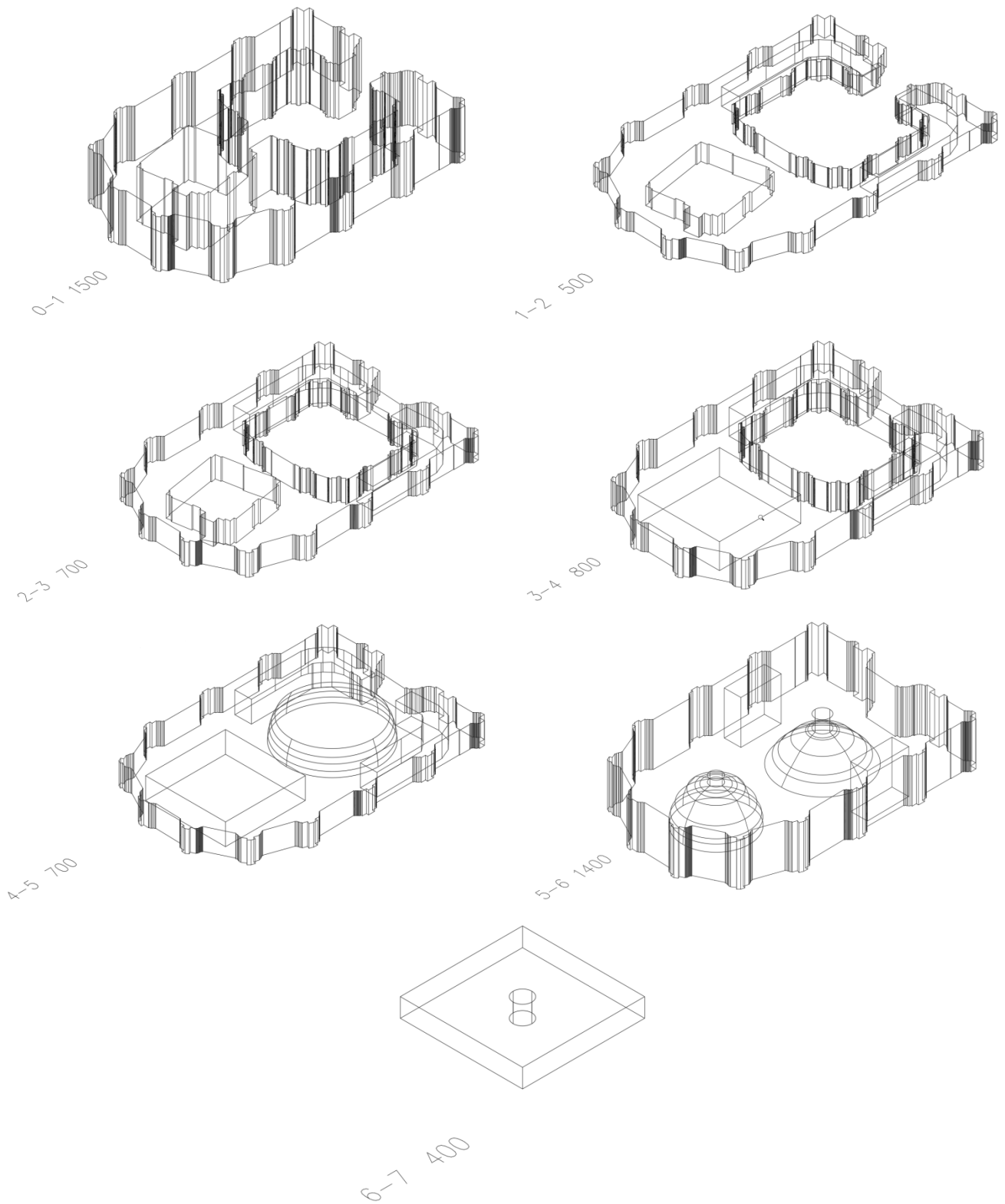
- Δημιουργία του προς μελέτη 3D σχεδιαστικού μοντέλου

Στη συγκεκριμένη μελέτη για τη δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης του Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα AUTOCAD 2018 σε τρισδιάστατο περιβάλλον απεικόνισης, λαμβάνοντας υπόψη τις ακριβείς διαστάσεις του Ιερού Μνημείου.

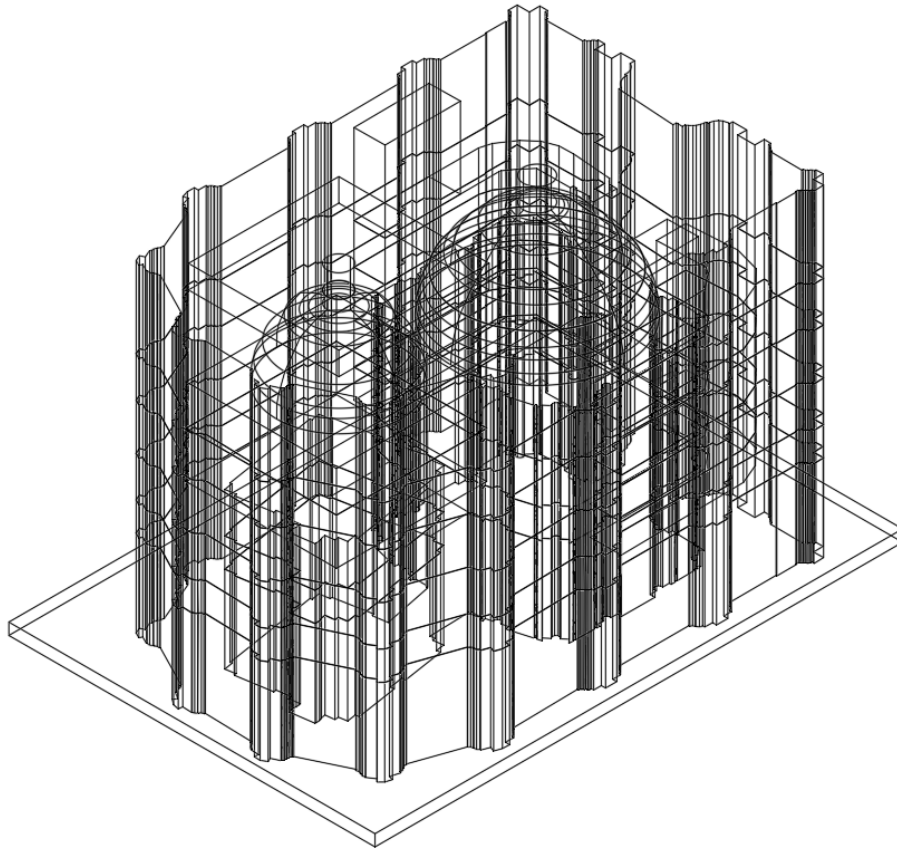
Πιο συγκεκριμένα, για την καλύτερη δυνατή σχεδιαστική προσέγγιση το Ιερό κουβούκλιο χωρίστηκε σε 7 οριζόντια τμήματα ώστε το κάθε τμήμα να ακολουθεί καθ ύψος την αρχιτεκτονική δομή. Στη συνέχεια έγινε σύνθεση των επιμέρους αυτών επιπέδων για να προκύψει το τελικό προς επεξεργασία μοντέλο.



Εικόνα 5.1: Τομή Ιερού Κουβουκλίου με τα οριζόντια τμήματα

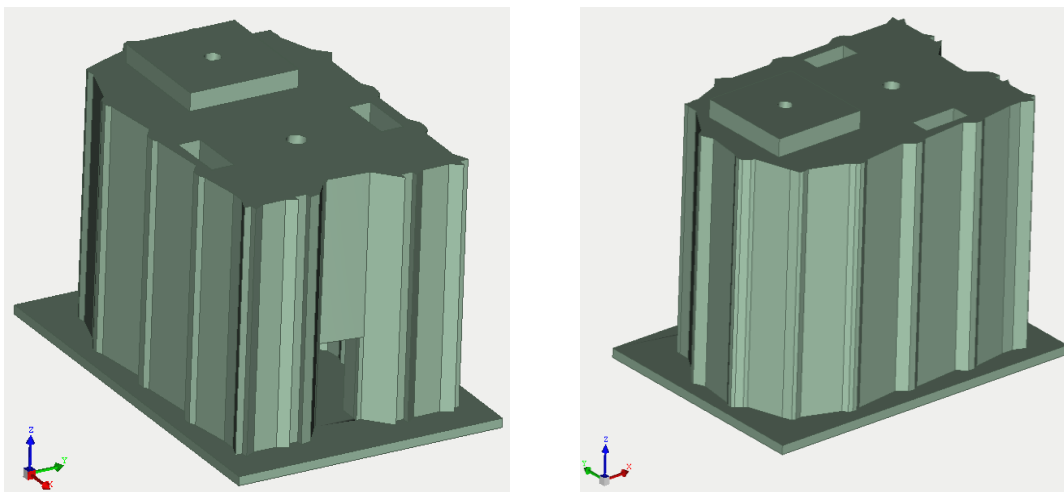


Εικόνα 5.2: Αναλυτική απεικόνιση των επί μέρους τμημάτων



Εικόνα 5.3: Τελική σχεδιαστική σύνθεση του Ιερού Κουβουκλίου

Σημειώνεται ότι κατά την προεπεξεργασία το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αποκτά αυτόματα τη 3D γεωμετρία της δομής από το AutoCAD, εξασφαλίζοντας έτσι απόλυτη γεωμετρική πιστότητα.



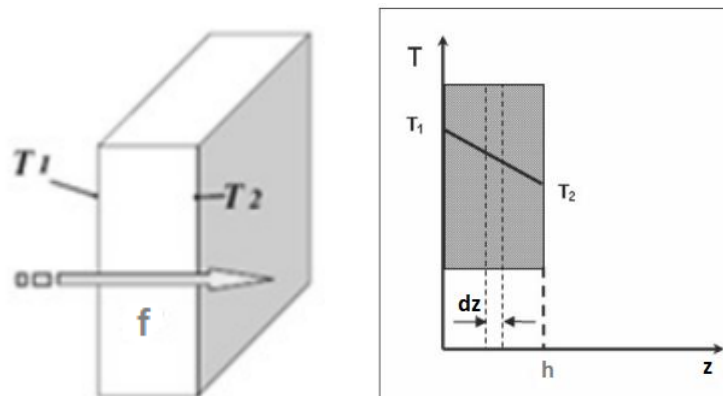
Εικόνα 5.4 : 3D απεικόνιση από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Γίνεται επιλογή του συνόλου ή τμημάτων του προς μελέτη 3D μοντέλου από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η ομάδα αντικειμένων που επιλέγονται για μια μελέτη μπορεί να τροποποιηθεί προσθέτοντας ή αφαιρώντας αντικείμενα.

- Επιλογή της επιθυμητής μελέτης / ανάλυσης

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση της θερμικής απόκρισης του Ιερού Κουβουκλίου υπό την επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών σε διάφορες εποχικές περιόδους στη διάρκεια ενός έτους. Η ανταλλαγή / ροή της θερμικής ενέργειας στα υλικά εσωτερικά της τοιχοποιίας του Ιερού Μνημείου πραγματοποιείται με αγωγή. Οι υπολογισμοί και η μαθηματική επίλυση που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα είναι σε καρτεσιανές συντεταγμένες δηλαδή η τοιχοποιία θεωρείται δισδιάστατο σύστημα με συγκεκριμένο πάχος σε μόνιμη κατάσταση (thermal steady state analysis).

Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε μια τοιχοποιία που βρίσκεται ανάμεσα σε επιφανειακές θερμοκρασίες t_1 και t_2 σε σχέση με το πάχος της h .



Εικόνα 5.5: Ροή θερμότητας με αγωγή

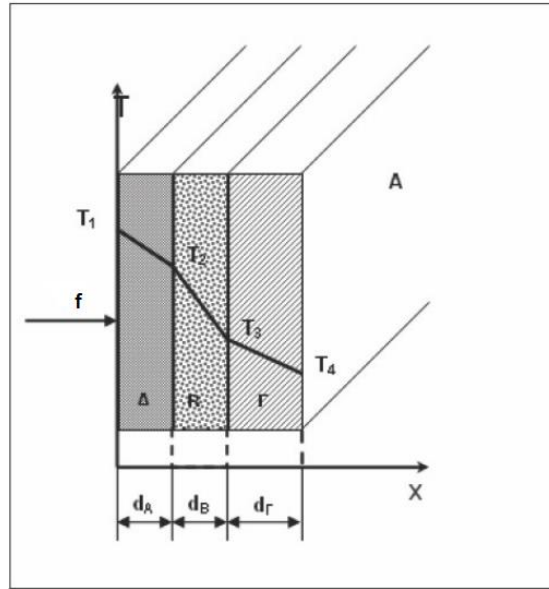
δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{t_2 - t_1}{h}, t_1 < t_2 \quad (5.1)$$

Για το υπολογισμό της ροής θερμότητας f και λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k , με σταθερή ροή θερμότητας, χρησιμοποιείται η σχέση :

$$f = -k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k(t_2 - t_1)}{h} = \frac{(t_1 - t_2)}{R}, R = \frac{h}{k}, t_1 < t_2 \quad (5.2)$$

Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα του ενός ομογενή και ισότροπα υλικά (τοιχοποιία) με διαφορετικά πάχη h_1, h_2, h_3, \dots και διαφορετικούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας k_1, k_2, k_3, \dots



Εικόνα 5.6: Ροή θερμότητας με αγωγή σε τρίστρωτη τοιχοποιία

ισχύει για κάθε επιφάνεια:

$$\begin{aligned} f_i &= -k_i (t_{i+1} - t_i) / h_i = (t_i - t_{i+1}) / R_i, \\ R_i &= h_i / k_i, \\ t_i &< t_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5.3)$$

Θεωρώντας ότι υπάρχει ιδανική θερμική επαφή στις διεπιφάνειες, τότε εξασφαλίζεται η συνεχής ροή θερμότητας κατά τη μετάβαση από τη μια επιφάνεια στην άλλη και επομένως σε οποιοδήποτε σημείο θα ισχύει $f_1 = f_2 = \dots = f_n = f$. Η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ των εξωτερικών επιφανειών ολόκληρης της τοιχοποιίας είναι ίση με το άθροισμα των μεταβολών της θερμοκρασίας σε κάθε επιμέρους επιφάνεια διαφορετικού υλικού:

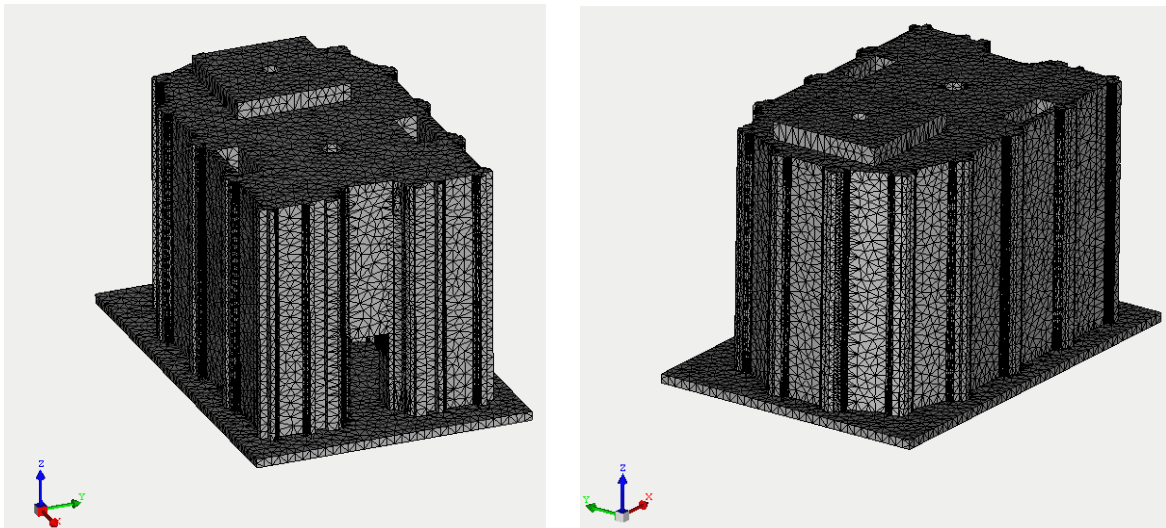
$$(t_1 - t_2) + (t_2 - t_3) + \dots + (t_i - t_{i+1}) + \dots + (t_n - t_{n+1}) = t_1 - t_{n+1}$$

Τότε:

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_1 - \mathbf{t}_{n+1} &= f_1 \mathbf{R}_1 + f_2 \mathbf{R}_2 + \dots + f_n \mathbf{R}_n = f (\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 + \dots + \mathbf{R}_n), \\ f &= (\mathbf{t}_1 - \mathbf{t}_{n+1}) / (\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 + \dots + \mathbf{R}_n) \end{aligned} \quad (5.4)$$

- Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Μόλις επιλεγούν οι παραπάνω παράμετροι, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Για μοντέλα που βασίζονται σε 3D στερεά, δημιουργείται ένα πλέγμα τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων. Για μοντέλα που βασίζονται σε 3D επιφάνειες χρησιμοποιούνται 139.471 τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία με 41.385 κόμβους. Στη συνέχεια και με βάση την πυκνότητα του πλέγματος μπορεί να αξιολογηθεί η ποιότητα και αναλόγως να παραμετροποιηθεί η διαδικασία.



Εικόνα 5.7: Δημιουργία πλέγματος 3D μοντέλου

- Αντιστοίχιση υλικών

Η αντιστοίχιση των υλικών πραγματοποιείται μέσω κατάλληλης βιβλιοθήκης με δυνατότητα εισαγωγής πρόσθετων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών. Ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής εμπλουτισμού της βιβλιοθήκης με στοιχεία για συγκεκριμένα υλικά σε περιπτώσεις εξειδικευμένων εφαρμογών. Τα αντίστοιχα μεταδεδομένα (ιδιότητες, χαρακτηριστικά κ.λπ.) αποτελούν τα βασικά δεδομένα εισόδου που απαιτούνται από την ανάλυση.

Για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου θεωρήθηκε η τοιχοποιία του Ιερού Κουβουκλίου ως μονολιθική ισότροπη και ομογενής στο σύνολο του αναπτύγματος.

Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή δεδομένων για δομικό λίθο ασβεστολιθικής προέλευσης με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μέτρο ελαστικότητας : $34,5 \times 10^6$ Pa
- Μέτρο διάτμησης : $1,71 \times 10^{10}$ Pa
- Πυκνότητα μάζας : $2,45 \times 10^{-3}$ kg/m³
- Συντελεστής θερμικής διαστολής : $1,7 \times 10^{-6}$ /K
- Θερμική αγωγιμότητα : 2,07 W/m K

• Καθορισμός οριακών συνθηκών / περιορισμοί

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε μέσω εξειδικευμένων εντολών, επιτρέπει τον προσδιορισμό της φύσης του περιορισμού (πλήρης ή μερικός) ενώ παράλληλα με ειδικά φίλτρα διευκολύνει την επιλογή του στοιχείου ή των στοιχείων του μοντέλου στα οποία εφαρμόζονται οι περιορισμοί όπως επιφάνειες, άκρα, κορυφές. Όταν απαιτείται, παρέχονται συστήματα συντεταγμένων χρήστη για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού των βαθμών ελευθερίας. Οι περιορισμοί παρουσιάζονται με γραφικά στο μοντέλο. Οι περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη θερμικής απόκρισης εφαρμόστηκαν στις εξωτερικές και εσωτερικές αρχιτεκτονικές επιφάνειες του Ιερού Κουβουκλίου λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασιακές συνθήκες ανά εποχή που επικρατούν εντός του Ναού της Αναστάσεως.

Στον Πίνακα που ακολουθεί απεικονίζονται συνοπτικά όλα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα από το Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για την ολοκληρωμένη προσέγγιση του μοντέλου.

<u>Παράμετροι :</u>		
Θερμοκρασία	T	°C
<u>Δεδομένα Εισόδου:</u>		
Θερμοκρασία αέρα εξωτερικά	T _{air,out}	°C

I.K.		
Θερμοκρασία εξ. επιφάνειας τοιχοποιίας	$T_{surf,out}$	$^{\circ}C$
Θερμοκρασία αέρα εσωτερικά I.K.	$T_{air,in}$	$^{\circ}C$
Θερμοκρασία εσ. επιφάνειας τοιχοποιίας	$T_{surf,in}$	$^{\circ}C$
<u>Εξισώσεις Ροής θερμότητας :</u>		
Αγωγή θερμότητας	$f = -k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k(t_2 - t_1)}{h} = \frac{(t_1 - t_2)}{R}, R = \frac{h}{k}, t_1 < t_2$	
<u>Παράμετροι :</u>		
k	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	
dT	διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικής – εξωτερικής επιφάνειας τοιχοποιίας	
h	Πάχος τοιχοποιίας	
<u>Παράγοντες που επιδρούν στις παραμέτρους :</u>		
Μέτρο ελαστικότητας	$34,5 \times 10^6$	Pa
Πυκνότητα μάζας	$2,45 \times 10^{-3}$	kgr/m ³
Συντελεστής θερμικής διαστολής	$1,7 \times 10^{-6}/K$	
Θερμική αγωγιμότητα	2,07	W/m K

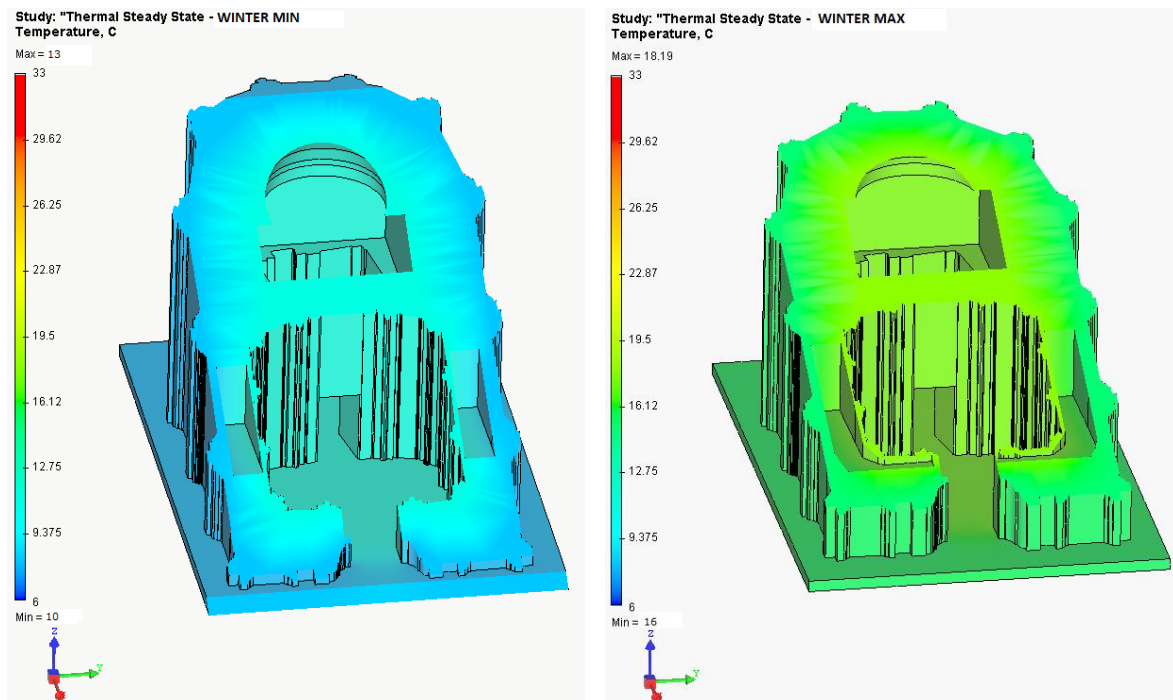
- Ανάπτυξη μοντέλου

Λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασιακές μεταβολές των επιφανειών, όπως έχουν καταγραφεί στους παρακάτω Πίνακες το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μέσω κατάλληλου λογισμικού απεικονίζει τη ροή θερμότητας με χρήση χρωμάτων στην τοιχοποιία. Ακολουθούν 2 μοντέλα ανά εποχή σύμφωνα με τις ελάχιστες και τις μέγιστες καταγεγραμμένες τιμές στη διάρκεια ενός τριμήνου.

Δεδομένα εισόδου μέσα στο Ναό της Αναστάσεως

- Χειμερινοί μήνες

	Μέση ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)	Μέση μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)
$T_{\text{Jerusalem}}$	9	15
$T_{\text{air,out}}$	12	17
$T_{\text{surf,out}}$	10	16
$T_{\text{air,in}}$	14	19
$T_{\text{surf,in}}$	13	18



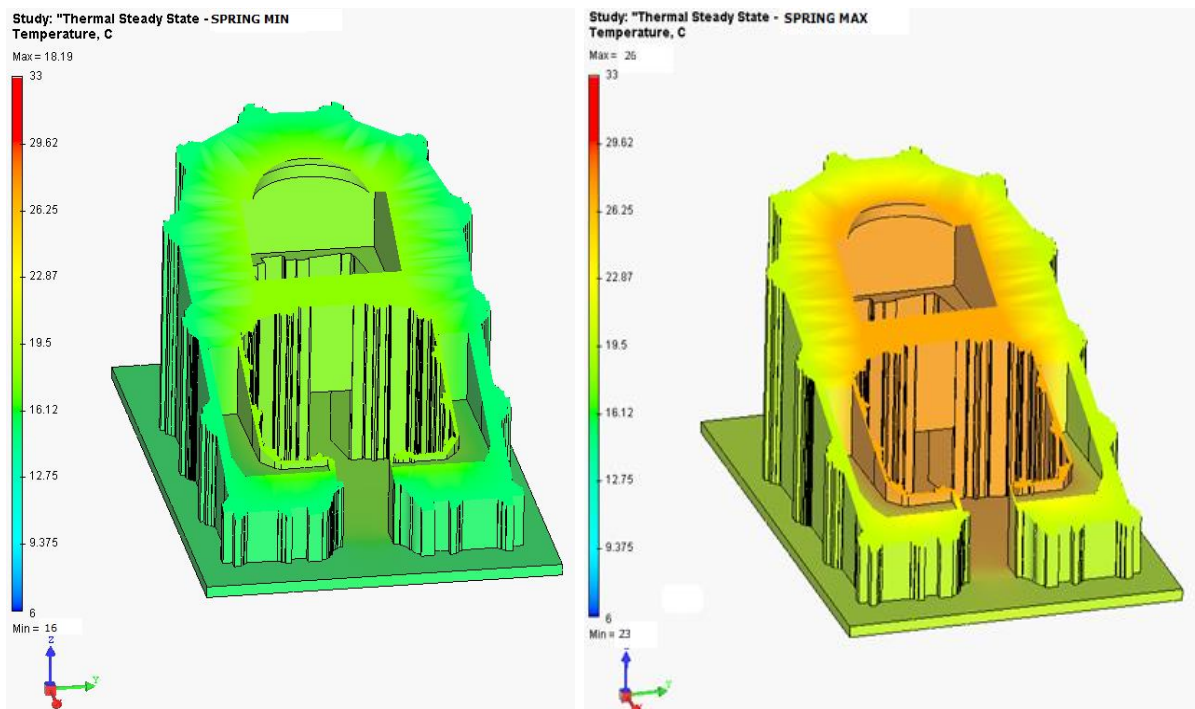
Εικόνα 5.8: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με ροή θερμότητας κατά τους χειμερινούς μήνες

Απεικονίζεται η ροή θερμότητας κατά την πιο ψυχρή και πιο θερμή ημέρα του χειμώνα με οριακές συνθήκες από 13 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 10 °C στην εξωτερική και από 18 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 16 °C στην εξωτερική αντίστοιχα (Εικόνα 5.8). Λόγω του μικρού θερμοκρασιακού εύρους οι αποχρώσεις κυμαίνονται από κυανές έως μπλε της θερμοκρασιακής κλίμακας,

στην πρώτη περίπτωση και από ανοιχτό πράσινο έως πράσινο στην δεύτερη. Η κατανομή αυτή λαμβάνει χώρα σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας, από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου.

- Εαρινοί μήνες

	Μέση ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)	Μέση μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)
$T_{\text{Jerusalem}}$	13	26
$T_{\text{air,out}}$	17	24
$T_{\text{surf,out}}$	16	23
$T_{\text{air,in}}$	20	27
$T_{\text{surf,in}}$	18	26



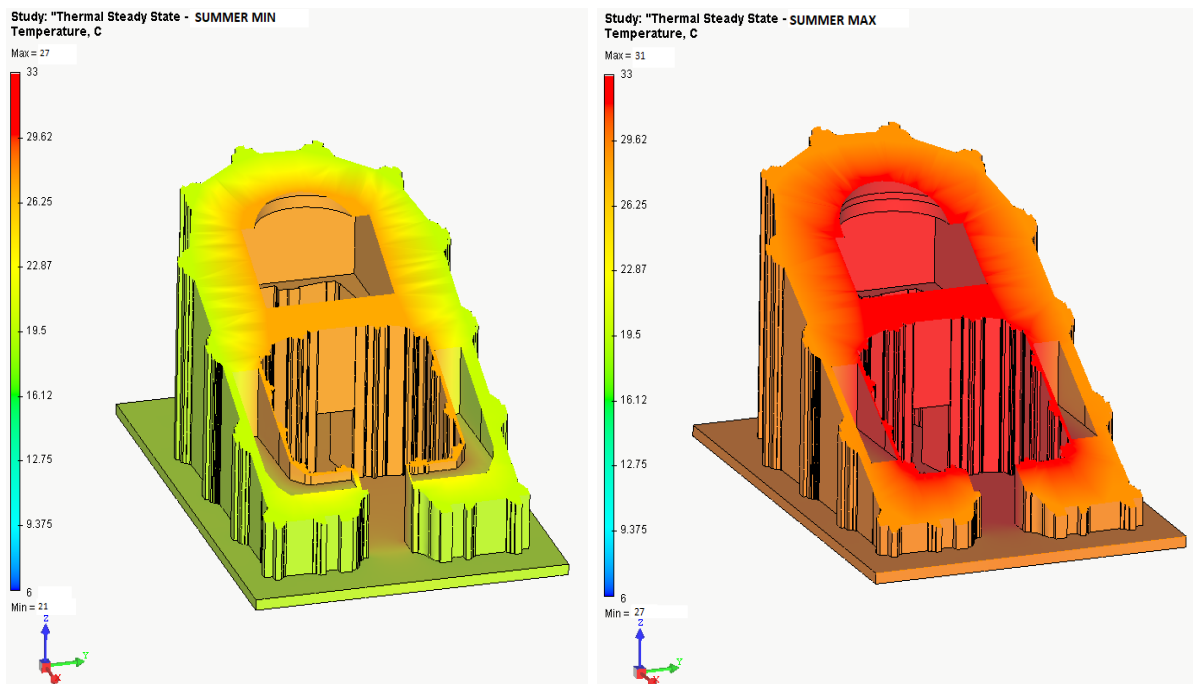
Εικόνα 5.9: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με ροή θερμότητας κατά τους εαρινούς μήνες

Απεικονίζεται η ροή θερμότητας κατά την πιο ψυχρή και πιο θερμή ημέρα της άνοιξης με οριακές συνθήκες από 18 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 16 °C στην εξωτερική και από 26 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 23 °C στην εξωτερική

αντίστοιχα (Εικόνα 5.9). Λόγω του μικρού θερμοκρασιακού εύρους οι αποχρώσεις κυμαίνονται από ανοιχτό πράσινο έως πράσινο της θερμοκρασιακής κλίμακας, στην πρώτη περίπτωση και από πορτοκαλί έως κίτρινο στην δεύτερη. Η κατανομή αυτή λαμβάνει χώρα σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας, από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου.

- Θερινοί μήνες

	Μέση ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)	Μέση μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)
$T_{\text{Jerusalem}}$	25	32
$T_{\text{air,out}}$	23	28
$T_{\text{surf,out}}$	21	27
$T_{\text{air,in}}$	30	32
$T_{\text{surf,in}}$	27	31



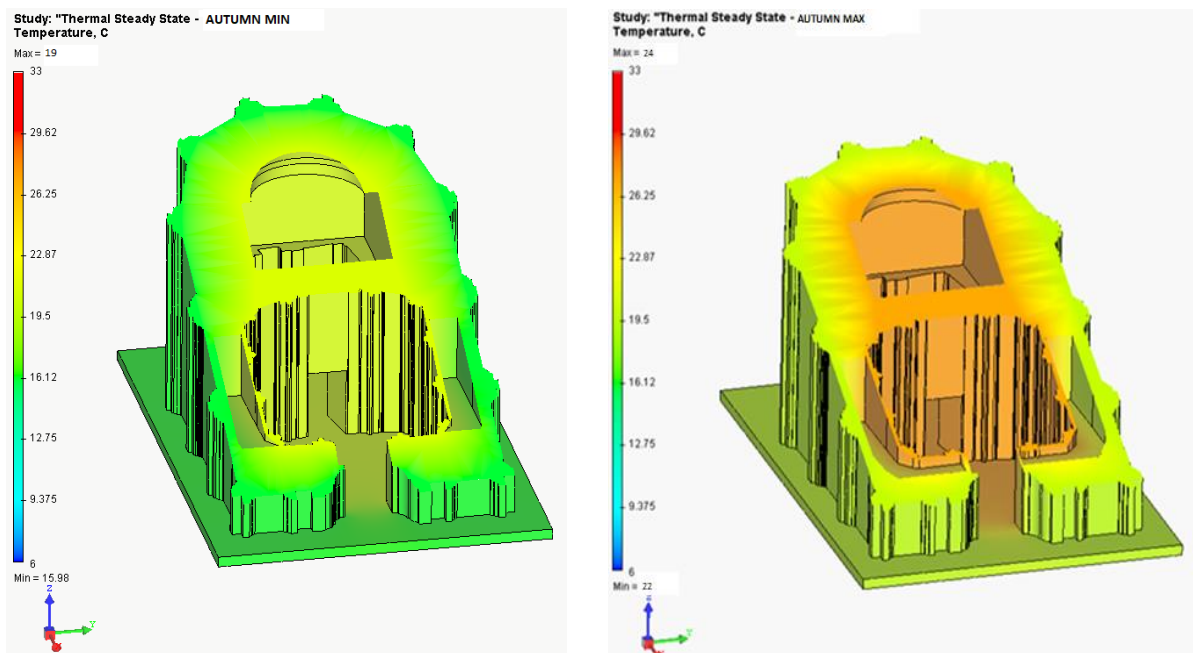
Εικόνα 5.10: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με ροή θερμότητας κατά τους θερινούς μήνες

Απεικονίζεται η ροή θερμότητας κατά την πιο ψυχρή και πιο θερμή ημέρα του καλοκαιριού με οριακές συνθήκες από 27 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 21 °C

στην εξωτερική και από 31 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 27 °C στην εξωτερική αντίστοιχα. Λόγω του μικρού θερμοκρασιακού εύρους οι αποχρώσεις κυμαίνονται από πορτοκαλί έως ανοιχτό πράσινο της θερμοκρασιακής κλίμακας, στην πρώτη περίπτωση και από κόκκινο έως πορτοκαλί στην δεύτερη. Η κατανομή αυτή λαμβάνει χώρα σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας, από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου.

- Φθινοπωρινοί μήνες

	Μέση ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)	Μέση μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή (°C)
$T_{\text{Jerusalem}}$	15	26
$T_{\text{air,out}}$	17	23
$T_{\text{surf,out}}$	16	22
$T_{\text{air,in}}$	20	25
$T_{\text{surf,in}}$	19	24

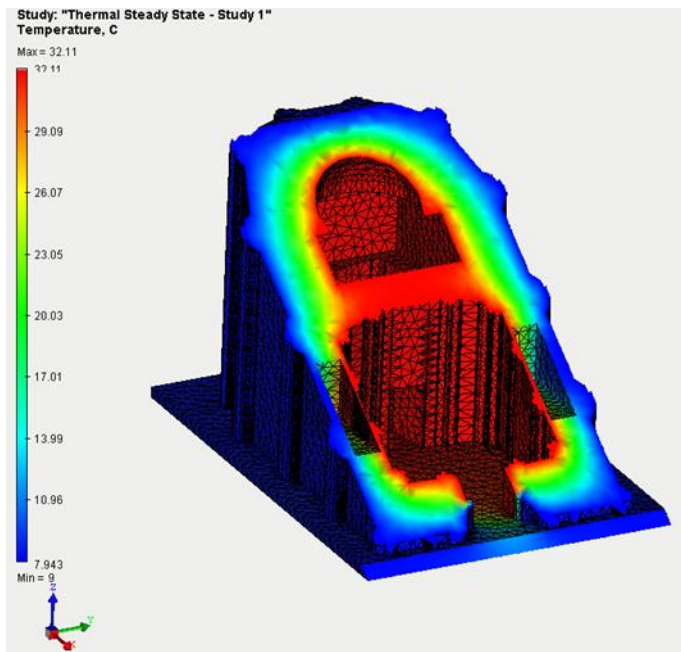


Εικόνα 5.11: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με ροή θερμότητας κατά τους φθινοπωρινούς μήνες

Απεικονίζεται η ροή θερμότητας κατά την πιο ψυχρή και πιο θερμή ημέρα του φθινοπώρου με οριακές συνθήκες από 19 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 16 °C στην εξωτερική και 24 °C στην εσωτερική τοιχοποιία έως 22 °C στην εξωτερική αντίστοιχα (Εικόνα 5.11). Λόγω του μικρού θερμοκρασιακού εύρους οι αποχρώσεις κυμαίνονται από ανοιχτό πράσινο έως πράσινο, της θερμοκρασιακής κλίμακας στην πρώτη περίπτωση και από πορτοκαλί έως κίτρινο στην δεύτερη. Η κατανομή αυτή λαμβάνει χώρα σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας, από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου.

- Ολιστικό μοντέλο

Το συγκεκριμένο μοντέλο εξυπηρετεί μόνο την πιο ευδιάκριτη απεικόνιση της ροής θερμότητας εντός της τοιχοποιίας του Ιερού Κουβουκλίου. Η διαφορά θερμοκρασίας ($\Delta T=23^{\circ}\text{C}$), θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας 9°C και εσωτερικής επιφάνειας 32°C , δεν είναι εφικτή δεδομένου ότι το Ιερό Κουβούκλιο δεν διαθέτει σύστημα θέρμανσης.



Εικόνα 5.12: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με ροή θερμότητας ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες

5.1 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η θερμοκρασία του αέρα εντός του Ιερού Κουβουκλίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη θερμοκρασία στο χώρο της Ροτόντας $2^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{air}} \leq 7^{\circ}\text{C}$, όπως μετρήθηκε από του ατμοσφαιρικούς ασύρματους αισθητήρες. Αυτό οφείλεται στο αισθητό φορτίο λόγω της επισκεψιμότητας των πιστών, σύμφωνα με ASHRAE 2001 το αισθητό φορτίο ενός ατόμου σε στάση ή με ελαφρύ βηματισμό ανέρχεται σε 75 Watt/m^2 εκ του οποίου το 58% εκπέμπεται μέσω ακτινοβολίας και το υπόλοιπο μέσω συναγωγής, αλλά και στη χρήση κεριών στο εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου. Ως αποτέλεσμα αυτού η θερμοκρασία της εσωτερικής τοιχοποιίας παρουσιάζει υψηλότερη τιμή από αυτή της εξωτερικής με τη ροή της θερμότητας να ακολουθεί την αντίστοιχη κατεύθυνση από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. Επιπλέον ο ανθρώπινος παράγοντας και η χρήση των κεριών κατά τους θερινούς μήνες, Πίνακας - Εικόνα 5.10, δημιουργούν τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά τόσο στον αέρα εντός και εκτός του Ιερού Κουβουκλίου με $\Delta T_{\text{air}}=7^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{air,out}}=23^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air,in}}=30^{\circ}\text{C}$), όσο και στην τοιχοποιία με $\Delta T_{\text{masonry}}=6^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{surf,out}}=21^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{surf,in}}=27^{\circ}\text{C}$), ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες, Πίνακας-Εικόνα 5.8, παρατηρείται η μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T_{\text{air}}=2^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{air,out}}=12^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air,in}}=14^{\circ}\text{C}$) και στην τοιχοποιία αντίστοιχα με $\Delta T_{\text{masonry}}=2^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{surf,out}}=16^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{surf,in}}=18^{\circ}\text{C}$). Συμπερασματικά προκύπτει ότι ο ανθρώπινος παράγοντας και η χρήση των κεριών κατά τους θερινούς μήνες αυξάνουν τη θερμοκρασιακή απόκλιση ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες λειτουργούν σταθεροποιητικά.

Οι μετρήσεις από τους εντοιχισμένους ενσύρματους αισθητήρες όπως φαίνεται και από τις θερμικές απεικονίσεις αλλά και από το διάγραμμα της εικόνας 4.3.1, επιβεβαιώνουν ότι η θερμοκρασία εντός της τοιχοποιίας παρουσιάζει υψηλότερη τιμή σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα στο χώρο της Ροτόντας. Η γραφική παράσταση του T_{masonry} απεικονίζεται πάνω από την αντίστοιχη του T_{airout} .

Επιπροσθέτως η καμπύλη του T_{masonry} δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις λόγω της θερμικής αδράνειας της τοιχοποιίας αλλά ακολουθεί με μικρή βραδύτητα τις θερμοκρασιακές μεταβολές του μικροπεριβάλλοντος του Ιερού Κουβουκλίου, όπως αυτό διαμορφώνεται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του.

Από τη μια μεριά μετατρέπει τις ημερήσιες εξωτερικές μεταβολές της θερμοκρασίας σε μικρές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του χώρου και από την άλλη πραγματοποιεί μία χρονική μετατόπιση των φάσεων, επιβραδύνει δηλαδή την επίδραση της αλλαγής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοίχου.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα της εικόνας 4.3.1 οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο περιβάλλον του Ιερού Κουβουκλίου (Ροτόντα) παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη διακύμανση σε σχέση με αυτές τις πόλης των Ιεροσολύμων υποδεικνύοντας τον προστατευτικό ρόλο που του παρέχει ο Ναός της Αναστάσεως δημιουργώντας πιο ευνοϊκό μικροκλίμα στο εσωτερικό του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των θερμικών καταπονήσεων στα υλικά της τοιχοποιίας του Ιερού Κουβουκλίου.

IV. Άμεσες επεμβάσεις αντιμετώπισης θερμοϋγρικών φαινομένων

1. Συστήματα αφύγρανσης και εξαερισμού

Παράλληλα με την ανάπτυξη στρατηγικής για τον εντοπισμό, τη χαρτογράφηση και την κατανομή των θερμοϋγρικών φαινομένων, κρίθηκε αναγκαία, λόγω της έντασης τους, η άμεση παρέμβαση στο Ιερό Μνημείο με την τοποθέτηση και εγκατάσταση συστημάτων αφύγρανσης και εξαερισμού. Γι το λόγο αυτό αποφασίστηκε η εγκατάσταση των παρακάτω συστημάτων:

- Σύστημα αφύγρανσης και εξαερισμού του Ιερού Κουβουκλίου
- Σύστημα αφύγρανσης και εξαερισμού του Ιερού Βράχου

1.1 Σύστημα αφύγρανσης και εξαερισμού του Ιερού Κουβουκλίου

Τεχνική περιγραφή αφύγρανσης:

Το σύστημα αφύγρανσης που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή παρέχει δυνατότητα αφύγρανσης $121 \text{ m}^3/\text{h}$, ροής αέρα $15 \text{ m}^3/\text{h}$ και στατική πίεση λειτουργίας 100 Pa . Αποτελεί συσκευή με ψυκτικό κύκλωμα, που αναρροφά τον αέρα του χώρου με τη βοήθεια του ανεμιστήρα που διαθέτει. Ο αέρας φιλτράρεται από ειδικά φίλτρα και περνώντας πάνω από ένα ψυκτικό στοιχείο (υγρά πηνία), υγροποιεί τους υδρατμούς και τους αποβάλλει υπό μορφή νερού. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μέσω συμπιεστή ο οποίος συμπιέζει ψυκτικό αέριο το οποίο μειώνει τη θερμοκρασία του συμπυκνωτή, με αποτέλεσμα ο αέρας να ψύχεται πολύ κάτω του σημείου δρόσου/υγροποίησης. Στη συνέχεια μέσω θερμού στοιχείου ο αέρας θερμαίνεται, ρίχνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την υγρασία του, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι αποτελεί μέσο θέρμανσης αφού ο αέρας που βγαίνει είναι περίπου 2°C θερμότερος. Διαθέτει ενσύρματο ενσωματωμένο αισθητήρα στην προσαγωγή του αέρα ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει πληροφορίες και από όλους τους ατμοσφαιρικούς, εντοιχισμένους ασύρματους και ενσύρματους αισθητήρες όπως έχουν τοποθετηθεί στο Ιερό Κουβούκλιο. Κατ' αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα κατάλληλης αυτοματοποιημένης λειτουργίας του αφυγραντήρα ανάλογα με τις επιθυμητές συνθήκες όπως έχουν οριστεί. Τέλος διαθέτει λειτουργία επανεκκίνησης σε διακοπή ρεύματος.



(α)



(β)

Εικόνα 1.1: Σύστημα (α) αφύγρανσης και (β) εξαερισμού

Τεχνική περιγραφή εξαερισμού:

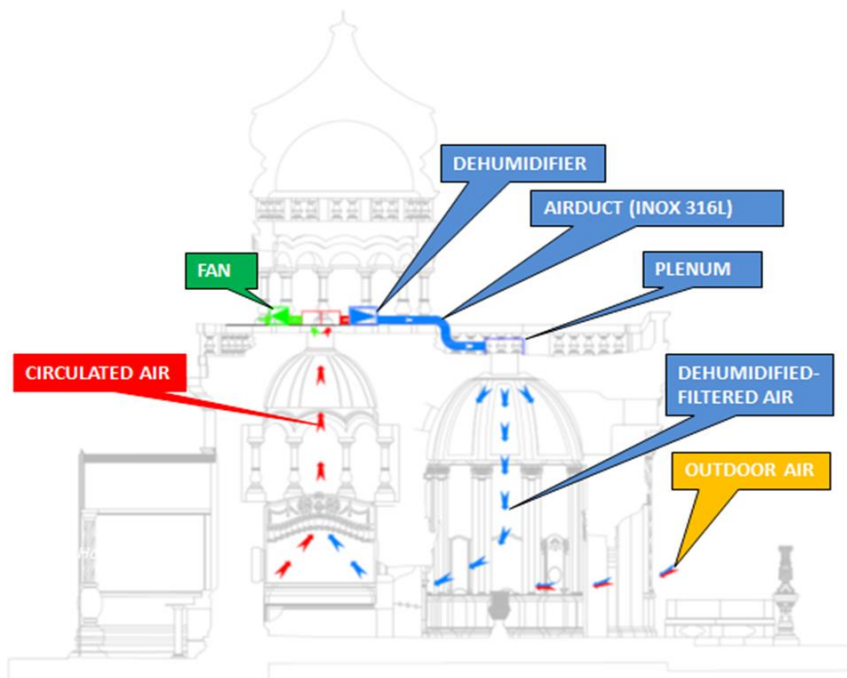
Για τον εξαερισμό χρησιμοποιήθηκε ορθογωνικό σύστημα απαγωγής – προσαγωγής αέρα με κυκλική πτερωτή σύμφωνα με VDI 2060, από πλαστικό PA6 και γαλβανισμένο στεγανό περίβλημα (IP44) από χάλυβα.

Ο έλεγχος της ταχύτητας λειτουργίας του συστήματος ρυθμίζεται, ανάλογα με τις ποσοστιαίες ενδείξεις αιθάλης, όπως αυτές καταγράφονται από ενσωματωμένο αισθητήριο.

Επιπλέον κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου συστήματος αποτέλεσαν η εύκολη εγκατάσταση σε οποιαδήποτε θέση συναρμολόγησης, όπως και ο εύκολος καθαρισμός και συντήρηση του.

Τοποθέτηση

Όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο της Μακροσκοπικής Παρατήρησης στο Ιερό Κουβούκλιο προϋπήρχαν δυο οπές, μια στο θόλο του Προθαλάμου (Παρεκκλήσι των Αγγέλων) και μια στον Ταφικό Θάλαμο, οι οποίες εξυπηρετούσαν μέσω φυσικού ελκυσμού του αέρα τον εξαερισμό του συνόλου του Ιερού Κουβουκλίου (Εικόνα 1.2).

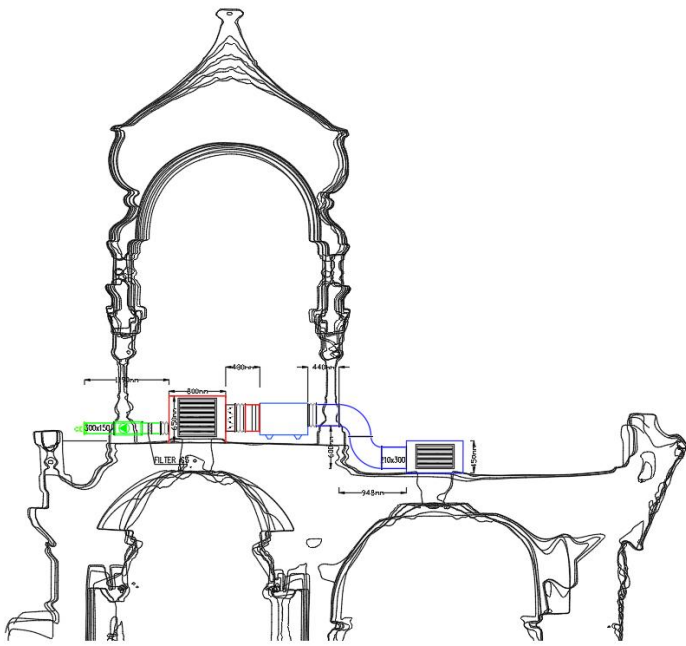


Εικόνα 1.2: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με σύστημα αφύγρανσης και εξαερισμού-Ροή αέρα

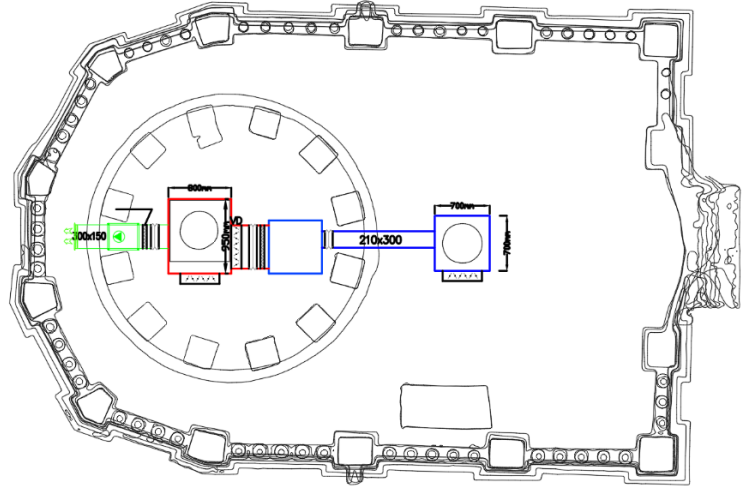
Στις συγκεκριμένες οπές τοποθετήθηκε το σύστημα αφύγρανσης. Πιο συγκεκριμένα στην οπή του Ταφικού Θαλάμου, στον περιστύλιο χώρο του εξωτερικού θόλου τοποθετήθηκε κατάλληλη διάταξη με αφυγραντήρα που αναρροφά αέρα ενώ στην συνέχεια τον προσάγει επεξεργασμένο στην οπή του θόλου στο Παρεκκλήσι των Αγγέλων.

Το σύστημα αφύγρανσης είναι συνδεδεμένο με ξεχωριστό δικό του ενσύρματο αισθητήριο τοποθετημένο κοντά στο σημείο αναρρόφησης στον θόλο του ταφικού θαλάμου, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει πληροφορίες και από τους αναμεταδότες των ασύρματων ατμοσφαιρικών αλλά και ενσύρματων εντοιχισμένων αισθητήρων που έχουν προαναφερθεί στο πειραματικό μέρος. Έτσι ρυθμίζεται αυτόματα η λειτουργία του ανάλογα με τις επιθυμητές συνθήκες υγρασίας αλλά δίνεται και η δυνατότητα αυξομείωσης της ροής του αέρα.

Λόγω της καύσης των κεριών εντός του Ταφικού Θαλάμου παρουσιάζονται υψηλά ποσοστά αιθάλης που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα αλλά και αλλοιώνουν χρωματικά τις επιφάνειες. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η ταυτόχρονη τοποθέτηση κατάλληλου συστήματος εξαερισμού στην οπή του ταφικού θαλάμου. Τοποθετήθηκε ανεμιστήρας συνδεδεμένος με ενσύρματο αισθητήριο μέτρησης της συγκέντρωσης αιθάλης, το οποίο ανάλογα με την ένδειξη δίνει εντολή στον ανεμιστήρα να απάγει ποσότητα αέρα. Στον Πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα μέρη του συστήματος αφύγρανσης και εξαερισμού.



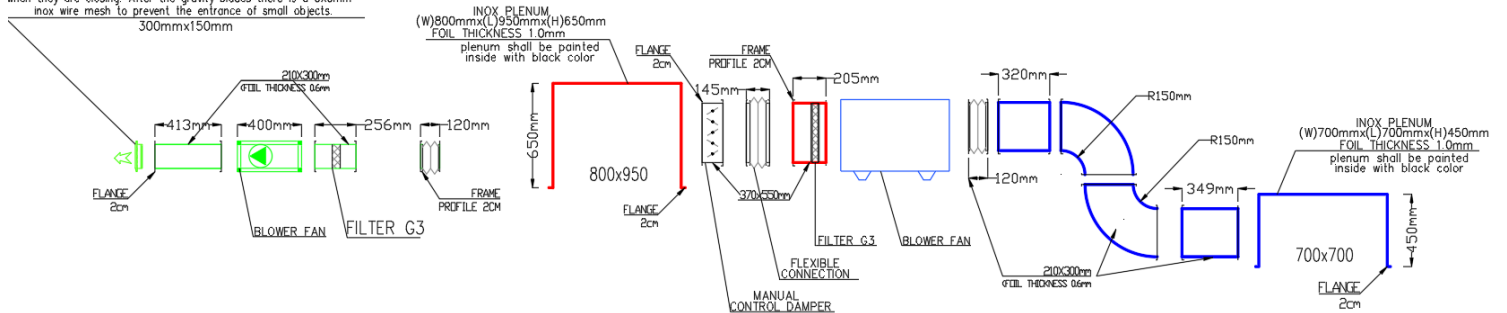
(α)



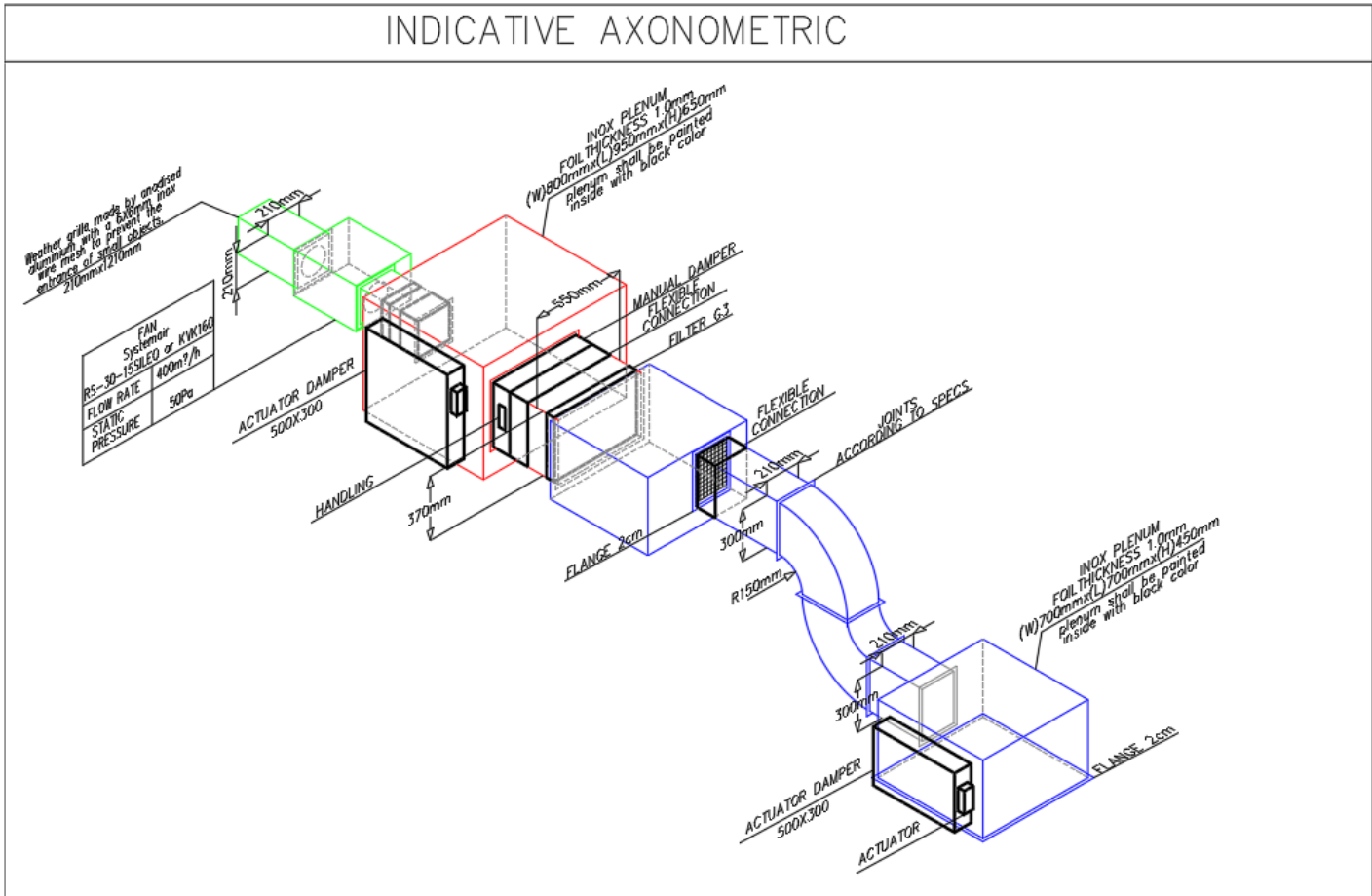
(β)

Εικόνα 1.3: α) Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με το σύστημα αφύγρυνσης και εξαερισμού
β) Κάτοψη του Ιερού Κουβουκλίου με αναλυτική περιγραφή των επιμέρους τμημάτων

Weather grille made by anodised aluminium with a frame in the back with anodised aluminium gravity blades. The weather grille has fixed blades with 45o angle. The aluminium gravity blades they have seals for noise reduction when they are closing. After the gravity blades there is a 6X6mm inox wire mesh to prevent the entrance of small objects.



Εικόνα 1.4: Ανάπτυγμα του συστήματος αφύγρυνσης σε τομή



Εικόνα 1.5 : 3D- ανάπτυγμα του συστήματος αφύγρανσης

ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ	
Είδος / Διαστάσεις	Περιγραφή
Αφυγρανήρας (650x660x450 mm)	Οι προδιαγραφές του αφυγρανήρα έχουν αναφερθεί στην τεχνική περιγραφή
Κυτίο (Plenum) αναρρόφησης (800x950x650 mm)	Κυτία (Plenum) από ανοξείδωτη λαμαρίνα πάχους 1 mm τοποθετημένα στην οπή του Ταφικού Θαλάμου (2.1) αλλά και στην οπή του Προθαλάμου (2.2), με ειδικά σχεδιασμένα χείλη 2 cm με παρέμβυσμα απόλυτης στεγανότητας στην επιφάνεια επαφής με το δάπεδο του δώματος.
Κυτίο (Plenum) προσαγωγής (700x700x450 mm)	

Διάφραγμα παροχής αέρος (Damper) (500x500x300 mm)	Ανοξειδωτα διαφράγματα παροχής αέρος με καθοδηγητικά πτερύγια, τοποθετημένα πάνω στα (Plenum) 2.1 και 2.2. Κατά τη λειτουργία του συστήματος αφύγρανσης τα διαφράγματα βρίσκονται σε πλήρως κλειστή θέση. Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ή βλάβης του μηχανήματος μέσω κατάλληλου αυτοματισμού ανοίγουν επιτρέποντας το φυσικό ελκυσμό του αέρα στους χώρους.
Διάφραγμα παροχής αέρος (Damper) (500x300x300 mm)	
Χειροκίνητο διάφραγμα ρύθμισης παροχής αέρος (370x550x145 mm)	Χειροκίνητο διάφραγμα ρύθμισης παροχής αέρος για την επιπλέον ρύθμιση της ροής του αέρα.
Εύκαμπτη σύνδεση (300x210x120 mm)	Με τις εύκαμπτες συνδέσεις διασφαλίζεται η αντικραδασμική διασύνδεση του αφυγραντήρα με τους ανοξειδωτους αεραγωγούς και η μείωση του θορύβου.
Εύκαμπτη σύνδεση (370x550x145 mm)	
Φιλτροθήκη με Φίλτρο G3 (370x550x205 mm)	Φίλτρο G3 ενεργού άνθρακα με μικρή αντίσταση και μεγάλη ροή για τη συγκράτηση μικροσωματιδίων και σκόνης του αέρα.
Συνδετήριοι αεραγωγοί	Συνδετήριοι αεραγωγοί από ανοξειδωτη λαμαρίνα πάχους 0.6 mm με κατάλληλη γεωμετρία προσαρμοσμένη στις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής.
ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ	
Είδος / Διαστάσεις	Περιγραφή
Ανεμιστήρας εξαερισμού (367x415x266 mm)	Οι προδιαγραφές του ανεμιστήρα εξαερισμού έχουν αναφερθεί στην τεχνική περιγραφή
Φιλτροθήκη με Φίλτρο G3 (210x300x256 mm)	Φίλτρο G3 από συνθετικές ίνες και υαλοβάμβακα με μικρή αντίσταση και μεγάλη ροή για τη συγκράτηση της αιθάλης ώστε να μην προκαλούνται χρωματικές αλλοιώσεις στο στηθαίο του δώματος.
Εύκαμπτη σύνδεση (210x300x120 mm)	Με την εύκαμπτη σύνδεση διασφαλίζεται η αντικραδασμική διασύνδεση του ανεμιστήρα εξαερισμού

	με τον ανοξείδωτο αεραγωγό και η μείωση του θορύβου.
Αεραγωγός απαγωγής με γρίλια (210x300x413 mm)	Αεραγωγός απαγωγής από ανοξείδωτη λαμαρίνα πάχους 0.6 mm με γρίλια από ανοδιωμένο αλουμίνιο και καθοδηγητικά πτερύγια υπό 45° κλίση. Η γρίλια διαθέτει ακόμη σήτα για την παρεμπόδιση εισροής εντόμων.



Εικόνα 1.6: Plenum με διάφραγμα στην οπή του Ταφικού Θαλάμου



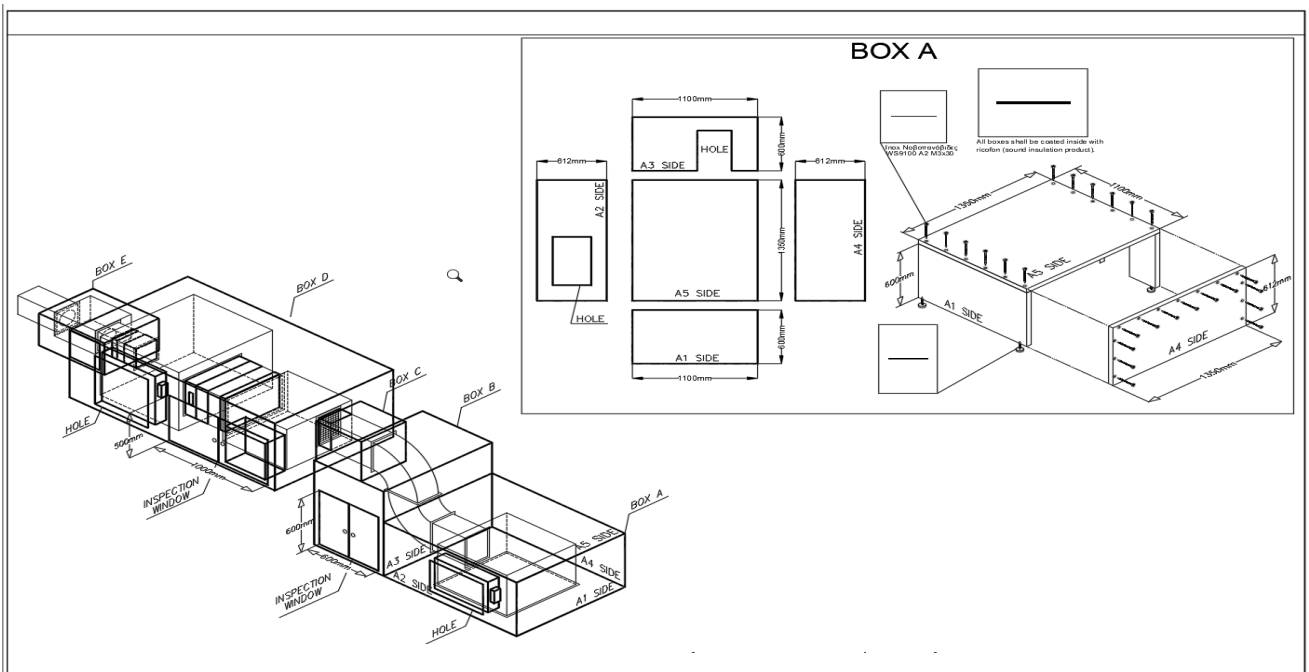
Εικόνα 1.7: Plenum – Διάταξη εξαερισμού στην οπή του Ταφικού Θαλάμου



Εικόνα 1.8: Ολοκλήρωση τοποθέτησης συστήματος εξαερισμού και αφύγρανσης

Όλο το σύστημα είναι τοποθετημένο σε πλωτές μεταλλικές βάσεις για να μην μεταφέρονται κραδασμοί στο εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου αλλά και για την μείωση του θορύβου.

Κατά την λειτουργία των μηχανημάτων και για να μην μεταφέρεται ο θόρυβος, στο χώρο της Ροτόντας, όλο το σύστημα εξαερισμού και αφύγρανσης καλύφθηκε με ξύλινη επένδυση με κατάλληλο ηχομονωτικό υλικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9 : 3D απεικόνιση της ξύλινης επένδυσης για την κάλυψη συστήματος εξαερισμού και αφύγρανσης

Η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελείται από 5 ξεχωριστά κυτία, κατασκευασμένα από ειδικό τύπο ξύλου πάχους 12 mm με υψηλές αντοχές στην υγρασία. Έχουν χρησιμοποιηθεί ανοξειδωτες βίδες για την συναρμολόγηση τους ενώ στο εσωτερικό τους είναι καλυμμένα με κατάλληλο ηχομονωτικό υλικό σε όλες τις πλευρές τους. Φέρουν οπές που εξυπηρετούν τη σωστή λειτουργία του μηχανήματος που περικλείουν, αλλά και θυρίδες επίσκεψης στα κύρια μέρη του, ενώ στα σημεία που εδράζονται έχουν παρέμβυσμα απόλυτης στεγανότητας στην επιφάνεια επαφής με το δάπεδο του δώματος.



Εικόνα 1.10: Τελική μορφή του συστήματος εξαερισμού και αφύγρυνσης κατά την παράδοση του έργου

1.2 Σύστημα αφύγρανσης Ιερού Βράχου

Τεχνική Περιγραφή

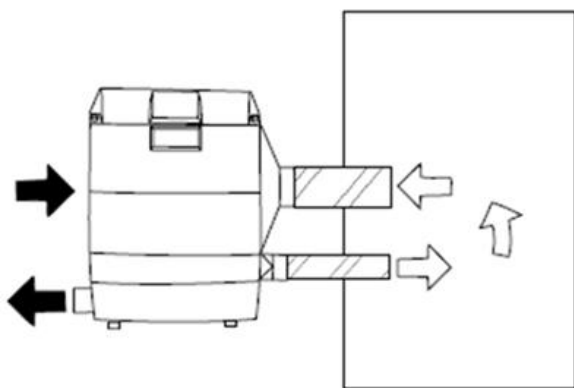
Το σύστημα αφύγρανσης που χρησιμοποιήθηκε στον Ιερό Βράχο είναι ο αφυγραντήρας MG50 της εταιρείας Munters με ενσωματωμένο ανεμιστήρα, αποξηραντικό ρότορα και ανεμιστήρα επανενεργοποίησης.

Παρέχει δυνατότητα αφύγρανσης $85 \text{ m}^3/\text{h}$, ροής αέρα $12 \text{ m}^3/\text{h}$ και στατική πίεση λειτουργίας 50 Pa . Το περίβλημα του είναι κατασκευασμένο από χυτό αλουμίνιο ανθεκτικό στη διάβρωση.



Εικόνα 1.11: Αφυγραντήρας MG50 της εταιρείας Munters

Ο ρότορας αποξηραντικού μέσου διαθέτει μεγάλο αριθμό μικρών καναλιών που αναρροφά αέρα μέσω εύκαμπτων αεραγωγών από τον χώρο του Ιερού Βράχου. Είναι κατασκευασμένος από σύνθετο υλικό, ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην προσέλκυση και συγκράτηση του νερού. Ταυτόχρονα κατά τη λειτουργία του ο αέρας θερμαίνεται ρίχνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την υγρασία του και στη συνέχεια προσάγεται στο χώρο του Ιερού Βράχου. Η συγκεκριμένη συσκευή παρέχει μια συνεχή διαδικασία αφύγρανσης.



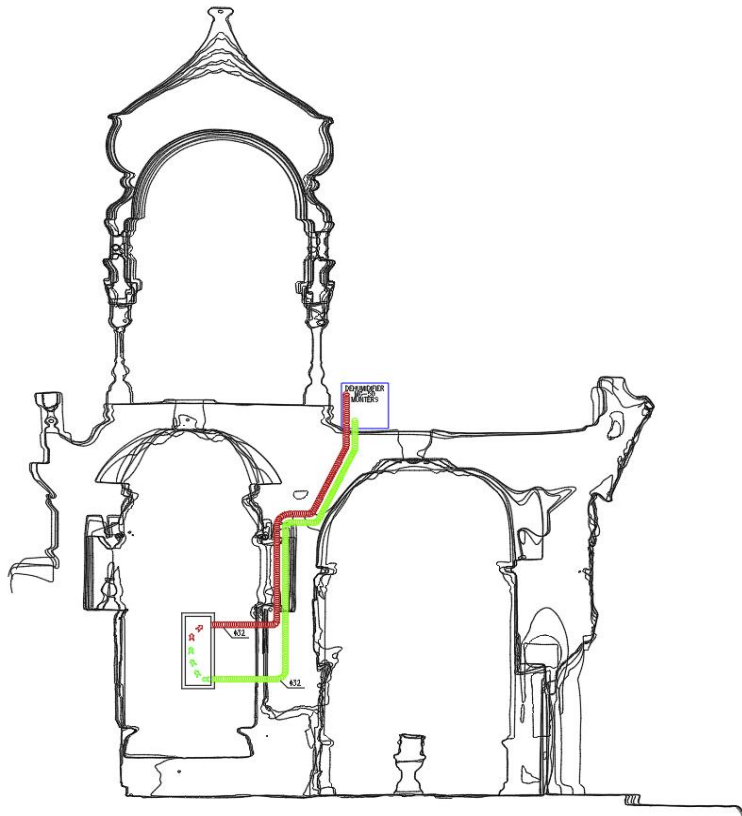
Εικόνα 1.12: Κλειστό σύστημα αφύγρανσης Ιερού Βράχου

Τοποθέτηση

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο της μακροσκοπικής παρατήρησης στο παράθυρο του Ιερού Βράχου υπήρχε διάτρητο τμήμα το οποίο όμως δεν ήταν ικανό για τον επαρκή εξαερισμό του χώρου και τον περιορισμό των έντονων φαινομένων υγρασίας και βιοδιάβρωσης. Κρίθηκε αναγκαία η τοποθέτηση ενός επιπλέον συστήματος αφύγρανσης και εξαερισμού αποκλειστικά για τη διαχείριση και τον έλεγχο των συνθηκών (σχετικής υγρασίας (RH%), θερμοκρασίας (T) καθώς και ρύθμισης ροής αέρα) εντός του παραθύρου του Ιερού Βράχου.

Τοποθετήθηκε στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου κατάλληλη μονάδα ενώ με χρήση δικτύου εύκαμπτων σωληνώσεων διάστασης Φ32 διασφαλίστηκε η ομαλή και χωρίς διαρροές μεταφορά του επεξεργασμένου αέρα. Για τις οδεύσεις των σωληνώσεων ήταν επιτακτική η διάνοιξη οπών σε συγκεκριμένες θέσεις ώστε να μην προκληθούν φθορές και να μην αλλοιωθεί η αισθητική του Ιερού Μνημείου.

Έγινε διάνοιξη οπής από το δώμα μέχρι την προϋπάρχουσα οπή φυσικού ελκυσμού του αέρα που συνδέει τον Προθάλαμο (Παρεκκλήσι των Αγγέλων) με τον Ταφικό Θάλαμο. Ακολούθησε η όδευση των σωληνώσεων, από τον εσωτερικό περιστύλιο χώρο που στηρίζει τον θόλο πάνω από τον Ταφικό Θάλαμο, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι άμεσα ορατές από τους επισκέπτες. Στην συνέχεια έγινε διάνοιξη οπών στα εσωτερικά τοιχώματα πίσω από τις ορθομαρμαρώσεις για την τελική εισχώρηση των σωληνώσεων στον κενό χώρο μεταξύ παραθύρου και Ιερού Βράχου.



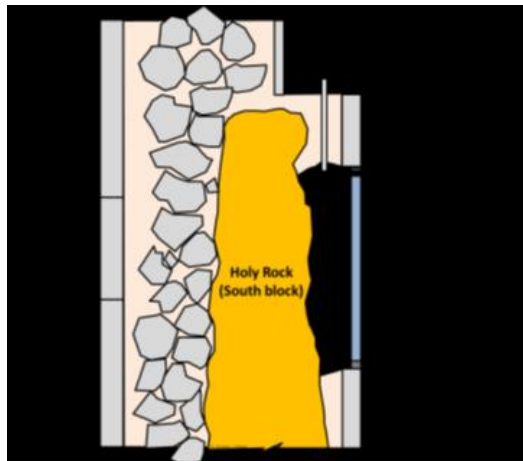
Εικόνα 1.13: Τομή του Ιερού Κουβουκλίου με τις οδεύσεις των εύκαμπτων σωληνώσεων



Εικόνα 1.14: Όδευση σωληνώσεων από το δώμα προς το εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου

Η προσαγωγή του κατάλληλα επεξεργασμένου αέρα τοποθετήθηκε στο κατώτερο σημείο του χώρου, ενώ η επιστροφή του στο υψηλότερο εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την καλύτερη κυκλοφορία του αέρα. Με κατάλληλη ρύθμιση της ροής εξασφαλίζεται πλέον υπερπίεση και

ελαχιστοποιούνται οι ροές από τον περιβάλλοντα χώρο του Ταφικού Θαλάμου προς τον χώρο του Ιερού Βράχου. Επιπλέον κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση του παραθύρου με πιο στεγανή κατασκευή έτσι ώστε να απομονώνεται ο Ιερός Βράχος και να λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα αερισμού επιτυγχάνοντας τις επιθυμητές συνθήκες σχετικής υγρασίας 45%-48% και θερμοκρασίας περί τους 21-25 °C.



Εικόνα 1.15:
Σχηματική απεικόνιση
του παραθύρου του
Ιερού Βράχου

Το σύστημα αφύγρυνσης είναι συνδεδεμένο με ξεχωριστό δικό του ενσύρματο αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας τοποθετημένο κοντά στο σημείο επιστροφής του αέρα, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει πληροφορίες και από το ασύρματο ατμοσφαιρικό (L5) αλλά και τα ενσύρματα εντοιχισμένα αισθητήρια (DMS11, TM1) όπως έχουν προαναφερθεί στο Πειραματικό μέρος. Έτσι διασφαλίζεται η συνεχής και αδιάλειπτη παρακολούθηση ενώ ταυτόχρονα ρυθμίζεται αυτοματοποιημένα και με ακρίβεια η λειτουργία του συστήματος ανάλογα με τις επιθυμητές συνθήκες όπως έχουν οριστεί.

Για να μην μεταφέρεται ο θόρυβος στο χώρο της Ροτόντας το σύστημα εξαερισμού και αφύγρυνσης του παραθύρου εντάχθηκε στην ξύλινη επένδυση όπως έχει προαναφερθεί.

V. Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση του θερμοϋγκρικού προβλήματος είναι επιτακτικό να αποτελεί προϊόν διεπιστημονικής μελέτης.

Προτεραιότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης αποτελεί η τεκμηρίωση των τοπογραφικών, κλιματολογικών και μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών, ως κύριων παραμέτρων, που επιδρούν στο Ιερό Μνημείο.

Σε εφαρμογές απομακρυσμένης παρακολούθησης είναι απαραίτητη η χρήση των σύγχρονων τεχνολογιών που επιτρέπουν στις μέρες μας την εύκολη και γρήγορη μεταφορά δεδομένων. Η τοποθέτηση ατμοσφαιρικών ασύρματων και εντοιχισμένων ενσύρματων αισθητηρίων διευκολύνει τη λήψη των μετρήσεων αλλά και τον συσχετισμό τους.

Η οπτικοποίηση των φαινομένων μεταφοράς μέσω της τροφοδότησης κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων, δίνει αξιόπιστες πληροφορίες στο σύνολο του μνημείου σχετικά με τη ροή θερμότητας εντός της τοιχοποιίας.

Προκύπτει ότι η θερμοκρασία του αέρα εντός του Ιερού Κουβουκλίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη θερμοκρασία στο χώρο της Ροτόντας $2^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{air}} \leq 7^{\circ}\text{C}$, όπως μετρήθηκε από του ατμοσφαιρικούς ασύρματους αισθητήρες. Αυτό οφείλεται στο αισθητό φορτίο λόγω της επισκεψιμότητας των πιστών, αλλά και στη χρήση κεριών στο εσωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου. Ως αποτέλεσμα αυτού η θερμοκρασία της εσωτερικής τοιχοποιίας παρουσιάζει υψηλότερη τιμή από αυτή της εξωτερικής με τη ροή της θερμότητας να ακολουθεί την αντίστοιχη κατεύθυνση από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. Επιπλέον ο ανθρώπινος παράγοντας και η χρήση των κεριών κατά τους θερινούς μήνες, δημιουργούν τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά τόσο στον αέρα εντός και εκτός του Ιερού Κουβουκλίου με $\Delta T_{\text{air}}=7^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{air,out}}=23^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air,in}}=30^{\circ}\text{C}$), όσο και στην τοιχοποιία με $\Delta T_{\text{masonry}}=6^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{surf,out}}=21^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{surf,in}}=27^{\circ}\text{C}$), ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες, παρατηρείται η μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T_{\text{air}}=2^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{air,out}}=12^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air,in}}=14^{\circ}\text{C}$) και στην τοιχοποιία αντίστοιχα με $\Delta T_{\text{masonry}}=2^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{surf,out}}=16^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{surf,in}}=18^{\circ}\text{C}$).

Ο ανθρώπινος παράγοντας και η χρήση των κεριών κατά τους θερινούς μήνες αυξάνουν τη θερμοκρασιακή απόκλιση ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες λειτουργούν σταθεροποιητικά.

Επιβεβαιώνεται ότι η θερμοκρασία εντός της τοιχοποιίας παρουσιάζει υψηλότερη τιμή σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα στο χώρο της Ροτόντας.

Επιπροσθέτως η τοιχοποιία δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις λόγω θερμικής αδράνειας, αλλά ακολουθεί με μικρή βραδύτητα τις θερμοκρασιακές μεταβολές του μικροπεριβάλλοντος του Ιερού Κουβουκλίου, όπως αυτό διαμορφώνεται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του.

Οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο περιβάλλον του Ιερού Κουβουκλίου (Ροτόντα) παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη διακύμανση σε σχέση με αυτές τις πόλης των Ιεροσολύμων υποδεικνύοντας τον προστατευτικό ρόλο που του παρέχει ο Ναός της Αναστάσεως δημιουργώντας πιο ευνοϊκό μικροκλίμα στο εσωτερικό του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των θερμικών καταπονήσεων στα υλικά της τοιχοποιίας του Ιερού Κουβουκλίου.

Παράλληλα με τα ανωτέρω, είναι αναγκαίο ο μελετητής να μπορεί να κρίνει την ένταση των φαινομένων ώστε να προβεί άμεσα σε επεμβάσεις αντιμετώπισης για την αποφυγή περεταίρω επιδείνωσης.

Επιβάλλεται η χρήση σύγχρονων μέσων αφύγρανσης και εξαερισμού που σε συνεργασία με τους αισθητήρες μειώνουν την ένταση των φαινομένων και επιτυγχάνουν τη διατήρηση των ιδανικών συνθηκών.

Μελλοντικό στόχο αποτελεί η αριστοποίηση του μοντέλου με επιπλέον δεδομένα εισόδου όσον αφορά την υγρασία και το είδος της τοιχοποιίας (τρίστρωτη τοιχοποιία), που συμβάλουν σε μια πιο ολοκληρωμένη απεικόνιση της επίδρασης των προαναφερόμενων παραγόντων πάνω στα υλικά του μνημείου.

VI. Προοπτικές

Μελλοντική προοπτική αποτελεί η διευθέτηση των υπόγειων, των επιφανειακών υδάτων καθώς και των λυμάτων για την ολοκληρωμένη προστασία του Ιερού Κουβουκλίου από την ανερχόμενη υγρασία. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί ένας συνδυασμός επεμβάσεων.

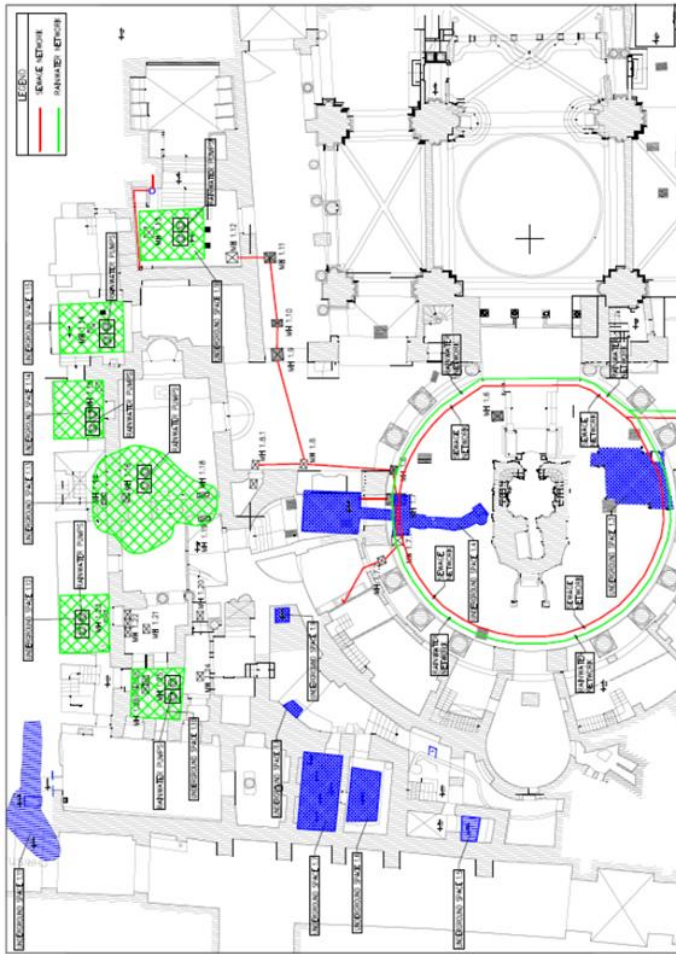
Όπως έχει ήδη προαναφερθεί ο Ναός της Αναστάσεως διαθέτει ένα παλιό^{68,69}, σύνθετο και δυσλειτουργικό δίκτυο αποχέτευσης, όμβριων αλλά και λυμάτων, τμήμα του οποίου διασχίζει την περιοχή της Ροτόντας προκαλώντας ποικίλα προβλήματα στο Ιερό Κουβούκλιο.

Κατάλληλη επέμβαση θα αποτελούσε η κατάργηση του υπάρχοντος και η δημιουργία δυο νέων δικτύων αποχέτευσης, ένα λυμάτων και ένα όμβριων, παράλληλα με το υφιστάμενο αλλά και μεταξύ τους, που θα οδηγούν τα ύδατα χωρίς διαρροές στο δίκτυο της παλαιάς πόλης των Ιεροσολύμων.

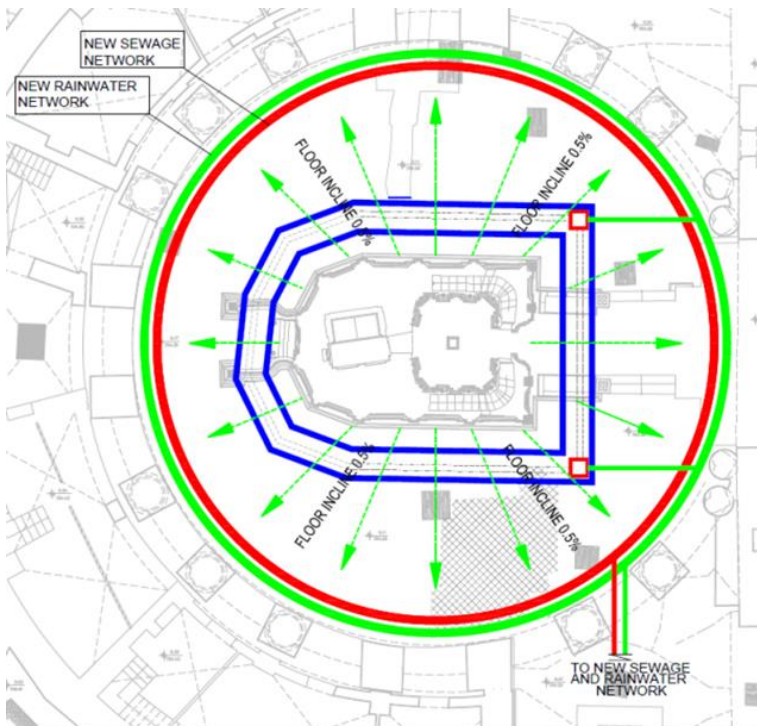
Στο χώρο της Ροτόντας προτείνεται η περιμετρική όδευση των προαναφερθέντων δικτύων, σε απόσταση 50-60cm από τις κολώνες που στηρίζουν το θόλο του Ναού της Αναστάσεως.

Απαραίτητη κρίνεται διασύνδεση των υπάρχοντων δεξαμενών με το νέο δίκτυο όμβριων αλλά και η τοποθέτηση κατάλληλων αντλιών σε υπόγειους χώρους και δομές για την απόρριψη των ανεπιθύμητων υδάτων. Για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας των νέων δικτύων χρήσιμη είναι και η δημιουργία φρεατίων παρακολούθησης.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα δυο νέα δίκτυα αποχέτευσης, με κόκκινο χρώμα το δίκτυο λυμάτων ενώ με πράσινο το δίκτυο όμβριων. Τα πράσινα και μπλε γραμμοσκιασμένα τμήματα αποτελούν δεξαμενές και υπόγειες δομές^{70,71}.

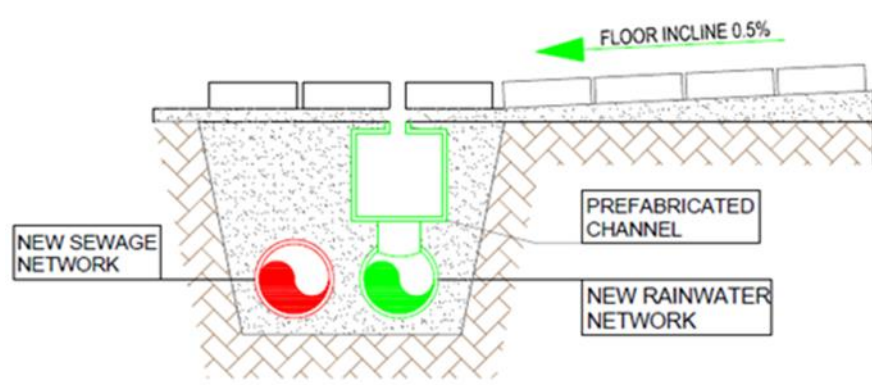


Εικόνα 1.1:
Νέο δίκτυο όμβριων και
λυμάτων υδάτων στην κάτοψη
του Ναού της Αναστάσεως



Εικόνα 1.2: Κάτοψη των
περιμετρικών δικτύων
στη Ροτόντα

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 τα περιμετρικά δίκτυα θα είναι συνδεδεμένα με τα νέα κεντρικά δίκτυα που έχουν προαναφερθεί ενώ το λιθόστρωτο δάπεδο στο χώρο της Ροτόντας θα πρέπει να επανατοποθετηθεί με κατάλληλες ρήσεις για την καλύτερη αποστράγγιση των επιφανειακών υδάτων σε προκατασκευασμένο υπόγειο κανάλι.



Εικόνα 1.3:
Ενδεικτική τομή
του νέου
αποχετευτικού
δικτύου όμβριων
- λυμάτων
υδάτων

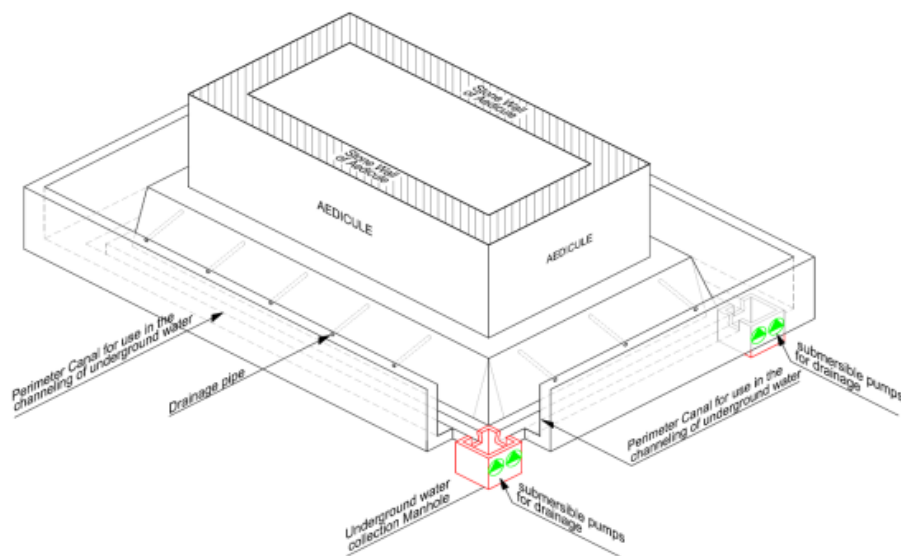
Το προκατασκευασμένο υπόγειο κανάλι θα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το περιμετρικό δίκτυο όμβριων υδάτων και θα είναι συνδεδεμένο με αυτό, ενώ για την συλλογή των υδάτων θα υπάρχουν μικρά ανοίγματα - στόμια κρυφού τύπου. Έτσι δεν θα αλλοιωθεί η αισθητική του δαπέδου της Ροτόντας ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα.

Επιπλέον, στόχος για μελλοντική επέμβαση αποτελεί η μείωση και αποτροπή της περαιτέρω έκθεσης των θεμελίων του Ιερού Κουβουκλίου σε ένα επιβλαβές περιβάλλον.

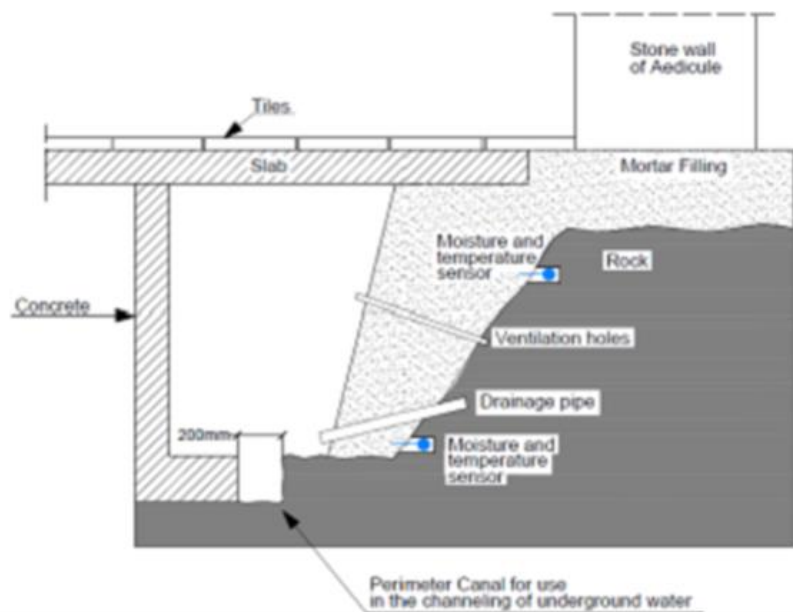
Παράλληλα με τη νέα διευθέτηση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός υπόγειου περιμετρικού διαδρόμου κοντά στη βάση του Ιερού Κουβουκλίου για την αποστράγγιση των υδάτων, λόγω του υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, αλλά και τον εξαερισμό της θεμελίωσης.

Στο δάπεδο του περιμετρικού διαδρόμου, δύναται να κατασκευαστεί ένα σύστημα αποχέτευσης το οποίο μέσω ενός ανοιχτού καναλιού με κατάλληλες ρήσεις θα οδηγεί τα υπόγεια ύδατα, σε δύο φρεάτια συλλογής με διαστάσεις 50x50x50 cm. Στα φρεάτια αυτά θα είναι τοποθετημένες υποβρύχιες αντλίες

για την πλήρη απόρριψη των υπόγειων υδάτων στο νέο περιμετρικό δίκτυο και στη συνέχεια στο υπάρχον δίκτυο της πόλης.



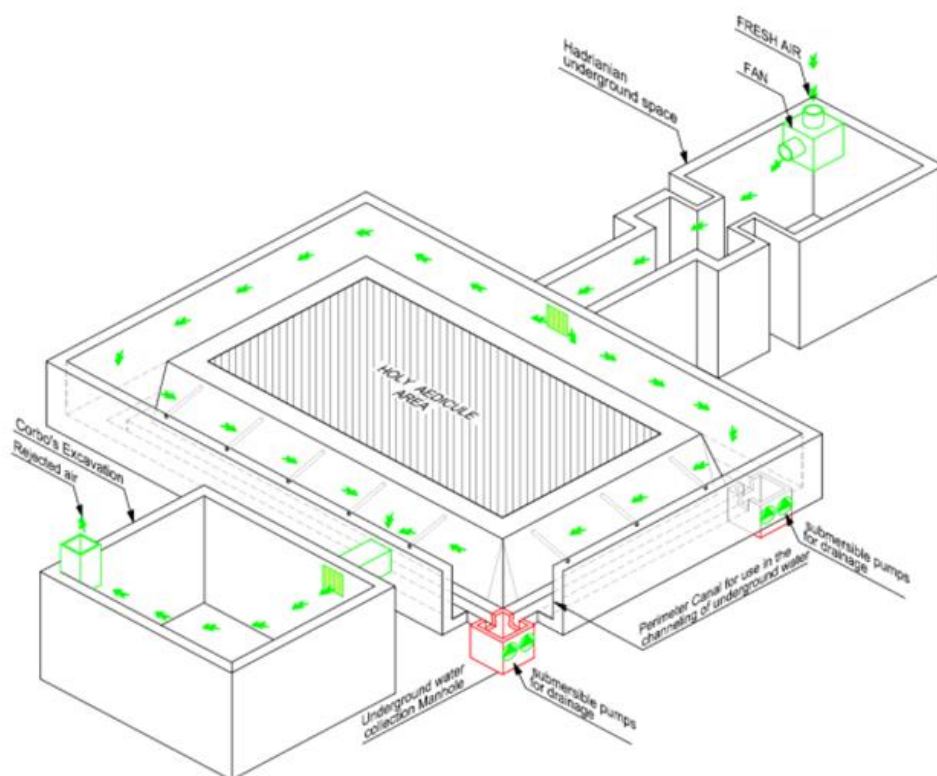
Εικόνα 1.4: Σχηματική 3D απεικόνιση του προτεινόμενου υπογείου συστήματος αποστράγγισης του περιμετρικού διαδρόμου



Εικόνα 1.5: Τομή του προτεινόμενου υπογείου συστήματος αποστράγγισης του περιμετρικού διαδρόμου

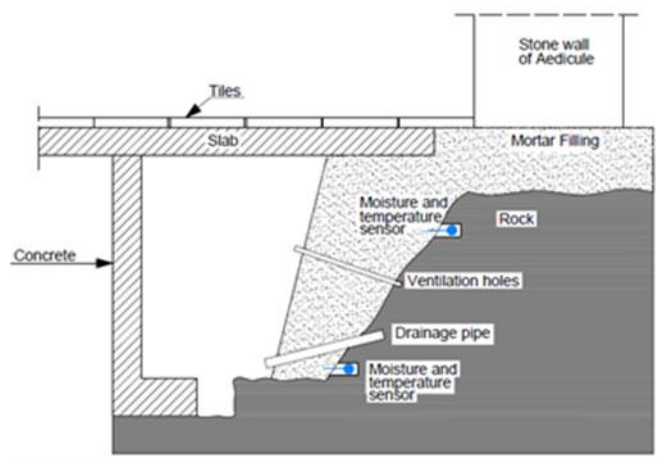
Για την ολοκληρωμένη αποστράγγιση της νέας θεμελίωσης αλλά και του τμήματος μεταξύ αυτής και του βράχου πάνω στον οποίο εδράζεται το Ιερό Κουβούκλιο, θα τοποθετηθούν αερικά σιφόνια διάστασης Φ50 με κατάλληλη κλίση.

Επιτακτική είναι ακόμα η ανάγκη εγκατάστασης ενός συστήματος εξαερισμού του υπόγειου περιμετρικού διαδρόμου μέσω των υπόγειων δομών που βρίσκονται πολύ κοντά στην θεμελίωση του Ιερού Κουβουκλίου. Πιο συγκεκριμένα, ο καθαρός αέρας θα προσάγεται μέσω ενός κατάλληλου συστήματος τοποθετημένου στην Αδριάνεια δεξαμενή στο βόρειο τμήμα του Ιερού Κουβουκλίου, ενώ στην συνέχεια λόγω υπερπίεσης θα οδηγείται φυσικά εντός του περιμετρικού διαδρόμου. Η Αδριάνεια δεξαμενή ορίστηκε ως σημείο προσαγωγής καθαρού αέρα επειδή είναι πιο κοντά σε υπαίθριο χώρο. Ταυτόχρονα ένα άλλο σύστημα τοποθετημένο στην ανασκαφή του Corbo, στη νότια πλευρά, θα απάγει ποσότητα αέρα προς το περιβάλλον της Ροτόντας. Αυτό θα εξασφαλίζει τη συνεχή ροή αέρα μέσα στον περιμετρικό δακτύλιο εμποδίζοντας την αύξηση των επιπέδων υγρασίας. Το σύστημα κυκλοφορίας θα είναι ρυθμιζόμενης ροής.



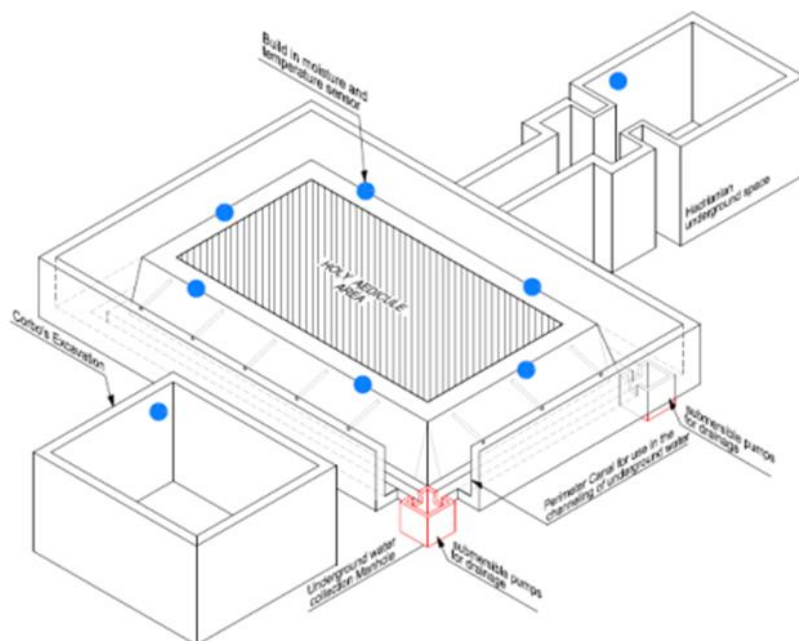
Εικόνα 1.6:
Σχηματική απεικόνιση του συστήματος αερισμού και εξαερισμού του υπόγειου περιμετρικού διαδρόμου και των υπόγειων δομών.

Τέλος για την συνεχή παρακολούθηση των θερμογρικών φαινομένων στον Ιερό Βράχο θα εγκατασταθεί ένα σύστημα εντοιχισμένων ενσύρματων αισθητήρων σε δύο επίπεδα αλλά και σε διαφορετικούς προσανατολισμούς όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 1.7:
Τομή του υπόγειου περιμετρικού δακτυλίου με τις θέσεις των ενσύρματων εντοιχισμένων αισθητήρων

Ακόμη, αισθητήρες θα τοποθετηθούν στη δεξαμενή του Ανδριανού αλλά και στην εκσκαφή του Corbo για την ολοκληρωμένη αποτίμηση αλλά και το συσχέτισμό των φαινομένων.



Εικόνα 1.8:
Οριζόντια Τομή με τις θέσεις των ενσύρματων εντοιχισμένων αισθητήρων σε όλες τις υπόγειες δομές

Το σύνολο όλων των προαναφερθέντων ενεργειών θα συμβάλει καταλυτικά στη μείωση των θερμογρικών φαινομένων διασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα και συμβάλλοντας στην αειφορία του Ιερού Μνημείου.

VII. Βιβλιογραφία

1. Μοροπούλου Α. (1998) "Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα "ΥΛΙΚΑ Ι: Φυσικοχημεία της Φθοράς και Τεχνική της Συντήρησης των Δομικών Υλικών", Ε.Μ.Π., Τμ. Χημ.-Μηχ., Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Αθήνα.
2. Steiger M.A., Charola E. and Sterflinger K. (2011) "Weathering and deterioration, Stone in Architecture", Springer, Berlin, pp.227-316.
3. Wendehorst R. (1981) "Δομικά υλικά", Έκδοση Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
4. Winkler W.E. (1975) "Stone: Properties, Durability in Man's Environment", Springer- Verlag.
5. Cakmak S.A., Moropoulou A., Mullen C. (1995) "Interdisciplinary Study of Dynamic Behaviour and Earthquake Response of Hagia Sophia", Journal of Soil dynamics and earthquake engineering, 14, 9, 125-133.
6. Σκουλικίδης Θ., Βασιλείου Π. (2007) "Διάβρωση και Προστασία Υλικών", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
7. Μπισμπίκου Α. (1997) "Μελέτη - αίτια και μηχανισμοί - της φθοράς των δομικών υλικών του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας σε σχέση με την ατμοσφαιρική ρύπανση", Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
8. Gauri K.L., Doderer G.C., Lipscomb N.T., Sharma A.C., (1974) "Reactivity of treated and untreated marble specimens in an SO₂ atmosphere" Studies in Conservation, p. 100.
9. Καρόγλου, Μ. (2005) "Μελέτη των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς υλικών ελεγχόμενης μικροδομής σε επεμβάσεις συντήρησης", Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
10. Καραγιάννης Ν. (2017) "Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
11. Karagiannis N., Karoglou M., Bakolas A. and Moropoulou A. (2016) "Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved, New Approaches to Building Pathology and Durability", Springel.
12. Μοροπούλου Α. (2017) "Περιβαλλοντικά αίτια – Φαινόμενα και μηχανισμοί της φθοράς – Σχέση φθοράς και παθολογίας", Αθήνα.
13. Arnold A., Zehnder K. (1988) "Decay of stony materials by salts on humid atmosphere", International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun.
14. Winkler E.M. (1994) "Stone in architecture, properties, durability", third edition, Berlin, Springer.

15. Camuffo D., Del Monte M., Ongaro A. (1984) "The role of the atmospheric precipitation in Venice, related to both the dynamics of precipitation events and the weathering of monuments", *The science of total environment*, 40, 125-139.
16. Camuffo D. Bernardi A. (1990) "Atmospheric pollution and deterioration of monuments" Advanced Workshop 'Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones', Consiglio Nazionale delle Ricerche, ICTR, Italy.
17. Camuffo D., Del Monte M, Sabbioni C, Vittori O. (1982) "Wetting, Deterioration and Visual features of stone surfaces in an urban area", *Atmospheric Environment*, 16, 9, 2253-2259.
18. Camuffo D., Del Monte M., Sabbioni C. (1983) "Origin and Growth Mechanisms of the sulfated crusts on Urban limestone" *Water, Air, and Soil Pollution*, 19, 351-359.
19. Vos H. B. (1975) "Water absorption and drying of Materials", Πρακτικά διεθνούς συμποσίου 'The Conservation of stone', Bologna, p. 595.
20. Torraca G. (1982) 'Porous building materials - Materials science for architectural conservation', ICCROM second edition.
21. Mamillan M. (1981) "Connaissance actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs", πρακτικά διεθνούς συμποσίου "The Conservation of Stone", Bologna, p. 59.
22. Theoulakis P. και Moropoulou A. (1997) "Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay".
23. Alfano G., Chiancarella C., Cirillo E., Fato I., Martellotta F. (2006) "Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing", *Building and Environment*, 41, 1060-1069.
24. Moropoulou A., και συν., και συν. (2003) "Microstructural criteria to evaluate stone susceptibility to sea-salt decay on Mediterranean and Atlantic coast monuments".
25. Pel L. (1995) "Moisture transport in porous building materials", Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
26. Bomberg M., Pazera M. and Plagge R. (2005) "Analysis of Selected Water Absorption Coefficient Measurements", *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 227-243.
27. Gennes P.G., Brochard-Wyart F., Quere D. (2004): "Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves", Springer, New York.
28. Bell C., (1976) "Thermal and moisture protection manual, Me Graw-Hill, pp. 143.

29. Arnold A. (1982) "Rising damp and saline minerals, Fourth International Congress on the Deterioration and Preservation of Stone Objects, Louisville, 11–28.
30. Karoglou, M., Moropoulou, A., Giakoumaki, A., Krokida, M. (2005) "Capillary rise kinetics of some building materials, *Journal of Colloid and Interface Science*", 284, 260–264.
31. Avoletti M. (1997) "Contro l'umidità ascendente. Recupero & Conservazione", 17, 58–705.
32. Oliver A. (1997) "Dampness in buildings", In: Douglas J, Sterling JS (eds) 2nd edn., Blackwell science, Great Britain.
33. Moropoulou, A., Karoglou, M., Bakolas, A., Krokida M. and Maroulis, Z. B. (2014) "Moisture Transfer Kinetics Building Materials and Components: Modeling, Experimental Data, Simulation" In: *Drying and Wetting of Building Materials and Components*. Springer International Publishing Switzerland.
34. Arnold A. (1989) "Salt weathering on monuments" σε Proc. 1st Int. Symp. The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Bari.
35. Moropoulou, A., Theoulakis, P. (1991)"Conditions causing destructive NaCl crystallization into the porous sandstone building material of the Medieval City of Rhodes", *Proceedings of the 2nd Int. Symposium for the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Geneva*, p. 493.
36. Theoulakis, P., Moropoulou, A. (1988) "Mechanism of deterioration of the sandstone of the Medieval City and the Castle of Rhodes", *Proceedings of the Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Poland*, p. 86.
37. Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou A., Zedri E. (1996): "Salt impact on brickwork along the canals of Venice", *Journal of Materials and Structures*, 29, 1-9.
38. Arnold, A. (1981) "Nature and reactions of saline minerals in walls", *Proc. Intern. Symp. 'The Conservation of Stone'*, Bologna, p. 13.
39. Θεουλάκης, Π. (1993) "Μελέτη των αιτίων φθοράς και των μηχανισμών διάβρωσης του ψαμμίτη του Κάστρου και της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου", *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ*.
40. Powers, T. C. (1955) "Basic considerations pertaining to freezing-and-thawing tests", In *ASTM Proceedings*, Vol. 55.
41. Dunn, J.R., Hudec, P.P. (1966) "Water, clay and rock soundness", *Ohio Journal of Science*, 66, 2.
42. Winkler, M. F.(1968) "Frost Damage to Stone and Concrete: Geological Considerations", *Engineering Geology*, 2, 5, 315-323.

43. Lewin S.Z. (1981) "The mechanism of masonry decay through crystallization", Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments, Washington D.C., National Academy of Science, 1981, pp. 120-144.
44. Rossi-Manaresi R., Tucci T. (1989) "Pore structure and salt crystallization: "salt decay" of Agrigento biocalcarene and case hardening in sandstone", Proceed. 1st Int. Symposium for the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Bari.
45. Park, S. C., "Holding the Line: Controlling unwanted moisture in Historic Buildings" Preservation briefs, Voi. 39, 1999.
46. RISING DAMP and its CONTROL, A Guide to the Control of Rising Dampness using Safeguard Dryzone Damp-proofing Cream, Dryzone.
47. Massari G., Massari L (1981) "Risanamento Igienico dei locali umidi", Ed. Ulrico Hoepli, Milano.
48. Valentini, M., Cattaneo M., Zecca, S. (1997) "Risanamento dall' umidità per risalita capillare di murature: verifiche sperimentali delle tecnologie di intervento, Materiali e tecniche per il restauro", Proc. AIMAT, Cassino, pp. 87-95.
49. Αραβαντινός, Δ., "Υδροπροστασία κτιρίων", Σημειώσεις «Οικοδομική ΙΙ», ΑΠΘ, 2001, pp.79-80.
50. Massari G, Massari L, (1985) "Damp buildings, old and new", Bulletin of the Association for preservation technology, Voi. 17, No.1, pp. 2-30.
51. Λαμπρόπουλος, Β., Λ., (1993) "Διάβρωση και συντήρηση της πέτρας", Αθήνα.
52. Taylor, J., B., (1985) "Plastering", 4th Ed., Essex:Longman Science & Technology.
53. Biscontin G., Driussi G., (1998) "Indagini preliminari sull'azione di intonaci traspiranti su murature umide a Venezia", Tecniche Universitat.
54. Ασημακόπουλος Κ., Δ., Λυγερού Ι.,Β., Αραμπατζής Α., Γ. (2009) "Μεταφορά Θερμότητας", ΕΜΠ.
55. Κακάτσιος Ξ., (2011) "Μεταφορά θερμότητας και Μάζας", ΕΜΠ
56. Longan, D. L. (2007) "A first course in the finite element method". Wisconsin - Platterille: Thomson.
57. Γκότσης Π., (2013) "Πεπερασμένα Στοιχεία".
58. Μοροπούλου Α. (2005) «Η Ελληνική συμβολή στη συντήρηση, αποκατάσταση και αντισεισμική προστασία της Αγιά Σοφιάς στην Κωνσταντινούπολη», Τεχνικά Χρονικά.

59. Spyrakos C.C., Pugi F., Maniatakis C.A., Francioso A., (2015). Evaluation of the Dynamic Response for a Historic Byzantine crossed-dome church through Block joint and Kinematic analysis. in: Proceedings of COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete.
60. Σπυράκος Κ., (2015). Σύγχρονες Προσεγγίσεις για την Αντισεισμική Προστασία Κτισμάτων Πολιτιστικής Κληρονομιάς - Ανασκόπηση - Πρόταση. Εταιρεία Έρευνας και Προώθησης της Επιστημονικής Αναστήλωσης των Μνημείων (ΕΤΕΠΑΜ), 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων, Πρακτικά Θεσσαλονίκη.
61. Syrmakizis K., Mavrouli O., Papaevaggeliou P., Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A., (2013) "Finite element analysis and fragility curves for the evaluation of restoration mortars behavior regarding the earthquake protection of historic structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54, 61-65.
62. Συρμακέζης Κ., (2008) «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Ιστορικών Κατασκευών και Μνημείων», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, 1843.
63. Κελίρης Χ. (2007) «Μετάδοση θερμότητας σε ανομοιογενές υλικό με χρήση πεπερασμένων στοιχείων», Θεσσαλονίκη.
64. Moropoulou A., Karoglou M., Agarakis I., Mouzakis H., Asimakopoulos M., Pandazis G., Lambrou E., "Structural Health Monitoring of the Holy Aedicule in Jerusalem", *Structural Control Health Monitoring* (2019).
65. Moropoulou A., Karoglou M., Bakolas, et al., (2014) "Moisture Transfer Kinetics in Building Materials and Components: Modeling, Experimental Data, Simulation", In: Delgado JMPQ (ed) *Drying and Wetting of Building Materials and Components*. Springer, Cham, pp. 27-49.
66. Karagiannis N, Karoglou M, Bakolas A, et al. (2016) "Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials", *J BUILD ENVIRON*, 106, 402-408.
67. Camuffo D. (2014) "Microclimate for cultural heritage: conservation, restoration", 2nd ed. Elsevier.
68. Μητρόπουλος Θ., (2009) "Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως Ιεροσολύμων – Το έργο του Κάλφα Κομνηνού", Θεσσαλονίκη: Ευρωπαϊκό Κέντρο Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Μνημείων.
69. Moropoulou A., Georgopoulos A., Lambrou E., Pantazis G., Tapinaki S., (2016) "Underground interventions at the holy sepulcher Rotunda area to assure safety and sustainability of the Holy Aedicule rehabilitation. Geometric documentation of the cisterns and the underground tunnels in the church of the Holy Sepulcher" Interdisciplinary Research Group for the Monuments Protection.

70. Moropoulou A., Kavadas M., Marinos P. (2016) "Underground interventions at the holy sepulcher Rotunda area to assure safety and sustainability of the Holy Aedicule rehabilitation. Foundation interventions for the underpinning, reinforcement, and support of the Holy Sepulcher.

71. Moropoulou A., Lampropoulos K.C., Alexakis Em., Sotiropoulos P., Aggelopoulos A., Karampelas E., Tamvakeras D., (2016) "Underground interventions at the holy sepulcher Rotunda area to assure safety and sustainability of the Holy Aedicule rehabilitation. Non destructive prospection of the underground structures and humidity sources (canals, cisterns and voids).